



THÈSE

En vue de l'obtention du

DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE TOULOUSE

Délivré par :

Université Toulouse 3 Paul Sabatier (UT3 Paul Sabatier)

Présentée et soutenue par :

Hélène DEWAELE

le lundi 4 décembre 2017

Titre :

Intégration de données satellitaires dans le modèle ISBA pour le suivi des céréales à paille pluviales et l'estimation de la Réserve Utile en eau du sol

École doctorale et discipline ou spécialité :

ED SDU2E : Surfaces et interfaces continentales, Hydrologie

Unité de recherche :

Centre National de Recherches Météorologiques (UMR-3589)

Directeur/trice(s) de Thèse :

Jean-Christophe CALVET, Dominique CARRER

Jury :

Jean-Philippe GASTELLU-ETCHEGORRY, Université Toulouse 3 (Président)

Isabelle BRAUD, IRSTEA (Rapporteur)

Catherine OTTLE, LSCE (Rapporteur)

Isabelle COUSIN, INRA (Examineur)

Albert OLIOSO, INRA (Examineur)

Remerciements

Je me suis lancée dans cette aventure de trois années sans vraiment m'attendre à tout ce que cela impliquait en termes de remise en question, d'endurance et de rencontres surtout. Et en trois ans, c'est incroyable ce que l'on peut vivre, comme si des dizaines de vies différentes s'étaient succédé en si peu de temps. Etre enfin arrivée à l'étape de la rédaction des remerciements est un sentiment très étrange surtout lorsque l'on passe tout ce temps à se dire que l'on n'en verra jamais la fin !

Alors je voudrais tout d'abord remercier infiniment mon directeur de thèse : Jean-Christophe Calvet. Merci de m'avoir permis de vivre cette expérience, au combien enrichissante. Merci pour ta patience, de m'avoir donné beaucoup de liberté tout en étant présent tout au long de ces trois années et de m'avoir fait confiance. J'ai énormément appris à tes côtés : lors de chacune de nos discussions sur mes résultats tu trouvais toujours l'explication qui rendait ce sujet complexe qu'est la Réserve Utile encore plus intéressant !

Je remercie tout autant mon co-directeur : Dominique Carrer. Merci pour ton soutien moral indispensable, merci d'avoir écouté mes doutes, de m'avoir rassurée et toujours encouragée. Merci de m'avoir conseillée et aidée à établir tous les plans d'attaque possibles pour tenter de percer les secrets de cette Réserve Utile, ce qui m'a permis de prendre confiance en moi petit à petit ! Si je n'ai pas lâché le morceau c'est bien parce que tu étais là, à me répéter que ça allait finir par aboutir, que même si je ne m'en rendais pas compte, j'étais sur la bonne voie. Merci Dominique !

Je remercie les membres de mon jury de thèse pour le temps que vous avez consacré à l'évaluation de mon travail, de l'intérêt que vous lui avez porté, de me permettre de conclure comme il se doit ces trois années et de vous être déplacé à ma soutenance dont la préparation aura été une grande aventure à elle toute seule (un dégât des eaux la veille de sa soutenance ne s'invente pas !).

Je remercie tout particulièrement Isabelle Cousin qui a fait aussi partie de mon comité de thèse. Merci pour ta bienveillance, tes remarques qui m'ont fait prendre conscience que mon travail pouvait être utile à d'autres.

Je remercie mon équipe VEGEO !

Clément, ton arrivée dans l'équipe au milieu de ma thèse lui aura donné un nouveau souffle. Merci d'avoir pris de ton temps pour m'expliquer le fonctionnement de cette obscure machine qu'est le LDAS. Merci pour tes encouragements et ta bienveillance qui m'auront permis de gérer, sans trop paniquer, la découverte de petits bugs à une période cruciale de la thèse !

Simon, merci infiniment pour les données fournies tout au long de cette dernière année de thèse. Ces données m'ont permis d'emmener mon travail encore plus loin ! Désormais, tu peux être tranquille, plus de demande pour 30 000 séries temporelles de LAI en Ukraine à une résolution de 5 km. Ah non, tu ne l'aurais pas en 15 km? Nan mais ça serait plutôt en 35 km en fait ! C'était un plaisir de venir t'embêter à chaque fois en tout cas ! (les bagarres pour choper la dernière part de tarte au citron à la cantine vont me manquer !)

Delphine, merci pour ta gentillesse, pour tes encouragements toujours avec un grand sourire, pour tes « mais t'inquiète pas ! Ça, c'est normal ! » qui remontaient efficacement le moral ! Tes futurs thésards auront beaucoup de chance de t'avoir comme directrice !

Catherine ! Sans qui j'aurais sûrement fait planter tout le serveur avec mes centaines de téras de données produits sans m'en rendre compte au tout début de la thèse ! Encore mille excuses pour ces sueurs froides ! Merci pour ta bonne humeur, ton humour et ton grand sourire même lorsque je donnais enfin le chèque pour la zumba avec un bon trimestre de retard ! (un immense merci pour m'avoir permis de garder mon bureau avec vue sur les Pyrénées jusqu'au bout de ces trois ans !)

Mes différentes Co-bureaux : Alina et Sibó ! Alina, merci pour la jungle tropicale que tu m'as confiée à ton départ ! J'ai été très heureuse de te retrouver pour la fin de ma thèse ! Merci pour tes petites attentions lors de la rédaction du manuscrit en plein été. Et si tu n'avais pas été là, la jungle aurait sûrement péri suite à un stress hydrique particulièrement intense et prolongé ! Sibó, I was so lucky to have you! Thank you for your kindness, your happiness, your "keep fightiiiiing!" and your "of course you can do it"! I really missed you the last month! I wish you the best and I am sure that you will succeed in all of your projects!

Suman, David, Emiliano, Gabriel, Xavier et Florian, merci pour les moments partagés pendant les pauses café et les repas !

Daniel, tout nouveau thésard de l'équipe VEGEO, je te souhaite le meilleur ta thèse !

Je remercie bien sûr toutes les personnes que j'ai eu la chance de côtoyer au quotidien dans ce fameux couloir, 2^{ème} étage du CNRM ! Les pauses café du matin étaient un rituel indispensable pour moi ! Non pas pour terminer la moindre part de gâteau, la moindre chouquette/chocolatine qui restait sur la table mais parce que les nombreux rires et les nombreuses discussions partagés permettaient de recharger mes batteries avant de retourner devant mon ordi ! Un immense merci à toutes les personnes des équipes TURBAU et MOSAIC !

Une pensée aussi pour ma première équipe MICADO chez qui j'ai eu la chance de faire un « pré-doc ». Merci à Béatrice Vincendon et Véronique Ducrocq, vous m'avez donné l'envie de poursuivre cette première expérience dans la Recherche !

Pour tenir le coup, il faut aller se défouler, beaucoup ! Alors, merci à toute l'équipe de Basket Météo 2, l'équipe la plus SWAG du monde, pour tous ces chouettes moments passés sur le « parquet » ! Merci aux personnes toujours partantes pour aller courir, Josué, Nicolas entre autres, c'est toujours plus motivant à plusieurs !

Certaines personnes rencontrées au CNRM m'ont particulièrement marquée et auxquelles je me suis attachée.

Ouria et Régine ! Merci à toutes les deux pour avoir transformé en un chouette moment chaque inscription/dossier à remplir et autres joies administratives!

Alexane et Léo ! Alexane, merci pour les fous rires mémorables à la zumba, pour ton énergie et ta joie de vivre contagieuse! Et Léo : le type le plus stylé du CNRM en après-ski alors qu'il fait 15°C dehors ! Mille mercis pour toutes ces petites attentions : les « ça vaaaaa ? » et les « alleeez, allez, ça va le faire ! » ont été très efficaces pour retrouver de l'énergie pendant la rédaction !

PA et Thibault ! PA le véritable Professeur Moustache ! Merci d'avoir partagé ces quelques spectacles d'improvisation. C'était un plaisir de t'avoir rencontré pendant cette dernière année et je te souhaite plein de courage pour la fin de ta thèse que tu vas gérer comme un chef ! Et Thibault ! L'ambiance du couloir va rester tout aussi animée grâce à toi !

Profite bien de ces trois années pour te faire un paquet de souvenirs au labo et en dehors du labo aussi ! Bref, ne fais pas que bosser quoi ! (Elle est où l'ambiance les gars ?)

Valéry, non merci pour toutes ces crises cardiaques subies avant de trop nombreuses pauses café ! Mais merci pour ce festival de chemises les plus chouettes du CNRM !

Aude et Cécile, vous avez été mes deux fées pour cette semaine de préparation de soutenance et particulièrement ce fameux mercredi après-midi. Infiniment merci d'avoir été là toutes les deux à ce moment-là ! Aude, merci pour toutes les idées Pinterest-couture-tissage, les sessions zumba et danse africaine ! Cécile, je regrette que tu ne sois pas arrivée plus tôt ! Quoique je n'aurais peut-être pas supporté une autre session piscine de 2h !

Stéphanie ! Je te remercie infiniment pour toutes ces sessions « course-baignade à la Ramée-cantine-café » par tous les temps et en toutes saisons, qui permettaient de me défouler, de raconter ma vie et de pouvoir repartir dans le débogage de mes scripts l'esprit aéré. Tout ça va me manquer ! Mille fois merci pour toutes ces discussions !

PEB, ces 25 km à courir de nuit, dans la boue, sous la pluie et le vent début février : c'était une super idée ! Merci d'avoir été là, pour partager nos malheurs de thésards, pour les randos, pour les spectacles d'impros et ces quelques entraînements de foot gaélique !

Je n'oublie pas ceux qui m'ont lâchement abandonnée en cours de route, et tout particulièrement Audrey, Alis, Ju, Rool, Alan et Simon ! Vous m'avez cruellement manqué les copains ! Merci d'avoir toujours été présents malgré vos nouvelles vies !

Cette aventure m'aura permis de construire des amitiés solides que j'espère garder très, très longtemps.

Yannick, merci ! Merci de m'avoir accompagnée dans quasiment tous mes plans semi-marathon-randos-vadrouilles galères, d'avoir fait semblant de me croire à chaque fois je disais « Oh dans 1h grand max on est arrivés ! » et d'avoir supporté mes « ça va, 10min, ce n'est pas vraiment du retard ! »... Merci pour toutes les vidéos de pandas, koalas et autres, qui dans les moments de désespoir le plus total devant l'ordinateur, se révélaient particulièrement efficaces pour retrouver le moral !

Emilie la guerrière et Carole ma sœur siamoise : merci ! Il me faudrait au moins 10 pages pour chacune pour vous remercier comme je le voudrais ! J'ai eu énormément de chance de vous avoir rencontrées et d'avoir pu réaliser ces trois ans de thèse à vos côtés ! Vous êtes les nanas les plus courageuses et les plus battantes que je connaisse ! Merci pour toutes ces danses de la joie pour le moindre bug résolu, ces fous rires-larmes, ces « une infu ? », ces débats « huile de coco ou huile de jojoba ? », ces pique-niques à la Ramée et j'en passe tellement mais je vous l'ai dit, il me manque au moins 10 pages chacune ! Ne changez rien surtout et on est Meilleures Amies pour la vie, hein !?

Mes amies de toujours ou presque parce que rencontrées au cours de mes études : Linda, Cam et Lucie ! Merci d'avoir toujours été présentes tout au long de ma thèse ! Merci pour ces weekends « retrouvailles-semi-marathon » Linda ! Merci pour ces weekends à Lyon à refaire le monde Cam ! Merci pour ces weekends « j'en peux plus, emmenez-moi à la montagne » Lucie ! C'était chouette de vous voir toutes les trois à ma soutenance ! Merci !

Et je termine enfin par ma famille !

Merci à ma grande sœur d'adoption Charlotte pour être toujours présente dans chaque étape de ma vie ! Merci à ma petite sœur Camille d'être comme tu es ! Ça a été une chance incroyable de se retrouver à Toulouse toutes les deux et tu m'as cruellement manqué cette dernière année ! Merci à mon grand frère Julien ! Tu n'imagines pas à quel point je suis fière de toi et de ce que tu réalises avec ton projet de musique ! Merci Papa, tu y es pour beaucoup si je me suis lancée dans cette aventure ! Merci Maman, de m'accompagner dans tous mes choix de vie et de m'avoir appris à garder tous mes morceaux soudés !

Résumé

Le climat, les sols et les ressources en eau sont des facteurs essentiels de la production agricole et conditionnent la disponibilité des ressources alimentaires mondiales. La nécessité de quantifier, d'évaluer et de prédire les pressions exercées sur les ressources en eau et les ressources agricoles dans un contexte de changement climatique représente un enjeu majeur. Pour répondre à ces problématiques, des modèles numériques du fonctionnement des surfaces continentales sont développés. Ils permettent de simuler de nombreux processus naturels tels que le cycle de l'eau, du carbone, la croissance et la sénescence de la végétation, et les flux à l'interface sol-atmosphère. Ces outils puissants sont très largement utilisés par la communauté scientifique mais présentent de nombreuses incertitudes dans la représentation des différents processus biophysiques pris en compte et dans l'estimation des paramètres qui les pilotent. L'absence de données d'observation de variables clés du cycle hydrologique ou de variables clés de la végétation à grande échelle spatiale et temporelle est un frein majeur pour la validation de ces modèles. L'objectif général de ce travail de thèse est d'évaluer dans quelle mesure l'intégration de données satellitaires disponibles depuis une trentaine d'années dans un modèle générique des surfaces continentales permet de mieux représenter les sécheresses agricoles à différentes échelles spatiales. Le modèle ISBA-A-gs développé par le CNRM est utilisé. Il représente la variabilité interannuelle de la biomasse végétale en lien avec les ressources en eau du sol. Des études précédentes ont montré que les simulations du système sol- plante en condition de stress hydrique sont très sensibles à la valeur de la réserve utile du sol, et que la représentation par ce type de modèle de la variabilité interannuelle de la production des céréales à paille est difficile. Une méthodologie de calibration/validation du modèle basée sur l'intégration de séries temporelles satellitaires d'indice de surface foliaire (Leaf Area Index ou LAI) observées à 1km de résolution dans ISBA-A-gs a été développée afin d'estimer la réserve utile du sol pour des cultures de céréales à paille pluviales. Le LAI satellitaire est préalablement désagrégé pour les céréales à pailles. La validation de cette méthodologie est fondée sur la comparaison de la biomasse simulée et des rendements agricoles observés. Une méthode simple de modélisation inverse par minimisation d'une fonction coût a été confrontée à une méthode plus complexe : l'assimilation séquentielle de données. Cette dernière permet de combiner de manière optimale les séries temporelles de LAI observées et simulées par ISBA-A-gs afin de fournir une analyse du LAI, de la biomasse aérienne, et de l'humidité du sol. L'assimilation repose sur la chaîne LDAS-Monde développée par le CNRM. Elle donne des résultats plus réalistes que la modélisation inverse en terme de biomasse simulée et de réserve utile estimée. La représentation de l'impact négatif des sécheresses et des années très humides sur les rendements est améliorée grâce à cette méthode. Les réserves utiles obtenues sur les zones céréalières françaises ont permis la construction d'un modèle de régression linéaire simple permettant d'estimer les réserves utiles directement à partir des valeurs annuelles maximales de LAI satellitaires (LAI_{max}). La cartographie de la réserve utile à partir du LAI_{max} est comparée à la carte au millionième de l'INRA sur la France. La possibilité d'utiliser cette méthode à l'échelle locale est évaluée, ainsi que son extension à d'autres zones agricoles en Eurasie et en Amérique du Nord.

Abstract

Climate, soils and water resources are essential factors of agricultural production and affect the availability of world food resources. The need to quantify, assess and predict pressures on water resources and agricultural resources in the context of climate change is a major issue. To answer these questions, numerical models of the processes at stake over continental surfaces are developed. They simulate many natural processes such as the water cycle, the carbon cycle, vegetation growth and senescence, and the fluxes at the soil-atmosphere interface. These powerful tools are widely used by the scientific community but present many uncertainties in the representation of the various biophysical processes taken into account and in the estimation of the parameters that drive them. The lack of observation data for key hydrological cycle variables or key vegetation variables of large spatial and temporal scales is a major obstacle to the validation of these models. The general objective of this thesis is to evaluate how the integration of satellite data available over the last thirty years in a generic model of continental surfaces allows a better representation of agricultural droughts at different spatial scales. The ISBA-A-gs model developed by CNRM is used. It represents the interannual variability of plant biomass in relation to soil water resources. Previous studies have shown that simulations of the soil-plant system under water stress conditions are very sensitive to the value of the soil maximum available water content, and that the representation by this type of model of the interannual variability of cereal straw is difficult. A model calibration / validation methodology based on the integration of Leaf Area Index (LAI) satellite time series observed at 1 km resolution in ISBA-A-gs was developed. The objective is to estimate the soil maximum available water content for non-irrigated straw cereal crops. The satellite LAI is first disaggregated for straw cereals. The validation of this methodology is based on a comparison of the simulated above-ground biomass with observed agricultural yields. A simple method of inverse modeling by minimizing a cost function is compared with a more complex method: sequential data assimilation. The latter allows optimal combinations of the LAI time series observed and simulated by ISBA-A-gs to provide an analysis of LAI, above-ground biomass, and soil moisture. The assimilation is based on the LDAS-Monde chain developed by CNRM. It gives more realistic results than inverse modeling in terms of simulated biomass and of soil maximum available water content. The representation of the negative impact of droughts and very wet years on yields is improved by this method. It is found that the soil maximum available water content retrieved on the French cereal areas correlates with the maximum annual values of satellite LAI (LAI_{max}). A simple linear regression model can be used to estimate the soil maximum available water content directly from LAI_{max}. The mapping of the soil maximum available water content as derived from LAI_{max} is compared with the one millionth map of INRA over France. The possibility of using this method at a local scale is evaluated, as well as its extension to other agricultural areas in Eurasia and North America.

Table des matières

Remerciements	3
Résumé	7
Abstract	9
Table des matières	11
Table des figures	15
Liste des tableaux	21
CHAPITRE I. Introduction	24
1. Contexte général de la thèse	25
2. Sècheresses : définitions	27
3. Interactions entre le sol, la végétation, et l’atmosphère	30
3.1 Cycle hydrologique, bilan d’énergie à la surface et bilan hydrique	30
3.2 Processus biologiques, stress hydrique et réserve utile	33
4. Phases phénologiques d’une culture de céréales à paille	38
5. Observations des surfaces terrestres	39
5.1 Données satellitaires pour l’hydrologie	40
5.2 Données satellitaires pour le suivi de la végétation	40
6. Problématique de la thèse, état de l’art, et plan de travail	41
6.1 La Réserve Utile du sol	41
6.2 Plan de travail	45
CHAPITRE II. Modélisation	48
1. Modélisation des surfaces continentales	49
1.1 Etat de l’art de la modélisation des surfaces continentales	49
1.2 ISBA-A-gs	50
2. Initialisation des modèles : occupation des sols	54
2.1 Définitions et principe	54
2.2 ECOCLIMAP	56
2.3 ESA-CCI Land cover	56
3. Land Data Assimilation System	56
3.1 Etat de l’art	56
3.2 LDAS – ISBA-A-gs	58
4. Bilan du Chapitre II	59

CHAPITRE III. Cartographie des surfaces homogènes de cultures de céréales à paille et de prairies à l'échelle mondiale..... 62

1. Introduction	63
2. Cartographie des cultures de céréales à paille et de prairies pluviales à l'échelle mondiale	63
2.1 Comparaison ECOCLIMAP – ESA-CCI Land cover	63
2.2 Détermination des zones irriguées	66
2.3 Construction des masques de cultures de céréales à paille et de prairies pluviales	68
3. Cartographie du paramètre LAI _{min} observé et cohérence avec le modèle ISBA-A-gs ...	69
3.1 Cartographie des valeurs moyennes de LAI _{min} observées en Europe	69
3.2 Zoom sur l'Europe de l'ouest.....	72
3.3 Zoom sur l'Europe de l'est.....	73
4. Bilan du Chapitre III	75

CHAPITRE IV. Potentiel de l'utilisation des données satellitaires pour la modélisation de la biomasse et pour le suivi des sécheresses en France..... 76

1. Introduction	77
2. Données utilisées : produits satellitaires bruts et désagrégés et rendements agricoles... 78	
2.1 Cultures de céréales à paille en France	78
2.2 Prairies en France	80
3. Etude comparative WOFOST-ISBA-A-gs	81
3.1 Modèle de culture : WOFOST	81
3.2 Comparaison ISBA-A-gs vs. WOFOST	83
4. Optimisation de paramètres pour une meilleure représentation des sécheresses : modélisation inverse vs. assimilation séquentielle de données	85
4.1 Résumé de l'article	85
4.2 Article Dewaele et al., HESS 2017 : Parameter optimisation for a better representation of drought by LSMs : inverse modelling vs. sequential data assimilation.....	87
4.3 Relation entre précipitations et réserve utile	114
4.4 Validation complémentaire de la méthode utilisée : la « Gross Primary Production »	114
4.5 Conclusion.....	116
5. Evaluation du modèle empirique sur la France : comparaison avec les réserves utiles obtenues par des fonctions de pédotransfert	117
5.1 Estimation de la réserve utile pour des couverts de céréales à paille à partir de données satellitaires de LAI	117
5.2 Zoom sur les trois départements : l'Eure et Loir, la Marne et l'Indre.....	123

6. Bilan du chapitre IV	128
CHAPITRE V. Evaluation d'un modèle d'estimation de la réserve utile sur d'autres zones agricoles : Ukraine et États-Unis	130
1. Introduction	131
2. Rendements agricoles et LAI satellitaire : Etats-Unis et Ukraine	132
2.1 Etats-Unis	132
2.2 Ukraine	134
2.3 Bilan de la comparaison des statistiques agricoles et les données satellitaires pour les Etats-Unis et l'Ukraine	140
3. Réserves utiles « modèle LAI »	140
3.1 Etats Unis	140
3.2 Ukraine	146
3.3 Bilan de la cartographie de MaxAWC « modèle LAI » pour les Etats Unis et l'Ukraine	147
4. Impact sur la représentation de la réserve utile du « modèle LAI » dans le LDAS	148
4.1 Etats-Unis	148
4.2 Ukraine	154
4.3 Bilan de l'étude de l'intégration des valeurs de MaxAWC « modèle LAI » dans le LDAS	158
5. Relation entre la moyenne des précipitations et MaxAWC « modèle LAI »	159
5.1 Etats-Unis	159
5.2 Ukraine	162
5.3 SWI et période de croissance de la culture	162
6. Bilan du Chapitre V	167
CHAPITRE VI. Conclusion et perspectives	170
Bibliographie	177
ANNEXE A. Zoom sur trois départements: Eure et Loir, l'Indre et la Marne	199
1. Département de l'Eure et Loir	200
2. Département de l'Indre	201
3. Département de la Marne	203
ANNEXE B. Application de la méthode à un site instrumenté	206
1. Présentation du site	206
2. Etude de sensibilité de MaxAWC et de N_L	207
3. L'optimisation année par année est-elle nécessaire ?	209
4.1 Impact sur la réserve utile optimisée	211
4.2 Impact sur le RMSE entre le LAI simulé/observé	211

4.3	Impact sur le RMSE entre l'ETP simulée/observée.....	211
4.4	Impact sur la biomasse	212
4.	Discussion	213
ANNEXE C. ISBA-A-gs		215
1.	Le modèle de photosynthèse dans ISBA-A-gs	215
1.1	Réponse à la température	215
1.2	Réponse au rayonnement et au CO ₂	216
1.3	Le rapport C _i /C _s	216
1.4	La conductance stomatique	217
1.5	Réponse au stress hydrique du sol.....	218
1.6	Intégration verticale de la feuille à la canopée	219
2.	La phénologie dans ISBA-A-gs	220

Table des figures

Figure I.1 Carte mondiale de la part des ressources en eau utilisée par l'agriculture. (Source : http://www.fao.org/nr/water/aquastat/maps/WithA.TRWR_fra.pdf).....	28
Figure I.2 Caractéristiques des quatre catégories de sécheresse (source : rapport de l'OMM n°1006, 2006).....	29
Figure I.3 Schéma du système climatique : bilan d'énergie et cycle hydrologique (Source : IPCC, 2007).....	31
Figure I.4 Zones climatiques établies par la FAO et l'Institut International pour l'Analyse des Systèmes Appliqués (IIASA) pour l'évaluation des ressources agricoles (source : Global Agro Ecological Zones ; http://www.fao.org/nr/gaez/fr/).....	35
Figure I.5 Carte pédologique issue de la « Harmonized World Soil Database » (source : FAO 2003).....	35
Figure I.6 Description des états de l'eau dans le sol (tice.inpl-nancy.fr/modules/sciences_techniques/Proprietes-Meca-Sols/chap7/formes.html).....	36
Figure I.7 Bilan des processus physiques et biologiques aux interfaces sol-plante et plante-atmosphère.....	38
Figure II.1 SURFEX.....	51
Figure II.2 ISBA-A-gs.....	52
Figure III.1 Composition du type de végétation « cultures en C3 » d'ECOCLIMAP-I d'après ESA-CCI LC.....	65
Figure III.2 Composition du type de végétation « cultures en C4 » ECOCLIMAP d'après ESA-CCI LC.....	65
Figure III.3 Composition du type de végétation « Prairies en C3 » d'ECOCLIMAP d'après ESA-CCI LC.....	66
Figure III.4 Composition du type de végétation « prairie en C4 » d'ECOCLIMAP d'après ESA-CCI LC.....	66
Figure III.5 Irrigation dans la zone Euro-méditerranéenne : les zones les plus intensément irriguées sont la plaine du Po (principalement du maïs), le long du Danube (maïs, blé), le delta du Nil en Egypte.....	67
Figure III.6 Irrigation en Amérique du nord : les zones les plus intensément irriguées sont le bassin du Mississippi-Missouri (principalement du soja) et une partie de la Californie (principalement des fruits et des légumes).....	68

Figure III.7 Irrigation en Asie : les zones les plus intensément irriguées sont les bassins du Gange et de l'Indus en Inde, les bassins du fleuve Huang He (fleuve Jaune) et le fleuve Yangsté en Chine qui produisent principalement du riz.	68
Figure III.8 Carte mondiale des zones homogènes de cultures de céréales à paille et de prairies ainsi la carte mondiale des zones potentiellement irriguées.....	69
Figure III.9 (a) Carte des LAI _{min} moyennés sur la période 1999-2013 pour les cultures et les prairies en Europe. Histogrammes et valeur par défaut utilisée par ISBA-A-gs (LAI _{min} = 0.3) des valeurs de LAI _{min} pour les (b) cultures et (c) les prairies.	71
Figure III.10 (a) Carte des LAI _{min} moyennés sur la période 1999-2013 pour les cultures et les prairies en Europe occidentale. b) Histogrammes des valeurs de LAI _{min} et la valeur par défaut utilisée par ISBA-A-gs (LAI _{min} = 0.3) pour (b) les cultures et (c) pour les prairies.....	73
Figure III.11 (a) Carte des LAI _{min} moyennés sur la période 1999-2013 pour les cultures et les prairies en Europe centrale et orientale. Histogrammes et valeur par défaut utilisés par ISBA-A-gs (LAI _{min} = 0.3) des valeurs de LAI _{min} pour (b) les cultures et (c) les prairies.....	74
Figure IV.1 Quarante-cinq sites de céréales à paille en France (Calvet et al. 2012, Canal et al. 2014)	78
Figure IV.2 Comparaison des valeurs maximum de LAI satellitaire avec les rendements agricoles pour les 31 départements présentant des corrélations significatives pour les céréales à paille.....	80
Figure IV.3 Quarante-huit sites de prairies permanentes en France (Calvet et al., 2012, Canal et al., 2014)	80
Figure IV.4 Comparaison des valeurs maximum de LAI satellitaire et les rendements agricoles moyennés pour les 48 départements pour les prairies	81
Figure IV.5 Schéma simplifié de WOFOST (Guide utilisateur WOFOST 7.1.7, d'après Boodgaard et al., 2014)	83
Figure IV.6 Comparaison des biomasses simulées avec a) ISBA-A-gs open loop ; b) LDAS et c) WOFOST, avec les rendements agricoles Agreste, pour 45 départements, sur une période de 5 ans (2007-2011), ce qui représente 225 observations de rendement.	85
Figure IV.7 Schéma de la méthode d'estimation de la réserve utile	87
Figure IV.8 Comparaison de la moyenne des sommes des précipitations des mois de mars, avril et mai pour la période 1999-2013, avec les valeurs de MaxAWC issues de la méthode de modélisation inverse, du LDAS et du modèle LAI.	114
Figure IV.9 Validation fondée sur la photosynthèse journalière du produit FLUXNET. R ² , RMSE et BIAIS du LDAS standard et du LDAS optimisé vs. R ² , RMSE et BIAIS de ISBA standard. Les points cerclés de rouge représentent les points pour lesquels le RMSE a été particulièrement réduit par le calage de la réserve utile du LDAS comparés aux RMSE LDAS standard (Ariège, Dordogne, Gers, Tarn et Tarn-et-Garonne).....	115

Figure IV.10 Lien entre la médiane des valeurs maximales de LAI et la RU optimisée par la méthode LDAS pour les 45 départements producteurs de céréales à paille	118
Figure IV.11 Réserve utile des céréales à paille en France obtenue à partir de données satellitaires de LAI	119
Figure IV.12 Boxplot des erreurs relatives en % entre les MaxAWC « modèle » et les MaxAWC « Wosten », et les «MaxAWC « Al Majou ».....	121
Figure IV.13 Carte des erreurs relatives (%) entre MaxAWC Wosten à gauche, et MaxAWC Al Majou à droite, et MaxAWC modèle. Zone bleue : le modèle sous-estime MaxAWC, zone rouge : le modèle surestime MaxAWC, zone verte : erreur située entre -25 % et 25 %.....	122
Figure IV.14 Réserves utiles modèle LAI. Régions présentant une variabilité des réserves utiles estimées remarquables : 1. Eure ; 2. Indre ; 3. Marne et 4. Sud-Ouest	123
Figure IV.15 Région Normandie : MaxAWC « modèle LAI » vs MaxAWC « Al Majou »	124
Figure IV.16 Carte de la pédologie de la région Normandie, HSWD.....	125
Figure IV.17 Région Centre : MaxAWC « modèle LAI » vs MaxAWC « Al Majou »	126
Figure IV.18 Carte de la pédologie de la région Centre, HSWD	126
Figure IV.19 Région Champagne-Ardenne : MaxAWC « modèle LAI » vs MaxAWC « Al Majou »	127
Figure IV.20 Carte de la pédologie de la région Champagne Ardenne, HSWD	128
Figure V.1 Etats au sein des USA présentant des zones homogènes de cultures de blé : Etat de la Caroline du nord, du Dakota du nord, de l'Ohio et de Washington.....	133
Figure V.2 Rendement de blé et LAI max satellitaire désagrégé pour l'Etat de la Caroline du nord.....	133
Figure V.3 Rendement de blé et LAI max satellitaire désagrégé pour l'Etat du Dakota du nord.....	133
Figure V.4 Rendement de blé et LAI max satellitaire désagrégé pour l'Etat de l'Ohio	134
Figure V.5 Rendement de blé et LAI max satellitaire désagrégé pour l'Etat de Washington.....	134
Figure V.6 Carte pédologique de l'Ukraine présentant les fameuses « terres noires » (source HSWD).....	135
Figure V.7 Carte des zones homogènes de culture de céréales à paille en Ukraine...	135

Figure V.8 Rendements annuels de quatre céréales en Ukraine (FAOSTAT) : le blé, l'avoine, l'orge et le seigle sur la période 1999-2013	136
Figure V.9 Cartographie de l'étude de tendance sur les séries temporelles de valeurs maximales de LAI satellitaires désagrégés (moyenne 35 km x 35 km glissante tous les 5 km) en Ukraine. 65% des points présentent une rupture en 2004.	137
Figure V.10 Boxplot des valeurs annuelles maximales pour les points présentant une tendance.....	138
Figure V.11 Boxplot des valeurs annuelles maximales pour les points présentant une rupture. La courbe grise représente la médiane des valeurs annuelles maximales présentant une tendance.....	138
Figure V.12 Variabilité interannuelle des rendements de seigle en rouge, et des valeurs de LAI maximales en noir pour l'Ukraine.	139
Figure V.13 Carte de la réserve utile « modèle LAI » pour les couverts de cultures de blé aux Etats unis : Etat de la Caroline du Nord, du Dakota du Nord, de l'Ohio et de Washington.....	140
Figure V.14 Carte de la réserve utile estimée par l'USDA pour les Etats Unis : Etat de la Caroline du nord, du Dakota du nord, de l'Ohio et de Washington.	141
Figure V.15 Histogramme des valeurs de MaxAWC « modèle LAI » et USDA pour les couverts de blé des Etats Unis en considérant les quatre Etats : Caroline du nord, Dakota du nord, Ohio et Washington.	142
Figure V.16 Réserve utile LAI modèle, Caroline du nord	143
Figure V.17 Carte de la réserve utile USDA Caroline du nord.....	143
Figure V.18 Carte de la réserve utile de l'Etat du Dakota du nord.....	144
Figure V.19 Carte de la réserve utile USDA de l'Etat du Dakota du nord.....	144
Figure V.20 Carte de la réserve utile modèle LAI de l'Etat de l'Ohio.....	145
Figure V.21 Carte de la réserve utile USDA de l'Etat de l'Ohio	145
Figure V.22 Carte de la réserve utile modèle LAI de l'Etat de Washington	146
Figure V.23 Carte de la réserve utile USDA de l'Etat de Washington.....	146
Figure V.24 Carte de MaxAWC « modèle LAI » pour les couverts de cultures de céréales à paille en Ukraine et distribution des valeurs de MaxAWC	147
Figure V.25 Carte des MaxAWC pour les points ne présentant pas de tendance dans les valeurs de LAI satellitaire.....	147
Figure V.26 Diagramme de dispersion des incréments d'analyse LDAS standard et LDAS avec MaxAWC « modèle LAI » pour chaque groupe de points pour chaque valeur de MaxAWC « modèle » (cf Tableau 5-3)	149

Figure V.27 Médiane des anomalies standardisées des biomasses LDAS avec MaxAWC « modèle LAI » égale à 60 mm, LDAS standard et des rendements de blé pour les 10 points sélectionnés de l'Etat de Washington	151
Figure V.28 Médiane des anomalies standardisées des biomasses LDAS avec MaxAWC « modèle LAI » égale à 80 mm, LDAS standard et des rendements de blé pour les 10 points sélectionnés de l'Etat de Washington	152
Figure V.29 Médiane des anomalies standardisées des biomasses LDAS avec MaxAWC « modèle LAI » égale à 100 mm, LDAS standard et des rendements de blé pour les 10 points sélectionnés de l'Etat de Washington	152
Figure V.30 Apport de la prise en compte de MaxAWC modèle LAI dans le modèle ISBA sur la GPP pour chaque groupe de valeurs de MaxAWC aux Etats Unis.....	153
Figure V.31 Diagramme de dispersion des incréments d'analyse LDAS standard et LDAS avec MaxAWC « modèle LAI » pour l'Ukraine	155
Figure V.32 Médiane des anomalies standardisées des biomasses LDAS avec MaxAWC « modèle LAI » égale à 30 mm, LDAS standard et des rendements de seigle pour les 10 points sélectionnés	157
Figure V.33 Médiane des anomalies standardisées des biomasses LDAS avec MaxAWC « modèle LAI » égale à 50 mm, LDAS standard et des rendements de seigle pour les 10 points sélectionnés	157
Figure V.34 Médiane des anomalies standardisées des biomasses LDAS avec MaxAWC « modèle LAI » égale à 70 mm, LDAS standard et des rendements de seigle pour les 10 points sélectionnés.....	157
Figure V.35 Apport de la prise en compte de MaxAWC modèle LAI dans le modèle ISBA sur la GPP pour chaque groupe de valeurs de MaxAWC en Ukraine	158
Figure V.36 Cartographie des points pour lesquels la moyenne des précipitations pour les mois de mai à juillet est calculée. Comparaison entre la moyenne de ces points et de la répartition des moyennes des précipitations avec MaxAWC "modèle LAI" pour les Etats Unis.....	160
Figure V.37Figure V.38 Anomalie des précipitations mensuelles issues des forçages ERA-interim pour la période 1999-2013 pour l'Etat de l'Ohio et la France	161
Figure V.39 Cartographie des points pour lesquels la moyenne des précipitations pour les mois de mars à mai est calculée. Comparaison entre la moyenne de ces points et de la répartition des moyennes des précipitations avec MaxAWC "modèle LAI" pour l'Ukraine.	162
Figure V.40 Cycle annuel moyen du LAI satellitaire désagrégé pour chaque valeur de MaxAWX « modèle LAI » pour la période 1999-2013 aux Etats-Unis	163
Figure V.41 Séries temporelles des valeurs médianes du SWI simulé par le LDAS pour les points correspondant à une valeur de MaxAWC « modèle LAI » de 60 mm (rouge) et 140 mm (bleu), pour la période 2000-2005 aux Etats-Unis	164

Figure V.42 Cycle annuel moyen du LAI satellitaire désagrégé pour la période 1999-2013 correspondant aux valeurs de MaxAWC « modèle LAI » en Ukraine 166

Figure V.43 Séries temporelles des valeurs médianes du SWI simulé par le LDAS pour les points correspondant à une valeur de MaxAWC « modèle LAI » de 30 mm (rouge) et 70 mm (bleu), pour la période 2000-2005 en Ukraine 166

Liste des tableaux

Tableau IV-1 Pourcentage surfacique des erreurs relatives pour les cultures de céréales à paille en France avec pour référence les réserves utiles Wösten et al. Majou	123
Tableau V-1 Résumé des corrélations entre LAI satellitaires désagrégés médians et rendements à l'échelle nationale sur l'Ukraine sur une période de 15 ans (1999-2013) pour quatre céréales considérant la totalité des points, les points sans tendance et les points avec tendance. Les corrélations significatives (p-value < 0.01) sont indiquées par des valeurs de R ² en gras.	139
Tableau V-2 Médiane des cartes de MaxAWC « modèle LAI » et USDA pour les quatre Etats.....	142
Tableau V-3 Nombre de points par Etat et par gamme de MaxAWC « modèle LAI »	148
Tableau V-4 Nombre de sites dont la biomasse simulées par le LDAS MaxAWC « modèle LAI » est significativement corrélés aux rendements (p-value < 0.01)	150
Tableau V-5 Nombre de sites dont la biomasse simulées par le LDAS standard est significativement corrélés aux rendements (p-value < 0.01)	150
Tableau V-6 Médiane des biomasses simulées avec LDAS et MaxAWC « modèle LAI » (BagX), LDAS standard (BagX std) et médiane des rendements (GY) pour les quatre Etats : Caroline du nord (C. N), Dakota de nord (D. N), Ohio (O) et Washington (W).	151
Tableau V-7 Nombre de points par gamme de MaxAWC « modèle LAI ».....	154
Tableau V-8 Nombre de sites dont la biomasse simulée avec le LDAS MaxAWC « modèle LAI » est significativement corrélée avec les rendements de blé et de seigle.....	155
Tableau V-9 Nombre de sites dont la biomasse simulée avec le LDAS MaxAWC standard est significativement corrélée avec les rendements de blé et de seigle	156
Tableau V-10 Médianes et écart-types des biomasses simulées et observées pour les trois valeurs de MaxAWC « modèle LAI » 30 mm, 50 mm et 70 mm.....	156
Tableau A-1. Comparaison des scores de la région des départements l'Eure entre les RU modèle LAI et les RU Al Majou selon les différentes corrections.....	201
Tableau A-2 Comparaison des scores de la région des départements l'Indre entre les RU modèle LAI et les RU Al Majou selon les différentes corrections.....	203
Tableau A-3 Comparaison des scores de la région des départements la Marne entre les RU modèle LAI et les RU Al Majou selon les différentes corrections.....	205

CHAPITRE I. Introduction

1. Contexte général de la thèse

Selon l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et pour l'agriculture (« Food and Agriculture Organization », FAO), la surface des terres émergées du globe est actuellement composée d'environ 30 % de forêts, 26 % de pâturages, 12 % de cultures destinées à produire l'alimentation nécessaire aux plus de 7 milliards d'êtres humains et les 32 % de surfaces terrestres restant présentent d'autres types de surface telles que le sol nu, l'eau, les zones urbaines, etc. Le climat, les sols, et les ressources en eau sont les facteurs essentiels de la production agricole et conditionnent fortement la disponibilité des ressources alimentaires à la surface du globe.

La maîtrise des ressources végétales par les humains prend sa source au Moyen Orient, il y a environ 10 000 ans, où les premiers villages se sont développés dans cette région où la végétation et les céréales abondaient. C'est dans cette région, communément appelée « Croissant fertile », traversant les États actuels de l'Israël, la Palestine, la Jordanie, la Syrie, le Liban, le sud-est de la Turquie et le nord-est de l'Irak, que les humains sont passés d'un statut de chasseur cueilleur nomade à un statut sédentaire, préférant se regrouper en communauté offrant plus de confort et de sécurité. Les ressources naturelles à portée de mains pour se nourrir, s'abriter et se chauffer vont être alors utilisées et progressivement maîtrisées avec l'apparition des premiers semis constituant ainsi les débuts de l'agriculture (Haudricourt, 1962).

La nécessité pour les communautés humaines de s'affranchir des aléas naturels afin de garantir une production agricole suffisante de façon régulière va se traduire par une amélioration considérable des techniques culturales au milieu du XX^{ème} siècle : développement et utilisation d'intrants, irrigation, sélection et amélioration génétique des végétaux, machinisme agricole permettant une meilleure exploitation des régions arables. Cette période de plein essor de l'agriculture entre 1960 et 1990, appelée aussi la « Révolution verte », est marquée par des politiques publiques favorisant la mécanisation et la motorisation des exploitations agricoles. Les agriculteurs des pays en développement ont également été concernés, en particulier dans les pays d'Asie avec pour conséquence de renforcer la sécurité alimentaire. A l'échelle mondiale, bien que la surface des terres agricoles soit restée plus ou moins constante depuis 1960, leur expansion étant limitée (relief, disponibilité de sols fertiles et ressources en eaux restreintes), les rendements ont augmenté de 30% dans les années 90 par rapport aux années 60 (<http://www.fao.org/faostat>). La FAO, créée en 1945, a défini le terme de « sécurité alimentaire » comme étant le fait d'assurer à toute personne, à tout moment, un accès physique et économique aux denrées alimentaires dont elle a besoin. Cette notion regroupe tous les processus impliqués dans les aspects de production (cultures, élevages, etc.) et de non-production (infrastructures et moyens de stockage, transports, etc.) alimentaires ainsi que les facteurs climatiques les impactant (températures et humidité de l'air, précipitations, concentration en CO₂, etc.) et non climatiques (fertilité des sols, irrigation, démographie, économie, politiques, etc.) (IPCC, 2014). Aujourd'hui, la Chine, l'Inde, la Russie, les États Unis et la France occupent les cinq premières places des pays producteurs de céréales, notamment le blé.

Les impacts attendus du changement climatique actuel sur les composantes de ce système alimentaire sont nombreux, complexes et variables géographiquement et dans le temps. Ils accentuent la vulnérabilité des populations souffrant d'insécurité alimentaire. Bien que l'on ait observé un fléchissement du nombre de personnes souffrant de sous-alimentation depuis les années 90, celui-ci s'élève aujourd'hui à 795 millions de personnes (rapport FAO, 2015). A l'horizon 2050, la population mondiale augmentera de 34 % par rapport à aujourd'hui, dépassant 9 milliards d'habitants, dont plus d'un milliard seront exposés à une

sous-alimentation (Global Harvest Initiative report 2016, Foley et al., 2011). Des événements extrêmes tels que les sécheresses répétées sévissant dans la corne de l'Afrique pourraient augmenter en fréquence et en sévérité. Fin 2016, plus de 12 millions de personnes ont dû recevoir une aide alimentaire d'urgence en Ethiopie, Kenya, Somalie et Sud Soudan notamment (<http://www.fao.org/news/story/fr/item/463247/icode/>, FAO).

Les enjeux aujourd'hui sont de pouvoir comprendre toutes les composantes, à différentes échelles, des effets du réchauffement du climat sur le système alimentaire à l'échelle mondiale afin de développer des stratégies d'adaptation et éviter les grandes crises alimentaires. Ceci a été notamment discuté lors de la conférence de Paris sur les changements climatiques de décembre 2015 réunissant 195 pays qui ont signé un accord international. Celui-ci vise à contenir « l'élévation de la température moyenne de la planète nettement en dessous de 2°C par rapport aux niveaux préindustriels et en poursuivant l'action menée pour limiter l'élévation des températures à 1,5°C par rapport aux niveaux préindustriels, étant entendu que cela réduirait sensiblement les risques et les effets des changements climatiques » (Texte de l'accord de Paris, 15 Décembre 2015).

Dans le domaine agricole, les ressources en eau n'étant pas uniformes à la surface de la planète, elles ne permettent pas la garantie d'un rendement suffisant d'une année sur l'autre. Les agriculteurs de régions arides/semi-arides ont dû s'adapter au manque d'eau et ont souvent recours à l'irrigation (Hamdy et al., 1996 ; Iglesia et al., 2007 ; García-Ruiz., 2011 ; rapport FAO, 2008). A l'échelle de la plante, des stratégies d'adaptation se sont aussi naturellement mises en place et les végétaux se sont adaptés physiologiquement et morphologiquement à la diversité des climats (Chaves et al., 2003 ; Jump et al., 2005) en développant par exemple un système racinaire plus profond afin d'augmenter sa capacité d'extraction de l'eau nécessaire pour répondre à une sécheresse (Zwieniecki et al., 1994 ; Grime, 2001 ; Portoghese et al., 2008). Afin de mieux comprendre les interactions entre les variations climatiques et la variabilité interannuelle des rendements agricoles, de nombreuses études se sont basées sur les cultures pluviales de manière à prendre en compte uniquement les moteurs climatiques de la production agricole (Olesen et al., 2011 ; Li et al., 2010 ; Lobell et al., 2011 ; Urban et al., 2012 ; Wheeler et al., 2013). Pour des cultures pluviales, la variabilité interannuelle de l'eau disponible est directement influencée par la variabilité interannuelle des précipitations. Ainsi, en comparant simplement des bases de données de rendements agricoles et des bases de données météorologiques, ces études ont pu mettre en évidence des facteurs climatiques limitant la production agricole comme des températures nettement supérieures ou inférieures à une température optimum ainsi qu'un déficit ou un excès de précipitations pendant la phase de croissance ou à un stade plus avancé de la culture.

L'arrivée des systèmes informatiques dans les années 80 a permis le développement de modèles numériques du fonctionnement des surfaces continentales permettant de simuler de nombreux processus naturels tels que le cycle l'eau, du carbone et de la végétation et de représenter les interactions à l'interface sol-atmosphère. Dans un contexte de changement climatique où certaines régions subiront une diminution des précipitations et une hausse des températures plus importantes, notamment dans les régions tropicales (IPCC, 2014), il est primordial d'utiliser ces modèles génériques modélisant les surfaces continentales à grande échelle, appelés aussi modèles SVAT (« Soil Vegetation Atmosphere Transfer »), et des scénarii climatiques afin d'évaluer et de prédire ces impacts sur le cycle hydrologique dont dépend la végétation (Foley et al., 2000 ; Lobell et al., 2010 ; Quillet et al., 2010 ; IPCC, 2014). D'autres modèles, plus spécifiques, sont appelés modèles de cultures et permettent de simuler la croissance de nombreux types de cultures. Contrairement aux modèles de surfaces, ces modèles intègrent la phénologie de la plante dans les processus biophysiques représentés. Les modèles des surfaces continentales et les modèles de cultures sont toutefois encore perfectibles. Des incertitudes affectent les paramètres de ces modèles en lien avec les

hypothèses et les simplifications qu'implique le développement numérique de tout modèle. Il est souvent nécessaire de procéder à un calage de ces paramètres en fonction des cas d'études. Un nombre trop élevé de paramètres peut alors rendre difficile leur calage et leur validation (Cayrol et al., 2000 ; Kuppel et al., 2012, Canal et al., 2014). Une inter-comparaison de ces modèles et l'utilisation de plusieurs modèles est souhaitable afin de caractériser les erreurs de prédiction et d'évaluation des impacts du changement climatique sur la végétation et le cycle hydrologique (Eitzinger et al., 2004 ; Challinor, 2004 ; Rötter et al., 2011 ; Palosuo et al., 2011 ; Martre et al., 2014 ; Maiorano et al., 2016). Une étude qui a initié le récent projet « Agricultural Model Inter-comparison and Improvement Project » (AgMIP) (Rosenzweig et al., 2013) a comparé un large ensemble de modèles de cultures (Asseng et al., 2013). Ces modèles diffèrent de par leur degré de complexité, les équations représentant les processus biophysiques liés à la croissance et au développement de la plante mais aussi les processus déterminant la réponse de la culture à des facteurs environnementaux. Cette étude a montré la très large variabilité des réponses de ces modèles au changement climatique mais aussi que cette variabilité, et donc l'incertitude, augmentait sous des conditions de températures élevées (Asseng et al., 2013). L'étalonnage, la validation mais aussi l'amélioration des modèles de surface ne sont possibles que si la communauté scientifique dispose de données d'observations de qualité de variables biophysiques clefs et présentant une bonne couverture spatiale et temporelle (Kersebaum et al., 2015).

Les données d'observation issues de la télédétection spatiale sont disponibles depuis une trentaine d'années. Elles constituent de longues séries de mesures collectées à l'échelle mondiale et concernent diverses variables biophysiques représentant la végétation, l'albédo de surface ou bien l'humidité du sol par exemple. Quand un travail d'évaluation et d'harmonisation est fait, ces données ont un intérêt pour l'étude du climat. Ces observations permettent de caler et/ou valider les modèles. Ces derniers permettent de palier dans une certaine mesure l'absence d'observations spatiales et in situ.

L'objectif de ce travail de thèse est d'évaluer dans quelle mesure l'utilisation conjointe de données satellitaires et l'utilisation d'un modèle générique des surfaces continentales capable de représenter la variabilité interannuelle de la biomasse végétale en lien avec les ressources en eau du sol, et donc les événements de sécheresse, permet de retrouver des paramètres clefs tels que la réserve utile du sol et de mieux représenter les sécheresses agricoles à différentes échelles spatiales. En particulier, les cultures de céréales à paille sont considérées dans diverses régions du monde.

2. Sècheresses : définitions

La sécheresse est généralement définie comme étant une période prolongée pouvant s'étendre d'une saison à plusieurs années, où l'on observe un déficit de précipitation par rapport à des moyennes statistiques établies sur une longue période, de nature à impacter les ressources en eau de divers secteurs de l'économie d'une région, d'un pays. Les ressources en eau douce exploitable à la surface des continents proviennent des précipitations, des eaux de surface (lacs, rivières, fonte des glaciers) et des eaux souterraines (aquifères) et sont réparties inégalement. La consommation domestique utilise environ 10 % de la consommation mondiale, l'industrie : 20 % et l'agriculture : 70 %. Les pays du nord de l'Afrique et du sud-est de l'Asie notamment, sont les pays qui accordent la part la plus importante des ressources en eau à l'agriculture à l'échelle mondiale (Figure I.1). Les pressions sur ces ressources en eau et ces secteurs d'activité augmentent et notamment dans les régions les plus vulnérables et

sensibles au réchauffement climatique (Bonan, 1995 ; Bates et al., 2008 ; Seneviratne et al., 2012).

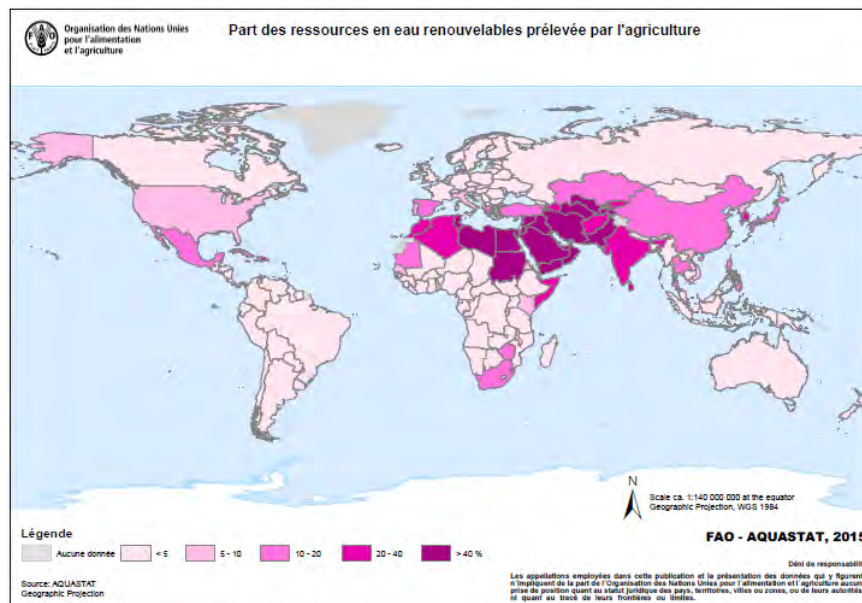


Figure I.1 Carte mondiale de la part des ressources en eau utilisée par l'agriculture. (Source : http://www.fao.org/nr/water/aquastat/maps/WithA.TRWR_fra.pdf)

Afin d'améliorer la gestion de l'eau pour l'agriculture, c'est-à-dire d'utiliser l'irrigation quand cela est nécessaire, il est important de caractériser les épisodes de sécheresses et de les différencier des saisons sèches normales pendant les mois d'été (Margat et Vallee, 1999). Une trop faible quantité ou l'absence de précipitations pendant une période prolongée va entraîner un déficit des apports en eau des réservoirs à la surface et dans les couches du sol du bassin versant. Ainsi, la quantité d'eau disponible pour la végétation diminue, entraînant un stress hydrique de la plante et une répercussion sur la production de biomasse. Difficile à caractériser de par leurs diverses causes et conséquences, quatre grandes catégories de sécheresses ont cependant été définies (Wilhite and Glantz 1985) :

- Les sécheresses météorologiques, caractérisées par un déficit des précipitations (solides ou liquides) pendant une période qui déterminera l'intensité de la sécheresse selon sa durée (Palmer, 1965 ; Boken, 2005) ;
- Les sécheresses agricoles, caractérisées par un déficit en eau du sol réduisant ainsi la production de biomasse et donc les rendements agricoles (Palmer, 1965, Prout et al., 1986 ; Wilhelmi, 2002) ;
- Les sécheresses hydrologiques, caractérisées par une diminution du débit des cours d'eau et des rivières, de l'approvisionnement en eau des lacs mais aussi des nappes souterraines (Yevjevitch, 1967, Tallaksen et al., 1997) ;
- Les sécheresses socio-économiques, caractérisées par un échec de gestion des ressources en eau entre la demande et l'alimentation en eau qui a des conséquences directes sur l'économie, la population et l'environnement (Yevjevich 1967).

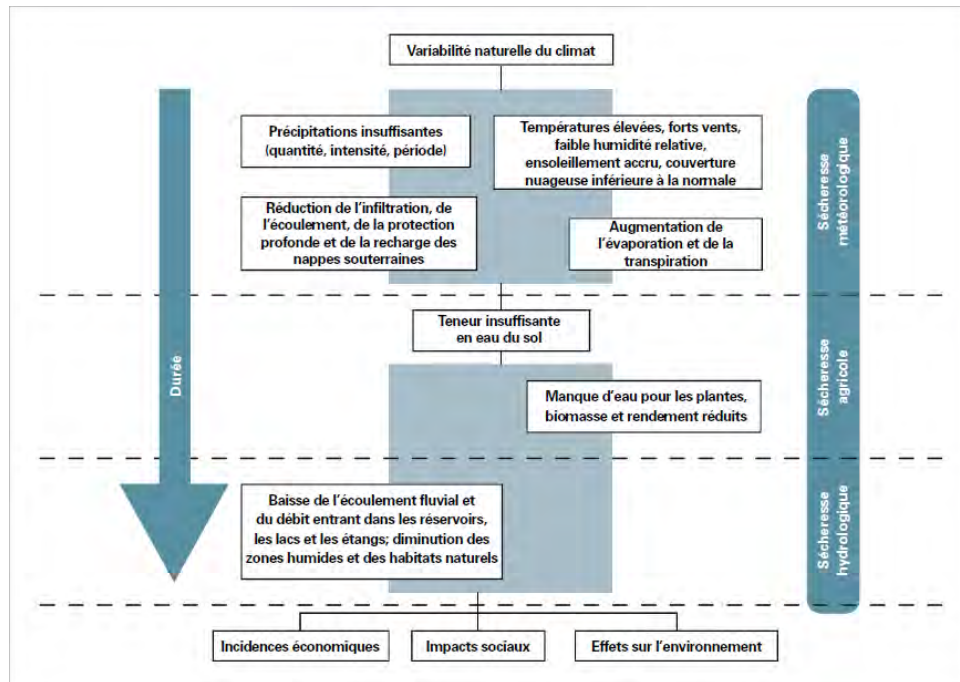


Figure I.2 Caractéristiques des quatre catégories de sécheresse (source : rapport de l'OMM n°1006, 2006)

La durée de la période d'absence de précipitations lie donc ces quatre catégories (Figure I.2) entre elles. Une sécheresse météorologique prolongée sera à l'origine d'une sécheresse agricole et hydrologique par l'amointrissement de la quantité d'eau disponible pour la végétation et pour l'approvisionnement des différents réservoirs. Lorsque les conséquences se ressentent sur l'économie, la population et l'environnement, on parle alors de sécheresse socio-économique. Les sécheresses font parties des phénomènes naturels les plus dévastateurs par leurs impacts sur le système de sécurité alimentaire, et les plus coûteux (Vasiliades and Loukas, 2009 ; Dai et al., 2011 ; Gil et al., 2011 ; Sternberg, 2011). Développer des systèmes de suivi efficace des sécheresses est donc aujourd'hui un enjeu majeur afin de prévenir et d'anticiper les mesures selon les besoins des populations lors de tels phénomènes. En plus de cette catégorisation, la sécheresse est communément décrite par trois dimensions (Wilhite, 2000) :

- La durée, elle peut varier d'une semaine à plusieurs années et dépend de la région ;
- L'intensité ou la sévérité, c'est le rapport entre le déficit hydrique c'est à dire le manque d'eau (précipitations, humidité du sol, ou ruissellement) accumulé sous un certain seuil pendant la durée de la sécheresse. Le critère définissant le seuil sous lequel on considèrera un épisode de sécheresse dépend de la localité de la zone d'étude. La moyenne ou la médiane de la composante hydrique prise en compte est généralement utilisée afin de représenter les « conditions normales » du cycle hydrologique. Ainsi, le seuil appliqué ne sera pas le même en Bretagne et en Occitanie par exemple ;
- L'étendue, elle représente la surface impactée par la sécheresse. Elle varie de l'échelle du pixel, à celle d'un bassin versant ou à l'échelle d'une région.

La difficulté de la communauté scientifique à converger vers une définition universelle de la sécheresse montre la variabilité de leur perception selon la durée, le lieu et son impact sur l'environnement et la société (Wilhite, 2000, Kallis, 2008).

De nombreux indicateurs ont été développés et étudiés pour une large gamme de cas d'études. Certains indices, parmi beaucoup d'autres, calculés selon les séries temporelles de précipitations ou de températures observées in situ, sont couramment utilisés par la communauté scientifique (Choi et al., 2013) tel que :

- Le « Palmer Drought Severity Index » (PDSI) (Palmer, 1965) : cet indice qui a été développé aux Etats Unis, est calculé à partir d'un bilan d'eau simplifié sur un modèle d' « offre et demande ». L'algorithme est fondé sur des données de températures et de précipitations et donne l'intensité d'une sécheresse en un point et un temps donnés ;

Le « Standardized Precipitation Index » (SPI) (McKee et al., 1993) : basé uniquement sur des données de précipitations, cet indice est largement utilisé pour le suivi des sécheresses météorologiques. D'autres indices ont été développés selon la même méthode utilisant d'autres données d'observation comme l'humidité du sol, le débit des rivières ou l'évapotranspiration (Vicente-Serrano, 2007; Khan et al. 2008).

Les observations in-situ ne permettent pas d'évaluer et d'anticiper les sécheresses à l'échelle globale. L'essor de nouvelles données issues de la télédétection pour l'observation de la Terre disponibles ces trente dernières années, présente un avantage considérable afin de suivre efficacement les sécheresses agricoles dans l'espace et le temps, l' « état de santé » des cultures et de la sécurité alimentaire avec une observation disponible au moins tous les 10 jours (Atzberger et al., 2013 ; Kogan et al., 1990 ; Rembolt et al., 2010 ; Rojas et al., 2011 ; Sannier et al., 1998). Ces nouveaux indices seront développés dans le paragraphe 1.4.

3. Interactions entre le sol, la végétation, et l'atmosphère

3.1 Cycle hydrologique, bilan d'énergie à la surface et bilan hydrique

Afin de développer des outils de modélisations les plus performants possibles pour le suivi de la végétation tels que les modèles SVAT et de déterminer les variables d'intérêt simulées par ces modèles, il est primordial de comprendre les interactions complexes du système sol-végétation-atmosphère.

3.1.1 Cycle hydrologique

Les interactions au sein de ce système se font à différentes échelles spatiales et temporelles allant de l'échelle synoptique (phénomènes hydrométéorologiques de l'ordre du millier de kilomètres pour la dimension spatiale et de plusieurs jours pour la dimension temporelle) à des échelles très fines comme celle de la feuille, par le biais d'échanges d'eau, de chaleur et de composés chimiques (CO₂, azote, aérosols par exemple) et dont l'un des moteurs est le rayonnement solaire (Figure I.3). C'est ce dernier qui va déterminer la part des processus d'évapotranspiration à la surface et donc impacter le cycle hydrologique et les processus biologiques de la végétation comme la photosynthèse. Ainsi, une partie de l'eau à la surface de la Terre (océans, lacs, rivières, eau du sol) s'évapore sous l'action du rayonnement solaire. Elle se condense ensuite sous forme de gouttelettes dans l'atmosphère. Celle-ci retombe alors à la surface sous forme de précipitations solides (neige) ou liquides (pluie). Les précipitations solides accumulées dans les régions de haute altitude constituent des stocks

d'eau qui seront restitués sous forme liquide généralement au printemps par l'action du rayonnement solaire. Une partie des précipitations liquides est interceptée par la canopée, et une fraction sera ensuite restituée à l'atmosphère par évaporation. Les précipitations liquides atteignant directement le sol permettent de recharger les différents réservoirs par ruissellement pour les lacs et rivières ou drainage pour les aquifères. Une partie de cette eau liquide sera absorbée par les racines de la végétation puis regagne l'atmosphère sous forme de vapeur d'eau. Ce processus est contrôlé biologiquement, en lien avec la photosynthèse, et est décrit dans la section suivante. A l'échelle synoptique, les couverts de végétation jouent donc un rôle important sur la dynamique de l'atmosphère en modifiant certaines variables comme la concentration en vapeur d'eau ou la température.

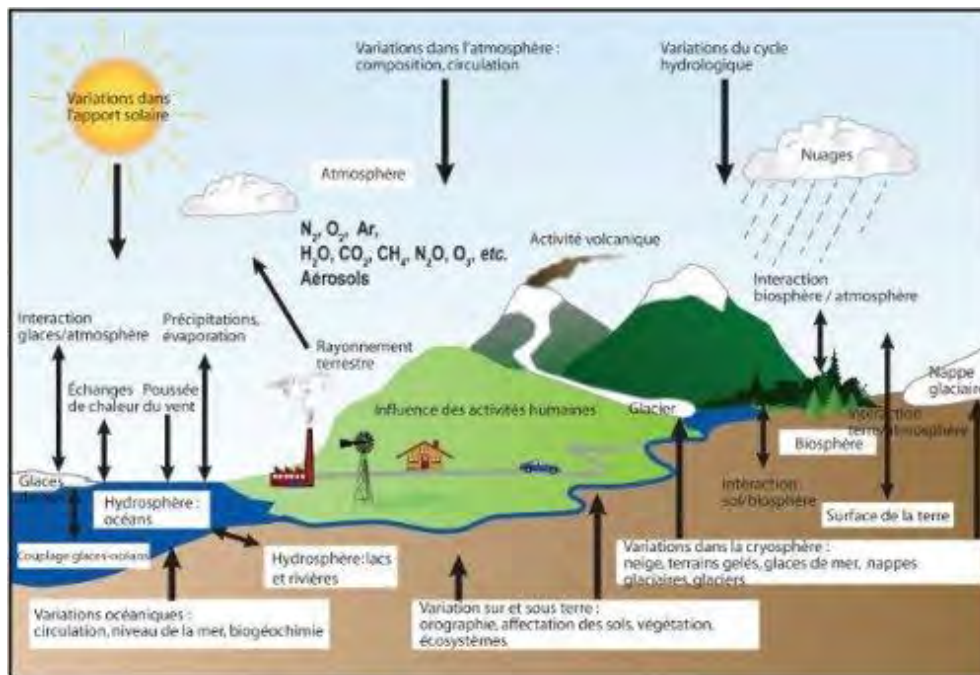


Figure I.3 Schéma du système climatique : bilan d'énergie et cycle hydrologique (Source : IPCC, 2007)

Tous ces mécanismes sont concomitants. Ainsi, la perturbation de l'un de ces mécanismes va modifier l'équilibre de ce cycle et impacter chacune de ses composantes.

L'amplification de l'effet serre par le rejet anthropique de CO₂ est à l'origine de l'augmentation des températures de l'atmosphère et des océans observé depuis 1950. Ceci a un impact sur l'équilibre du cycle hydrologique et peut aussi modifier les processus biochimiques et la phénologie de la végétation (floraison, sénescence, etc.) (Levis et al., 1999 ; Cramer et al., 2001, Nemani et al., 2003).

3.1.2 Bilan d'énergie à la surface

Le moteur des échanges entre les surfaces continentales et océaniques et l'atmosphère est donc le rayonnement solaire. La quantité d'énergie radiative disponible à la surface ou rayonnement net (R_n) est le résultat de quatre flux radiatifs : le rayonnement solaire incident (R_g), le rayonnement solaire réfléchi (R_r), le rayonnement atmosphérique thermique (R_a) et le rayonnement émis par la surface (R_t) (exprimés en $W.m^{-2}$). Le bilan radiatif est décrit par l'équation :

$$R_n = R_g + R_a - R_r - R_t \quad (1)$$

Ou bien :

$$R_n = R_g(1 - \alpha) + \varepsilon(R_a - \sigma T_s^4) \quad (2)$$

Le paramètre σ (exprimé en $\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-4}$) est appelé constante de Boltzmann. Le paramètre ε est l'émissivité. Il traduit la capacité d'une surface à émettre un rayonnement thermique. T_s est la température de surface (exprimée en K).

Les propriétés de la surface vont déterminer la valeur de l'albédo, α , variant de 0 à 1, qui traduit la capacité d'une surface à réfléchir le rayonnement solaire incident (R_g). Ainsi, une surface recouverte de neige fraîche aura un albédo proche de 1, réfléchissant la quasi-totalité du rayonnement. La végétation sera caractérisée par un albédo situé entre 0.05 et 0.3 (Carrer et al., 2014). L'albédo d'un sol nu dépendra de ses propriétés physiques, de sa couleur et de son humidité.

Le rayonnement absorbé par la surface est transformé en énergie thermique, sous forme de chaleur. La loi de Stefan-Boltzmann illustre ce phénomène :

$$R_t = \varepsilon \sigma T_s^4 \quad (3)$$

Pendant la journée, le rayonnement net (R_n) est positif ce qui signifie que l'équilibre entre l'énergie solaire absorbée et l'énergie dite perdue, c'est à dire émise par la surface, est assuré par des échanges turbulents et convectifs ainsi que par des processus de stockage :

$$R_n = H + LE + G + F \quad (4)$$

Le réchauffement des basses couches de l'atmosphère au contact de la surface est le résultat des échanges de chaleur par conduction et par convection traduit par le flux de chaleur sensible H . L'énergie absorbée lors des processus d'évaporation de l'eau de surface correspond au flux de chaleur latente LE . L'énergie absorbée par la végétation lors de la photosynthèse et dégagée lors de la respiration correspond au paramètre F et les transferts de chaleur dans le sol sont traduits par la variable G .

Ainsi, l'évapotranspiration qui intervient à la fois dans le bilan d'énergie sous forme de chaleur latente et au sein du cycle hydrologique, représente une variable clef. Le rayonnement solaire influe sur le cycle hydrologique en modifiant cette variable et influe donc sur les ressources en eau disponibles pour les processus biologiques et les activités humaines.

3.1.3 Bilan hydrique

Afin de pouvoir évaluer les ressources en eau disponibles, il est primordial de connaître les différentes composantes du bilan hydrique. Le bilan hydrique est donc la comparaison des apports et des pertes en eau dans le système sol-végétation-atmosphère, pour un lieu s'écrit de la façon suivante :

$$P = Q + ETR + Ru + Rh \quad (5)$$

Les apports en eau dans le système sol-plante-atmosphère proviennent donc des précipitations liquides et solides (P). Une partie de ces apports en eau ruisselle (Q) en surface ou est drainée en profondeur selon les caractéristiques physiques du sol et peut être considéré comme une perte en eau pour la végétation. Une autre partie est restituée à l'atmosphère par évapotranspiration réelle (ETR) par la combinaison de l'évaporation du sol nu, de

l'évaporation de l'eau interceptée par la végétation, et de la transpiration des plantes. Enfin, une dernière partie contribue à la recharge en eau du sol (Ru) et des aquifères (Rh).

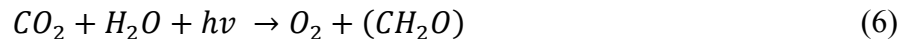
3.2 Processus biologiques, stress hydrique et réserve utile

3.2.1 Photosynthèse

La végétation joue un rôle important dans les échanges d'eau et d'énergie à la surface via l'absorption d'eau liquide par les racines et par le rejet de vapeur d'eau dans l'atmosphère par transpiration. Elle a donc un impact sur le système climatique à l'échelle globale en influençant le bilan d'énergie et le bilan hydrique des surfaces continentales. Ces deux bilans interagissent et génèrent des rétroactions, c'est-à-dire que la modification d'une des composantes du bilan d'énergie ou du bilan hydrique aura un impact sur une autre composante qui va alors agir en retour sur celle-ci. Une rétroaction est identifiée comme positive lorsqu'elle amplifie le phénomène, elle est dite « négative » lorsqu'elle l'affaiblit.

A l'échelle de la plante, il est important de pouvoir caractériser ces processus afin de mettre en avant les paramètres clés impactant la variabilité interannuelle de la biomasse. La connaissance de ces paramètres clés permettra un meilleur suivi de l'état de la végétation.

Comme nous l'avons décrit précédemment, au sein du bilan hydrique et du bilan radiatif intervient le terme d'évapotranspiration. Ce terme est traduit en partie par la transpiration des plantes qui est le flux de vapeur d'eau émis lors des échanges gazeux à la surface des feuilles, permettant en particulier la fixation du CO₂ atmosphérique par la photosynthèse, sous forme de molécules carbonées.



La photosynthèse est le processus biologique permettant à la plante de fabriquer des molécules organiques à partir d'éléments minéraux : eau et CO₂, sous l'action du rayonnement solaire, composante du bilan radiatif. Ces réactions chimiques s'effectuent dans les tissus foliaires, comme par exemple le « mésophylle ». Des éléments cellulaires appelés « chloroplastes » absorbent la lumière et la convertissent en énergie utilisable par la cellule en fixant les molécules de CO₂ et en synthétisant des molécules de glucose. Cette réaction libère de l'oxygène et de l'eau. En l'absence de rayonnement solaire, d'autres éléments cellulaires appelés « mitochondries » assurent l'apport d'énergie pour la cellule en consommant le glucose et en dégageant du CO₂. On parle alors de respiration foliaire. La façon de fixer le CO₂ pendant la photosynthèse permet de distinguer plusieurs catégories de plantes. Les plantes dites en C₃ correspondant à la plupart des arbres, aux légumineuses, aux céréales à paille telles que le blé, le triticale, l'orge, l'avoine et à d'autres plantes cultivées comme le tournesol et le colza. La première molécule formée par ces espèces à partir du CO₂ (l'acide phosphoglycérique), contient trois atomes de carbone. Dans le cas des plantes dites en C₄, le premier composé issu de la photosynthèse est un acide à quatre atomes de carbone (acide oxaloacétique). Parmi ces espèces, on trouve des graminées tropicales cultivées comme le maïs, le sorgho ou bien la canne à sucre, ainsi que les graminées typiques des savanes en régions tropicales.

Les échanges de gaz (vapeur d'eau et CO₂) se font par l'intermédiaire de pores situés à la surface de la feuille : les « stomates ». En fonction des conditions atmosphériques (température de l'air, rayonnement solaire, humidité du sol, la concentration de CO₂ atmosphérique), la plante est capable de réguler l'ouverture des stomates et d'optimiser ainsi l'absorption du CO₂ par rapport à la perte de vapeur d'eau. Cette régulation physiologique est caractérisée par la « conductance stomatique ». Elle permet de contrôler aussi l'efficacité

d'utilisation de l'eau par les plantes : c'est-à-dire sa capacité à assimiler le carbone par photosynthèse pour une perte en eau par transpiration donnée.

3.2.2 Stress hydrique, pédologie et réserve utile

Stress hydrique :

La plante est donc capable de réguler les échanges gazeux (vapeur d'eau et CO₂) entre les feuilles et l'atmosphère grâce à l'ouverture ou à la fermeture des stomates situés à la surface des feuilles. Lorsque les conditions environnementales (températures élevées, absence de précipitation sur une période prolongée) entraînent un assèchement du sol (stress hydrique), réduisant les capacités d'absorption de l'eau par les racines, un mécanisme physiologique permet à la plante d'éviter la déshydratation par la fermeture des stomates (Cornic, 1994 ; Lawlor, 1995 ; Tezara et al., 1999). Cela lui permet de limiter ses pertes en eau mais limite aussi l'assimilation du CO₂ affectant la production de biomasse par photosynthèse (Chaves, 1991). Dans ce mécanisme de régulation biologique des flux gazeux, l'humidité du sol est la variable qui gouverne le stress hydrique de la végétation.

Eléments de pédologie :

Un sol se forme à partir d'une roche mère qui, sous l'action de facteurs environnementaux (végétation, climat, organismes biologiques, etc.) s'altère pour former différents horizons : un horizon de surface présentant de la matière organique et un horizon de roche mère, peu altéré. Les sols les plus évolués, c'est-à-dire plus anciens, présentent des horizons intermédiaires formés par l'altération de la roche mère et par le transport de matières issues de l'horizon de surface (Duchaufour, 1995). La nature de la roche mère est donc à l'origine de la texture (la proportion d'argile et de sable) du sol et affecte sa structure verticale. Ces caractéristiques affectent la porosité des différents horizons du sol, en lien avec l'activité biologique (racines, micro-organismes, ver de terres, ...). Elles ont un impact sur la végétation par l'intermédiaire des nutriments minéraux disponibles pour la plante et du stock d'eau disponible pour la transpiration foliaire. La description du sol est donc extrêmement importante pour comprendre l'évolution et le comportement de la végétation sous différentes conditions climatiques car c'est lui qui va contraindre la capacité de la végétation de développer un système racinaire afin de puiser l'eau et les nutriments (nitrates, potassium et phosphore principalement) dont elle a besoin (Hamblin, 1986 ; Jobbagi, 2001 ; Dexter, 2003). Pour répondre à ce besoin, des bases de données pédologiques ont donc été développées telle que la «Harmonized World Soil Database » qui permet d'obtenir à l'échelle mondiale et à une résolution de 1 km de nombreuses informations telles que la composition du sol en argile et en sable, la concentration de matière organique ou la profondeur (rapport de « Harmonized World Soil Database », 2009). Les sols fertiles se situent principalement dans l'hémisphère nord, dans les zones agro-écologiques caractérisées par un climat tempéré (Figure I.4 et Figure I.5).

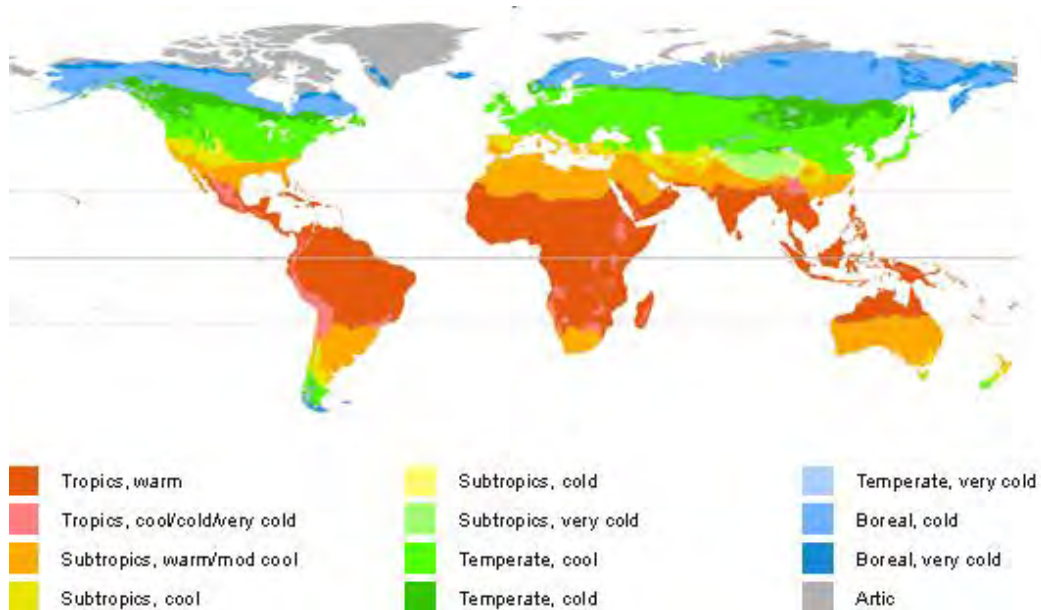


Figure I.4 Zones climatiques établies par la FAO et l'Institut International pour l'Analyse des Systèmes Appliqués (IIASA) pour l'évaluation des ressources agricoles (source : Global Agro Ecological Zones ; <http://www.fao.org/nr/gaez/fr/>)

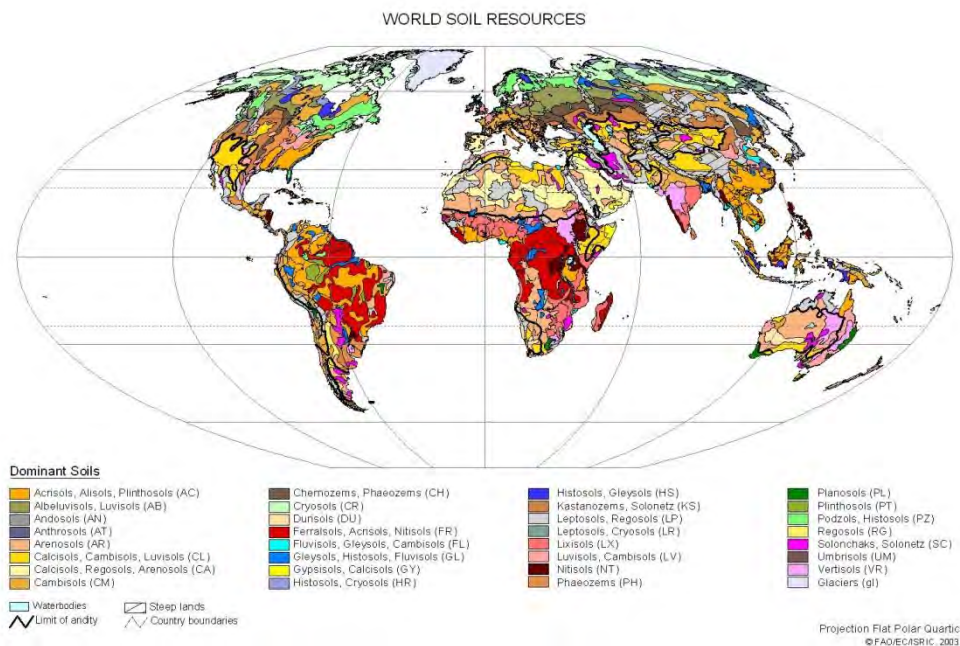


Figure I.5 Carte pédologique issue de la « Harmonized World Soil Database » (source : FAO 2003)

L'eau dans le sol :

La connaissance des caractéristiques physiques du sol est nécessaire au calcul du bilan hydrique. L'eau contenue dans le sol se trouve dans trois principaux états : l'eau liée à la surface des particules du sol, l'eau capillaire qui est retenue dans les espaces vides entre les grains dont est constitué le sol et l'eau libre qui peut circuler par drainage vers la nappe phréatique (Figure I.6)

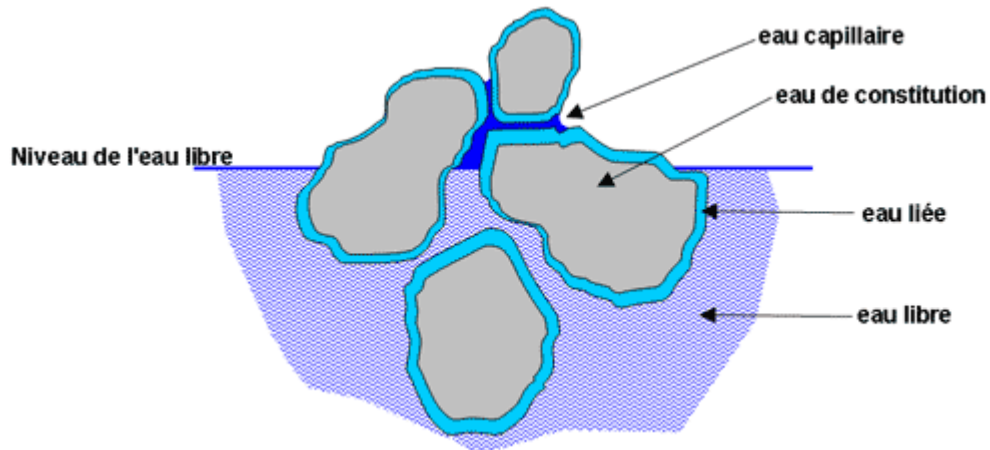


Figure I.6 Description des états de l'eau dans le sol (tice.inpl-nancy.fr/modules/sciences_techniques/Proprietes-Meca-Sols/chap7/formes.html)

Le sol est capable de retenir l'eau par des forces capillaires générées par la tension superficielle entre l'eau et les pores, déterminées par la porosité. Les pertes en eau dans le sol se font via l'évaporation directe du sol et par l'absorption de l'eau par les racines qui va être ensuite restituée à l'atmosphère par transpiration de la végétation. Au fur et à mesure que le sol s'assèche, les forces capillaires et l'énergie nécessaire pour extraire l'eau par absorption des racines et par évaporation deviennent de plus en plus importantes (tension de succion du sol).

Réserve utile :

La « réserve utile », notée RU, c'est-à-dire la quantité d'eau maximale, en millimètre, disponible pour l'alimentation hydrique des plantes. Elle dépend fortement des caractéristiques physiques du sol et de la capacité de la végétation à y développer un système racinaire. Cette quantité d'eau varie entre deux grandeurs pédologiques :

- la quantité d'eau maximale retenue dans le sol, c'est-à-dire la quantité d'eau à partir de laquelle l'eau peut s'écouler dans le sol par drainage gravitationnel, est appelée la « capacité au champ ». La tension de succion du sol à ce stade est de l'ordre de $pF = 2.5$ selon les agronomes ;
- la quantité d'eau contenue dans le sol à partir de laquelle les racines de la plante ne sont plus capables d'extraire de l'eau, est appelée le « point de flétrissement » dont le potentiel capillaire (ou la tension de succion) estimé par les agronomes est de $pF = 4.2$. Au-delà de cette valeur, la plante ne peut plus vaincre la tension et assurer ses besoins en eau : elle se flétrit.

La réserve utile est donc un paramètre clef de la croissance de la végétation car elle va conditionner la réponse de la plante face à un stress hydrique et impacter ainsi la variabilité interannuelle de la biomasse.

Il n'existe pas de définition unique de la réserve utile. La définition simplifiée proposée ci-dessus ne dépend que de trois paramètres : la capacité au champ (θ_{FC}), le point de flétrissement (θ_{PF}), la densité de l'eau (ρ) et la profondeur racinaire (Zr):

$$RU = (\theta_{FC} - \theta_{PF}) \times Zr \times \rho \tag{7}$$

Ceci induit que l'absorption de l'eau par les racines est la même tout au long du système racinaire.

D'autres définitions de la réserve utile se basent sur la profondeur de sol (et non sur la profondeur racinaire) et sur des fonctions de pédotransfert (FPT) qui sont des relations statistiques permettant d'estimer des propriétés du sol difficilement mesurables comme les propriétés hydriques. Ces relations statistiques sont établies à partir d'autres paramètres facilement observables et mesurables comme la composition granulométrique du sol, la concentration de matière organique, la densité apparente (Bouma et van Lanen, 1987) ou bien la présence d'éléments grossiers (cailloux) présentant des capacités de rétention d'eau qui ont aussi un impact dans l'estimation de la RU (Tetegan et al., 2011). D'autre part, des classes de FPT ont été développées afin de relier des propriétés hydriques (réserve utile, capacité de rétention d'eau du sol, etc.) avec des classes de composition de sol (Al Majou et al., 2007, Bruand et al., 2003 et 2004, Wösten et al., 1999). Ces réserves utiles sont donc obtenues indépendamment du type de couvert végétal.

Une distinction entre réserve utile « facilement utilisable » et réserve utile « difficilement utilisable » par rapport à un point de flétrissement temporaire, à partir duquel la plante commence à souffrir d'un manque d'eau et sa croissance commence à en être affectée. La réserve utile facilement utilisable est donc la quantité d'eau que la plante peut utiliser sans que sa croissance soit affectée par un stress hydrique.

D'autres processus interviennent dans le calcul de la RU (Figure I.7) et ne sont pas pris en compte dans l'Equation 7. Dans cette équation, la densité racinaire est considérée comme constante le long du profil racinaire. En réalité, la densité de racines varie en fonction de la profondeur, avec généralement une forte densité de racines en surface et une plus faible densité en profondeur. En conséquence, la capacité de la plante à extraire l'eau du sol n'est pas la même sur toute la profondeur racinaire (Feddes et al., 2001). De plus, le type de racine, jeune ou mature, joue aussi un rôle lors de l'extraction de l'eau du sol (Schneider et al., 2010 ; Kumat et al., 2013 ; Benchmann et al., 2014 ; Guderle et al., 2015). Ainsi, pour des profondeurs racinaires équivalentes, la répartition entre les racines matures liées au transport de l'eau et les racines jeunes associées au processus d'absorption de l'eau a un impact non négligeable sur le calcul de la RU au sein d'une même espèce végétale (Siquiera et al., 2008 ; Benchmann et al. (2014). Enfin, des remontées capillaires au-dessus de la nappe peuvent contribuer aux apports en eau à la plante lorsque l'exploration du sol par les racines permet d'atteindre cette zone. Lors d'un assèchement du sol marqué, Siquiera et al. (2008) et Jarvis et al. (2011) ont montré que les racines étaient capables, lors d'un assèchement du sol, de redistribuer l'eau en la transportant des strates plus humides du sol vers les strates présentant un déficit en eau. Cet ajustement de la teneur en eau le long du profil racinaire est appelé « hydraulic lift ». Son impact sur les flux d'eau dans le sol est aujourd'hui peu documenté.

La réserve utile est un paramètre indispensable dans le calcul du bilan hydrique et détermine le comportement d'une plante face à un stress hydrique. C'est un paramètre difficilement observable et dont les définitions varient. Les simplifications et les hypothèses faites dans son estimation telles que la prise en compte d'une extraction de l'eau constante le long du profil racinaire, l'absence d'information sur la répartition du type de racine sur la profondeur racinaire, l'absence de considération d'une phase caillouteuse du sol et de processus comme les remontées capillaires et l'« hydraulic lift » ont des conséquences sur la

représentation du stress hydrique des plantes dans les modèles SVAT et dans les modèles agronomiques.

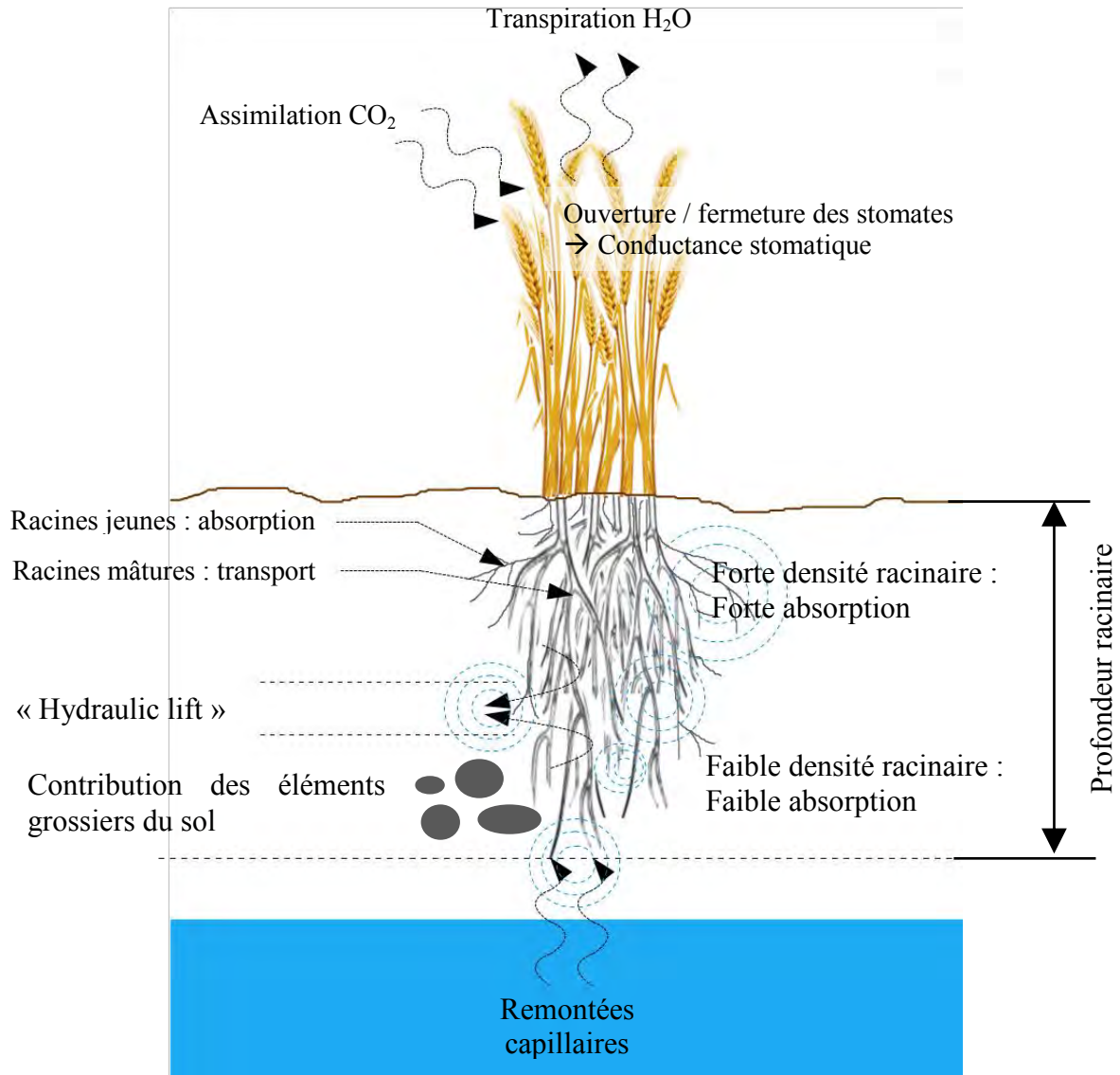


Figure I.7 Bilan des processus physiques et biologiques aux interfaces sol-plante et plante-atmosphère

4. Phases phénologiques d'une culture de céréales à paille

Parmi les cultures en C3, on distingue les céréales à paille, comme par exemple le blé, l'orge, l'avoine, le seigle et le triticale. Ces cultures se développent suivant différents stades phénologiques correspondant au développement de nouveaux organes (Gates, 1995) :

- La germination et la levée : émergence d'une plantule composée d'un embryon de la racine principale (radicule) et d'une pousse protégée par une gaine (coléoptile) qui va percer la surface du sol ;
- Le tallage : cette phase correspond au développement initial des tiges des graminées à partir d'une même plantule ;
- La montaison : élongation de la tige principale ;
- Le gonflement : développement de l'épi qui gonfle la gaine de la dernière feuille ;
- L'épiaison : la gaine s'ouvre et l'épi apparaît ;
- La floraison ;
- Développement et maturation des graines ;
- Sénescence.

Le suivi de ces phases phénologiques permet d'estimer les périodes à risques où un événement climatique extrême (orage, gel, sécheresse, excès d'eau, température excessive, etc.) aurait un impact sur le rendement d'une culture. Les besoins en eau d'une culture varient pendant la période de croissance, de maturation et de sénescence. Ainsi, lorsque la quantité d'eau dans le sol approche le point de flétrissement pendant les phases de développement des graines où les besoins de la plante sont les plus importants (Zhang et Oweis, 1998), les effets sur les récoltes peuvent alors être importants entraînant une baisse des rendements. La variabilité interannuelle des rendements dépend de la capacité de la culture à faire face à une période de stress hydrique plus ou moins intense et donc d'entrer prématurément ou non, dans la phase de sénescence.

La phase de sénescence est sensible à la réserve utile. Une bonne estimation du réservoir d'eau que représente la réserve utile permettrait d'anticiper les besoins en eau des cultures par l'irrigation et ainsi d'avoir une meilleure gestion des ressources en eau disponible pour l'agriculture (Perrier et Salkini, 1991 ; Oweis et al., 1998).

5. Observations des surfaces terrestres

La compréhension et l'évaluation des impacts du changement climatique sur les interactions biophysiques à la surface de la Terre nécessitent des données d'observation présentant une grande couverture spatiale et temporelle. En effet, bien que des réseaux de mesures in-situ de la pluviométrie, du débit des rivières, de l'humidité du sol ou de la biomasse existent en Europe et aux Etats-Unis, ces données d'observations demeurent rares à l'échelle de la planète et ne sont souvent disponibles que pour des périodes relativement courtes. A partir des années 70, les efforts se sont concentrés sur le développement de systèmes d'observation par télédétection afin de pallier à l'absence de données in situ. L'utilisation de données satellitaires dans les domaines de la météorologie, de l'océanographie et de l'hydrologie notamment n'a cessé de croître depuis (Houborg et al., 2015). Ces travaux ont permis de faire avancer l'utilisation de données satellitaires dans l'étude du climat. Le GCOS (*Global Climate Observation System*) a été mis en place en 1992 par les Nations Unies (l'Organisation Météorologique Mondiale notamment). Le GCOS a établi une liste de variables sur lesquelles les efforts pour l'observation doivent être

particulièrement concentrés. Ces variables sont appelées « ECV » pour *Essential Climate Variables* et répondent aux besoins d'observation exprimés par l'IPCC (GIEC en français : Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat), dont les travaux ont commencé en 1988. Ces ECV sont des variables que l'on peut donc suivre régulièrement par télédétection de façon opérationnelle. Elles sont aujourd'hui au nombre de 50 et couvrent le milieu atmosphérique (température, humidité de l'air, concentration en CO₂, précipitation, etc.), le milieu océanique (température de surface de l'océan, salinité, phytoplancton, etc.) et le milieu des surfaces continentales (débit des rivières, albédo, humidité du sol, indice de surface foliaire, biomasse, etc.). En Europe, le programme « Copernicus » qui est une initiative conjointe de l'agence spatiale européenne (ESA) et de l'Union Européenne, permet de rassembler et de fournir à la communauté scientifique ces produits issus de différentes missions spatiales.

La télédétection est définie comme étant la collecte d'une information sur un objet donné sans entrer en contact avec lui (Rees, 1990). Ainsi, la télédétection permet de cartographier différentes variables en utilisant les propriétés de réflexion du rayonnement solaire, laser ou radar, ou les propriétés d'émission de l'objet (infrarouge, micro-ondes, fluorescence). Les instruments embarqués sur un satellite mesurent un signal dont la longueur d'onde est caractéristique de l'objet étudié. La source du signal émis ou réfléchi par l'objet peut être naturelle (ex. rayonnement solaire), dans ce cas l'instrument est qualifié de « passif » (ex. radiomètres), ou bien elle peut être issue de l'instrument lui-même et dans ce cas l'instrument sera dit « actif » (ex. radars, lidars).

5.1 Données satellitaires pour l'hydrologie

Les applications de la télédétection dans le domaine de l'hydrologie se sont développées plus tardivement que dans les domaines de la météorologie et de l'océanographie. Parmi les variables hydrologiques cartographiées par télédétection ayant un impact sur la végétation, on notera l'humidité superficielle du sol qui permet d'obtenir une information sur l'état hydrique des sols pour le suivi des sécheresses (Sheffield et al., 2004 ; Hunt et al., 2009 ; Sanchez et al., 2006). Des études ont montré que l'humidité superficielle du sol peut être estimée par l'utilisation de capteurs micro-ondes permettant de s'affranchir de facteurs perturbateurs du signal que sont l'atmosphère (les nuages en particulier) ou la végétation (Prigent et al., 2005 ; Schmugge, 1983). C'est particulièrement vrai aux basses longueurs d'onde, en bande L par exemple (longueur d'onde de 20 cm soit environ 1 et 2 GHz).

Une mission spatiale appelée « SMOS » (Soil Moisture and Ocean Salinity, Kerr et al., 2001 ; Kerr, 2007) spécialement dédiée à la mesure de l'humidité superficielle des sols a été lancée en 2009 par l'ESA. L'humidité du sol fait partie des ECV.

5.2 Données satellitaires pour le suivi de la végétation

La végétation modifie les propriétés de surface. Elle est caractérisée par une forte absorption du rayonnement solaire dans le rouge, plus précisément du PAR (Photosynthetically Active Radiation), c'est-à-dire pour des longueurs d'onde de 400 à 700 nm, et une forte réflectivité dans le proche infrarouge ce qui permet de la différencier des sols nus. Parmi les nombreux satellites utilisés pour le suivi de la végétation, on notera AVHRR (« Advanced Very High Resolution Radiometer ») depuis le début des années 1980, MODIS (Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer) (Yang et al., 2006) et SPOT-VEGETATION (produits CYCLOPE, Carbon cYcle and Change in Land Observational Products from an Ensemble of Satellites, Baret et al., 2007) depuis le début des années 2000, et MSG (METEOSAT Second Generation) depuis 2002.

De nombreux paramètres de surfaces et de nombreux indices développés ou obtenus à partir des mesures issues de la télédétection sont particulièrement utilisés par la communauté scientifique pour le suivi de la végétation.

Parmi eux, on peut noter des paramètres de surface représentant la structure de la végétation tels que :

- **LAI** (*Leaf Area Index*), c'est un indice de surface foliaire qui exprime la surface foliaire de la végétation par unité de surface de sol (Bron et Rochon, 1992 ; Myneni et al., 1995, 1997, 2002 ; Baret et al., 2007 ; Yang et al., 2006) ;
- **FCOVER** (*Fraction of Vegetation Cover*), il représente la fraction du sol couverte par la végétation verte. Il renseigne sur la densité du couvert végétal (Gutman et al., 1998 ; Zeng et al., 2000 ; Montandon et al., 2008) .

Des paramètres de surfaces illustrant les caractéristiques radiatives de la végétation :

- **FAPAR** (*Fraction of Absorbed Photosynthetically Active Radiation*), il quantifie la fraction du rayonnement solaire absorbée par la végétation pour la photosynthèse (partie verte et active de la végétation). Il dépend de la structure de la canopée, du type de végétation et des conditions atmosphériques (Sellers et al., 1985, 1992a, 1996 ; Myneni et al., 1995, 1997, 2002)

Des indices de végétation développés à partir des paramètres de surfaces :

- **NDVI** (*Normalized Difference Vegetation Index*), c'est un indice de végétation par différence normalisé. Construit à partir des canaux rouges et proche infrarouge, il est sensible à la quantité et la santé de la végétation (Tucker et al., 1985 ; Carlson et al., 1997 ; Huete et al., 1988, 1999 ; Rasmussen, 1992) ;
- **VCI** (*Vegetation Condition Index*), construit à partir du NDVI, c'est un indice pouvant être utilisé pour le suivi des sécheresses. Exprimé en %, cet indice donne une information sur la situation d'une observation à temps donné par rapport à des valeurs extrêmes (min et max) sur une période donnée (Kogan 1995 ; Quiring et al., 2009).

Ceci est, bien sûr, un mince aperçu de la diversité actuelle des indices de végétation développés pour des cas d'études et des régions spécifiques, pour le suivi de la végétation. Dans ce travail de thèse, j'ai utilisé le produit LAI GEOV1 fourni par le programme européen « Copernicus Global Land Service ». Ces données sont disponibles tous les dix jours et à une résolution de 1 km × 1 km à l'échelle globale (voir Chapitre IV).

6. Problématique de la thèse, état de l'art, et plan de travail

6.1 La Réserve Utile du sol

L'amélioration de la représentation de la réserve utile grâce à un modèle de surface continentale et à un système d'assimilation de données est le fil conducteur de ce travail. Paramètre clef de la végétation et difficilement mesurable à grande échelle, la réserve utile conditionne le comportement de la plante lors d'un événement climatique extrême comme la

sécheresse. Ainsi, une estimation précise de ce paramètre au sein des modèles de surfaces continentales permettrait d'améliorer le suivi des sécheresses agricoles, enjeu majeur dans un contexte de réchauffement climatique. En effet, la modélisation des processus de surface en météorologie s'est développée dans le contexte d'une demande croissante d'évaluation et de prédiction des impacts du changement climatique sur les ressources en eau et la production agricole à différentes échelles spatiales. La fréquence d'épisodes extrêmes comme les sécheresses tend à augmenter dans certaines régions, accentuant les pressions sur les ressources en eau disponibles pour les cultures (Bates et al., 2008 ; Seneviratne et al., 2012). La contrainte imposée par le manque de données d'observations directes de ce paramètre rendant tout calage difficile des modèles de surfaces, peut être contournée par l'utilisation de données satellitaires telles l'indice de surface foliaire (LAI).

6.1.1 Impact du climat sur la variabilité interannuelle des rendements des céréales à paille

Les conditions météorologiques extrêmes affectent fortement la production agricole. Dans un contexte de changement climatique, il est important de comprendre et de modéliser la sensibilité du rendement agricole aux conditions atmosphériques dans le but de développer des stratégies d'adaptation.

Afin de mettre en évidence l'impact de la variabilité climatique sur la production agricole, la variabilité interannuelle des rendements doit être étudiée sur des régions et des périodes peu soumises à des améliorations technologiques rapides, et à l'irrigation. Plusieurs études basées sur des données d'observations, comme les données de statistiques agricoles et les bases de données climatiques, ont clairement établi le lien entre la production agricole et les variations climatiques. Olesen et al. (2011) ont étudié les rendements agricoles nationaux des pays européens. Leur analyse a permis de mettre en évidence les facteurs limitant la production agricole comme les températures froides et les périodes courtes de croissance des cultures en Europe du Nord ou bien les températures élevées et les sécheresses dans le sud de l'Europe. Dans un second temps, une analyse de questionnaires élaborés par Olesen et al. (2011) adressés à des experts en agro-météorologie et en agronomie de plusieurs pays européens a permis d'évaluer la vulnérabilité des cultures face au climat actuel et aux changements climatiques attendus en Europe, et de mesurer les adaptations déjà mises en place comme le choix du type de culture, le calendrier des semences, l'irrigation, etc. La corrélation entre la variabilité du rendement agricole et la variabilité des précipitations et de la température dépend aussi de l'échelle étudiée. La variabilité des rendements en Chine par exemple, est gouvernée par la variabilité de la température aux plus larges échelles (4-5°), alors que la variabilité des précipitations influencerait les rendements aux échelles plus fines (0.5 à 2 °) (Li, 2010). Capa-Morocho et al. (2014) ont montré l'influence de la température sur les cultures en établissant un lien entre les anomalies de températures causées par El Nino et les anomalies de rendements potentiels issus de données climatiques ré analysées.

6.1.2 Modélisation de la végétation

6.1.2.1 Degré de complexité des modèles

De nombreux modèles présentant un degré de complexité varié, ont été développés afin d'étudier les effets de la variabilité climatique sur la production agricole. Ceci a permis de mettre en avant l'importance de représenter les paramètres clefs intervenant dans les processus hydrologiques et biologiques comme les caractéristiques hydrauliques du sol, l'évapotranspiration, l'humidité du sol, la quantité d'eau disponible pour les plantes, la profondeur racinaire et la représentation de la consommation d'eau par les racines.

Les premiers modèles de surface utilisés en météorologie dans les modèles de

prévision numérique du temps, consistaient à décrire les différents flux échangés à l'interface sol-atmosphère comme les flux de rayonnement, de chaleur sensible et de chaleur latente, en utilisant une représentation simplifiée du système sol-plante. L'évolution de ces modèles a permis de faire la séparation, au sein des modèles, des échanges s'effectuant en présence de sol nu et ceux en présence de végétation. De nouvelles paramétrisations comme l'interception des précipitations par la végétation ont ainsi amélioré les simulations résultant d'une représentation plus complexe du système sol-plante. Enfin, des modèles de troisième génération, capables de simuler la photosynthèse et la croissance des végétaux ont été développés dans le but de mieux représenter la végétation dans les modèles de climat et de mieux représenter les impacts du changement climatique et de l'augmentation de la concentration en CO₂ de l'atmosphère. Ainsi, des processus chimiques et biologiques directement liés au cycle du carbone ont été intégrés à ces modèles. Ces modèles sont fondés sur les modèles SVAT mais ont un degré de complexité supérieur. Destinés à être couplés à des modèles atmosphériques, ils représentent le cycle diurne, et cela les distingue des modèles de cultures qui ont généralement un pas de temps journalier.

Eitzinger et al. (2004) ont réalisé une étude comparative de trois modèles de cultures: WOFOST (modèle le plus simple), CERES et SWAP (modèle le plus complexe) afin de comparer les composantes simulées du bilan de l'eau du sol (variation de l'évapotranspiration et de l'humidité du sol) avec des données mesurées in situ. En effet, l'évapotranspiration représente une perte d'eau dans le système sol-plante et contribue à déterminer l'état de l'humidité du sol. L'état de l'humidité du sol dans la couche racinaire représente la quantité d'eau disponible pour la plante, favorisant ou non des conditions de stress hydrique. Les variations de l'humidité du sol peuvent influencer les variations des rendements agricoles. Dans cette étude, la biomasse, l'humidité du sol et l'évapotranspiration sont simulées par ces trois modèles pour du blé et de l'orge et pour trois types de sols différents et comparées à des données obtenues par des lysimètres. Les modèles diffèrent par leur représentation de l'extraction de l'eau par les racines qui ne dépend que de la profondeur racinaire et l'eau disponible dans le sol pour WOFOST alors que les deux autres modèles intègrent une représentation des flux d'eau dans le sol plus complexe. Les résultats des simulations d'humidité du sol n'ont pas montré de différences significatives entre WOFOST et les modèles plus complexes. Cependant, les modèles dont la représentation du sol permet de prendre en compte la diffusion de l'eau dans un sol multicouches doivent être préférés aux modèles plus simples (Eitzinger et al., 2004).

6.1.2.2 Représentation du sol dans les modèles et impacts

Une description adaptée de la profondeur racinaire et de l'évapotranspiration, c'est à dire prenant en compte le type de sol et le type de culture, permettrait d'améliorer significativement ces modèles. Des études ont mis l'accent sur le rôle important de la paramétrisation des caractéristiques du sol (texture du sol, profondeur racinaire) qui détermine la capacité de rétention d'eau du sol (Tanaka et al., 2004; Portoghese et al., 2008 ; Piedallu et al., 2011) mais aussi de l'évapotranspiration (Soylu et al., 2011 ; Wang et al., 2012). Ceci devient très important dans des conditions en eau limitée où les plantes s'adaptent physiologiquement en exploitant l'eau pendant les périodes humides (cas des cultures) ou en développant davantage leur système racinaire (plus profondément par exemple) pour maintenir la disponibilité en eau pendant les périodes sèches (Portoghese et al., 2008).

6.1.2.3 Représentation de l'extraction de l'eau par les racines dans les modèles

L'extraction de l'eau par les racines représente aussi un terme de perte en eau dans le bilan en eau du sol et doit être pris en compte dans les modèles de surface. Elle dépend de la longueur et l'architecture des racines ainsi que du point critique lorsque l'extraction de l'eau devient limitée par l'humidité du sol (Feddes et al., 2001). Des modèles d'extraction de l'eau

par les plantes ont ainsi été développés et évalués (Schneider et al., 2010 ; Kumat et al., 2013 ; Benchmann et al., 2014 ; Guderle et al., 2015). L'extraction de l'eau n'est pas constante le long du profil racinaire. La répartition entre les racines matures et les racines jeunes pourrait influencer considérablement l'efficacité de la plante à extraire l'eau du sol même pour des longueurs de racines similaires et n'est pas spécifique d'une espèce (Siquiera et al., 2008 ; Benchmann et al. (2014). En effet, les plus jeunes racines se développent dans les zones d'extraction de l'eau où elles sont les plus efficaces tandis que le transport de l'eau vers la partie épigée de la plante s'effectue par le biais des racines plus matures.

Un autre phénomène appelé « hydraulic lift » ou redistribution hydraulique peut intervenir dans un milieu limité en eau et permettre à la plante de se développer lors d'une période sèche. Les racines sont capables d'ajuster l'humidité du sol en transportant l'eau des couches de sol les plus humides vers celles présentant un déficit dû à des contraintes atmosphériques (Siquiera et al., 2008, Jarvis et al., 2011).

6.1.2.4 Verrous à l'amélioration des modèles

Les modèles de surface présentent donc de nombreuses incertitudes sur la paramétrisation du sol (caractéristiques hydrauliques, textures, profondeurs d'enracinement...), des transferts des flux d'eau au sein du sol (homogène ou non le long du profil vertical), de la réponse des plantes au stress hydrique. Ces incertitudes, pour un grand nombre d'entre elles, affectent aussi la notion de réserve utile du sol.

Cependant, l'utilisation des modèles de surface a montré l'importance de la représentation des processus clefs du cycle de l'eau et du carbone. Estimer précisément la profondeur racinaire est essentielle car elle conditionne la réserve utile, et donc va influencer la production végétale pendant les périodes sèches pouvant créer un état de stress hydrique. Elle intervient aussi dans les modèles hydrologiques influençant le débit des rivières (Szczypta et al., 2012).

À l'échelle de la plante, le LAI et la conductance stomatique déterminent les variations temporelles de l'évapotranspiration. La texture du sol détermine la porosité tandis que la profondeur racinaire conditionne le volume d'eau disponible pour la plante.

Le manque de données d'observations in situ de ces deux paramètres (porosité et profondeur d'enracinement) représente un problème important pour étalonner et contraindre les modèles de surface. Une alternative est d'utiliser de façon indirecte les récents jeux de données obtenus par télédétection, car ils permettent d'obtenir des données d'observation avec une large couverture spatiale et temporelle

6.1.3 Apport des données satellitaires à la modélisation des surfaces continentales et au suivi de la végétation

Pour les zones de cultures, la disponibilité des informations et des observations concernant les pratiques et les rendements agricoles varie en fonction de l'échelle utilisée, rendant la validation des simulations des modèles de surface difficile. Les produits satellitaires disponibles aujourd'hui permettent d'explorer des échelles spatiales plus fines. Les produits satellitaires concernant la végétation (Section 1.5.2) permettent dans une certaine mesure de pallier l'absence de données agricoles pour valider les modèles.

Les travaux de Ichii et al. (2009) ont permis de montrer l'apport positif des données satellitaires dans les modèles de surface. En effet, des données d'évapotranspiration issues de produits satellitaires (MODIS) leur ont permis d'optimiser la profondeur racinaire afin de simuler les variations saisonnières de la production primaire brute de la végétation. D'autres données issues de produits satellitaires ont été utilisées pour estimer la réserve utile. Les humidités du sol dérivées des données SMOS ne concernent que les premiers centimètres de sol seulement. Afin de pouvoir estimer l'humidité de la zone racinaire, des études ont mis en évidence dans un premier temps la forte « corrélation croisée retardée » entre l'humidité des

premiers centimètres (5-10cm) avec celle des couches de sol plus profondes (25-60cm) en utilisant des observations sur une cinquantaine de sites (Crow et al. (2012) ; Ford et al., 2014). Dans un second temps, l'humidité de la zone racinaire est obtenue en utilisant les données d'humidité superficielle du sol provenant de données satellitaires (SMOS, ASCAT, etc.) et en appliquant la méthode du filtre exponentiel (Albergel et al., 2008). Cette méthode donne de bons résultats en considérant le sol comme une colonne homogène mais élude la notion de réserve utile.

Des produits satellitaires représentant la végétation comme le LAI, le NDVI (Normalized Difference vegetation index) et le FAPAR (Fraction of Absorbed Photosynthetically Active Radiation) ont permis d'améliorer les simulations d'évapotranspiration (Ghilain et al., 2012), du bilan d'eau et d'azote et d'évaluer la représentation du système sol-plante (Kowalik et al., 2009; Ferrant et al., 2014; Szczypta et al., 2012 ; Szczypta et al., 2014).

6.1.4 Applications de la modélisation

La représentation plus complexe au sein des modèles de surface de la croissance des plantes et des processus physiques intervenant aux interfaces sol-plante-atmosphère et la disponibilité de nouveaux produits satellitaires permettent de réaliser des études de cas en simulant la production agricole à des échelles plus vastes. Dans le domaine de l'agriculture, la réponse des cultures aux conditions climatiques, comme une période de sécheresse ou une période exceptionnellement pluvieuse, différera selon le type de culture utilisé, la présence ou non d'un système d'irrigation et des politiques de gestion de l'eau appliquées ou non (Quiroga et al., 2010). Différents travaux ont utilisé des modèles de surface de complexité variée afin d'analyser les rendements agricoles en fonction des forçages climatiques (Van der Velde et al., 2011 ; Calvet et al., 2012). Van Der Velde et al., (2011) ont étudié l'impact de la canicule de 2003 et l'année exceptionnellement pluvieuse de 2007 sur les cultures de blé et de maïs en France. Les résultats du modèle sont satisfaisants dans le cas des rendements simulés pour le blé pendant la sécheresse de 2003 mais pour le cas de 2007, l'impact négatif de l'excès d'eau observé sur les rendements n'est pas reproduit par le modèle. Le même constat a été fait par Canal et al. (2014) pour ces deux événements.

Bastos et al. (2014) ont analysé la réponse de la végétation aux vagues de chaleur de 2003 et 2010 en Europe. Un événement climatique extrême peut conduire à des réponses de la végétation très différentes. Ces réponses diffèrent par l'effet de la combinaison des paramètres climatiques influant sur la durée et l'intensité d'une canicule (humidité du sol et température) ou une différence de capacité de la végétation à affronter un événement extrême (profondeur racinaire, photosynthèse).

6.2 Plan de travail

Ce travail de recherche propose une méthode pour améliorer la représentation de la réserve utile grâce à un modèle de surface continentale, et à un système d'assimilation de données. Les outils développés par le CNRM sont utilisés : le modèle ISBA-A-gs, et le Land Data Assimilation System (LDAS), tous deux fondés sur la plateforme de modélisation SURFEX (Masson et al., 2013). La contrainte imposée par le manque de données d'observations directes de ce paramètre rendant tout calage difficile, est contournée par l'utilisation de données satellitaires d'un indice de la végétation : l'indice foliaire (LAI). Des statistiques de rendements agricoles sont utilisées pour la validation. Une première analyse explore la cohérence entre ces deux jeux de données indépendants (LAI et rendements). Une méthode de modélisation inverse ainsi que la minimisation des incréments d'analyse de LAI du LDAS sont explorées. Dans un premier temps, l'application de ces méthodes a été effectuée sur des sites appartenant à des départements fortement agricoles, puis elle a été

appliquée sur un site instrumenté et enfin, elle a été étendue à d'autres régions fortement agricoles dans le monde.

Les résultats de l'ensemble de ces travaux sont présentés dans ce document de thèse dans quatre chapitres.

6.2.1 Chapitre 2 : Modélisation des surfaces continentales

Ce chapitre expose les différents enjeux et limites de la modélisation des surfaces continentales. Les incertitudes inhérentes aux modèles telles que celles dues à la paramétrisation du modèle des processus biogéophysiques, à l'absence de représentation de certains processus et à l'impact du nombre de paramètres à caler, expliquent en partie les différences entre les simulations et les observations. Les caractéristiques générales du modèle utilisé dans ce travail, ISBA-A-gs, sont présentées dans ce chapitre.

Un état de l'art sur l'assimilation de données d'observations dans les modèles de surface continentales a montré leur apport positif dans la représentation des flux de surface et dans l'initialisation des variables biophysiques d'intérêt, améliorant ainsi les simulations. Le LDAS permettant l'assimilation de données de LAI satellitaires dans ISBA-A-gs est présenté dans ce chapitre avec l'objectif d'évaluer son potentiel d'utilisation dans le cadre d'une optimisation de paramètres clefs de la végétation.

6.2.2 Chapitre 3 : Cartographie des surfaces homogènes de cultures de céréales à paille et de prairies à l'échelle mondiale

Ce travail de recherche se concentre sur l'optimisation de la réserve utile des zones homogènes de cultures de céréales à paille. Dans un premier temps, une analyse cartographique a été nécessaire afin de déterminer les possibles zones d'étude à l'échelle globale. Ceci permettra de diminuer l'incertitude résidant dans l'estimation de l'occupation du sol et de ne prendre en compte que le type de végétation étudié.

Par ailleurs, une bonne initialisation des paramètres du modèle comme le LAI_{min} , est nécessaire car celui-ci conditionne l'initiation de la photosynthèse en sortie d'hiver dans le modèle ISBA. Une cartographie du paramètre LAI_{min} satellitaire a été réalisée pour les zones mises en évidence de cultures de céréales à paille pour vérifier la bonne cohérence des valeurs établies dans le modèle.

6.2.3 Chapitre 4 : Optimisation de paramètres pour une meilleure représentation des sécheresses au sein d'un modèle de surface : modélisation inverse vs. Assimilation séquentielle de données

Ce chapitre compare deux méthodes estimant la réserve utile pour les cultures de céréales à paille en France. Une méthode simple de modélisation inverse est comparée à une méthode plus complexe permettant d'assimiler des observations de LAI de manière à corriger la trajectoire du modèle lorsque celles-ci sont disponibles (le « Land Data Assimilation System », LDAS).

Ces deux méthodes sont basées sur le même protocole qui consiste à croiser des séries temporelles observées et des séries temporelles simulées par le modèle de surfaces continentales ISBA-A-gs, de l'indice foliaire de la végétation (LAI). L'objectif ici est de déterminer la valeur de réserve utile permettant de reproduire la variabilité interannuelle de la végétation observée. Pour cela, une fonction coût, définie pour chacune des méthodes, permet de déterminer la valeur de la réserve utile la plus optimale.

Un modèle empirique, basé uniquement sur des données satellitaires de LAI et permettant d'estimer indirectement la réserve utile, a été établi grâce à ce travail de calage de la réserve utile.

6.2.4 Chapitre 5 : Evaluation d'un modèle d'estimation de la réserve utile sur d'autres zones agricoles : Ukraine et États-Unis

Ce chapitre évalue l'application de la méthode développée dans le chapitre 4 pour des régions en dehors de la France. Deux régions du monde produisant des céréales et pour lesquels l'agriculture est un secteur clé de l'économie que sont les États-Unis et l'Ukraine ont été considérées.

L'approche est différente de celle suivie dans chapitre 4. En effet, dans cette partie, un calage de la réserve utile sur les États-Unis et l'Ukraine n'est pas réalisé. Un modèle empirique basé sur des données satellitaires a été établi sur la France grâce au calage de la réserve utile dans un système d'assimilation de données. Ces valeurs de réserve utile issues de ce modèle sont, ici, évaluées par la méthode LDAS.

CHAPITRE II. Modélisation

1. Modélisation des surfaces continentales

1.1 Etat de l'art de la modélisation des surfaces continentales

Les interactions au sein du système sol-plante sont nombreuses et complexes. Elles impliquent des processus biophysiques et des rétroactions à différentes échelles spatiales et temporelles (Charney et al., 1977 ; Betts et al., 1996 ; Xu et al., 2009). Les modèles des surfaces continentales sont un ensemble de relations mathématiques décrivant de façon plus ou moins exhaustive les processus intervenant dans le système sol-plante et dans les échanges avec l'atmosphère. Certaines variables clés comme le rayonnement solaire ou les précipitations ont une grande influence sur le bilan radiatif, le bilan hydrique, le bilan de carbone, et la variabilité interannuelle de la végétation (Sellers et al., 1995 ; Pielke et al., 1998 ; Hong et al., 2000). Ces variables clés sont utilisées pour forcer les modèles, qui en retour fournissent une simulation des différents bilans (eau, carbone, énergie) et de la végétation (biomasse, indice foliaire). Les modèles représentent un atout majeur pour évaluer et prédire les impacts de la variabilité du climat sur la végétation et l'hydrologie. Ils se sont complexifiés au fil du temps, en relation avec l'augmentation de la puissance de calcul des ordinateurs.

Les premiers modèles de surface ont vu le jour dans les années 60 et 70 et sont dits « de première génération ». Ils permettaient de décrire les flux d'eau et d'énergie échangés à l'interface surface-atmosphère tels que les flux de rayonnement, de chaleur sensible et de chaleur latente, en utilisant une paramétrisation simple. Le cycle hydrologique était représenté dans ces modèles par un réservoir d'eau soumis aux précipitations et à l'évaporation selon l'approche « bucket » de Manabe (1969). Les propriétés de surface (albédo, rugosité) étaient considérées comme constantes à la surface, qui s'apparentait à un sol nu homogène. Ces modèles simples ont pu mettre en évidence l'importance de représenter la variabilité spatiale des propriétés de surface pour améliorer la représentation des échanges d'énergie et de vapeur d'eau à l'interface surface-atmosphère.

C'est ainsi que les modèles de « deuxième génération » ont vu le jour. L'axe de développement de ces modèles s'est orienté vers l'amélioration de la représentation de la surface et donc la prise en compte de la végétation, distincte du sol nu. La végétation est représentée par une couche à part entière, une grande feuille unique représentant la canopée dans ces modèles appelés « big-leaf ». L'absorption du carbone, la gestion des pertes en eau de la végétation par l'ouverture et la fermeture des stomates sont représentés de façon simplifiée. En particulier, la paramétrisation de Jarvis (1976) permet de simuler la photosynthèse au sein du modèle en reliant la conductance stomatique aux variables environnementales la pilotant. L'interception des précipitations par le couvert végétal est, elle aussi, prise en compte. La méthode « force-restore » (Deardorff, 1979) discrétise le sol en deux couches, permettant de calculer des échanges d'eau et de chaleur au sein du sol. Ainsi, la simulation du cycle hydrologique et la représentation du système sol-végétation-atmosphère ont été améliorées. Ces modèles de deuxième génération ou modèle SVAT tels que BATS (Biosphere-Atmosphere Transfer Scheme, Dickinson, 1984), SiB (Simple Biosphere, Sellers et al., 1986) ou ISBA (Interactions entre le Sol, la Biosphère, et l'Atmosphère, Noilhan et Planton, 1989) intègrent des processus biophysiques.

A la fin des années 80, l'évaluation de l'impact de l'augmentation des gaz à effet de serre induisant le changement climatique devient un enjeu majeur. C'est dans ce contexte que les modèles de « troisième génération » ont été développés. Ils sont caractérisés par l'intégration du cycle du carbone dans le système sol-végétation-atmosphère. Ces modèles ont la capacité de simuler, à l'échelle de la feuille, l'assimilation du CO₂ par la photosynthèse. Le modèle de Farquhar et al. (1980) est couramment utilisé pour les plantes de type C3. Il permet de représenter les processus biochimiques assurant photosynthèse, en particulier l'activité de

l'enzyme RubisCO. Celle-ci catalyse la réaction qui permet aux feuilles de fixer le CO₂ atmosphérique sous forme de biomasse. Il s'agit d'une réaction de réduction du CO₂ en glucides qui dépend de la quantité de rayonnement solaire absorbé par la chlorophylle et de la capacité de la feuille à exporter et à consommer les produits issus de la photosynthèse (glucides, oxygène). La conductance stomatique, g_s , qui décrit la diffusion du CO₂ et de la vapeur d'eau à l'interface feuille-air, au travers des stomates est calculée en fonction du taux d'assimilation nette carbonée (Ball et al., 1987). Celle-ci est reliée à l'efficacité d'utilisation de l'eau par la plante (WUE, Water Use Efficiency) c'est-à-dire l'optimisation du rapport entre l'assimilation nette carbonée et la perte en eau par transpiration effectuée par la plante en fonction des conditions de stress hydrique. Ces modèles sont dits de type « A- g_s » (avec A pour assimilation nette carbonée et g_s pour conductance stomatique). En Europe, ont été développés par exemple ISBA-A- g_s (Noilhan et Planton, 1989 ; Calvet et al., 1998), MOSES (Met Office Surface Exchange Scheme, Cox et al., 1998) ou ORCHIDEE (Organising Carbon and Hydrology In Dynamic Ecosystems, Krinner et al., 2005). Ils permettent d'obtenir une représentation des processus biophysique plus réalistes que les modèles de deuxième génération basés sur le modèle de Jarvis (1976). De plus, ils sont capables de prendre en compte l'action du stress hydrique notamment sur l'ouverture des stomates et donc sur l'assimilation de CO₂ par photosynthèse ainsi que l'impact de l'augmentation de CO₂ dans l'atmosphère.

1.2 ISBA-A- g_s

1.2.1 La plateforme de modélisation SURFEX et évolution du modèle ISBA

Le modèle ISBA est une composante de la plateforme de modélisation appelée SURFEX pour SURface Externalisée (Martin et al., 2007, Le Moigne, 2009), développée à Météo-France au CNRM (Figure II.1). Cette plateforme décrit les surfaces selon quatre grandes catégories appelées « tiles » (en anglais) : océans ou mers, lacs, nature (sol et végétation) et zones urbaines. Les paramètres physiques et les fractions de chacun des « tiles » sont attribués à partir de la base de données ECOCLIMAP (Masson et al., 2003) qui est détaillée dans la section 2.1.2. Chaque « tile » est représenté par un modèle indépendant, comme ISBA et ses différentes versions pour le « tile » nature, FLake (Mironov, 2008) pour le « tile » lacs ou bien TEB (Masson et al., 2000) pour le « tile » zone urbaine. Chacun de ces modèles permet de simuler les flux moyens de chaleur sensible, de chaleur latente ou bien des flux d'espèces chimiques à l'interface « tile »-atmosphère. SURFEX peut être utilisé couplé avec un modèle atmosphérique (Sarrat et al., 2009), c'est la version « online » de la plateforme. Il peut être aussi utilisé découplé de l'atmosphère. Dans ce cas, SURFEX est forcé avec des observations ou des analyses atmosphériques, cette version est dite « offline ».

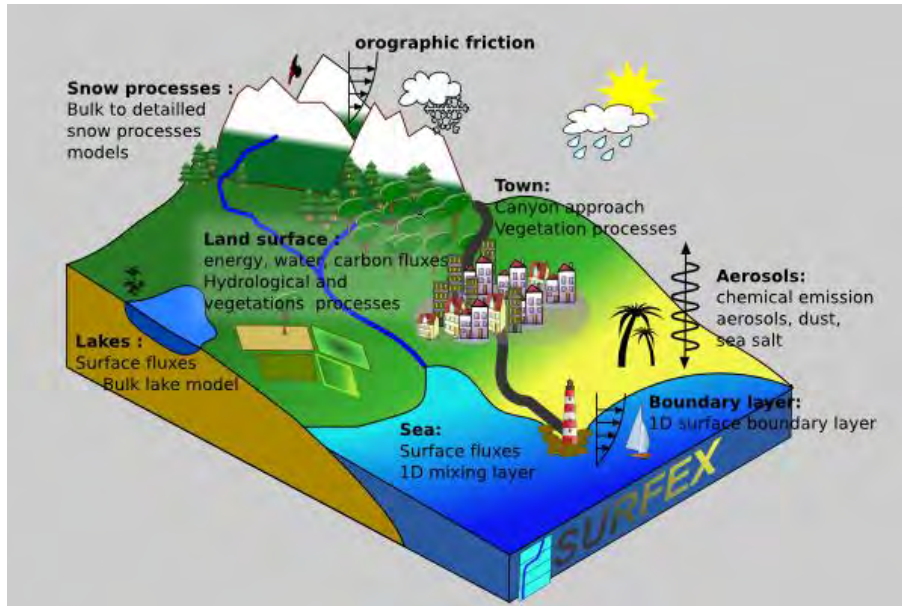


Figure II.1 SURFEX

ISBA (Noilhan et Planton, 1989 et Mahfouf et al., 1996) est donc le modèle permettant de simuler les échanges de masse et d'énergie dans le système sol-végétation-atmosphère du « tile » nature. La première version d'ISBA que l'on appellera ISBA-standard, est un modèle de type « bucket » (Manabe, 1969), amélioré afin de représenter l'humidité superficielle du sol et l'évaporation à la surface du sol grâce à la méthode « force-restore » (voir section 1.1). Dans cette configuration, le sol est configuré en deux couches, une couche superficielle présentant une épaisseur d'un centimètre et une couche profonde incluant la zone racinaire. L'épaisseur d_2 de cette dernière varie selon le type de sol et le type de végétation. Les températures de surface et profonde du sol, T_g et T_2 , sont simulées, ainsi que les contenus en eau volumique de surface et profond w_g et w_2 . Dans cette version initiale, la végétation y est décrite comme une couche homogène et la surface caractérisée par 8 paramètres : la profondeur racinaire d_2 , la résistance stomatique minimale RS_{min} et la contribution de la végétation au coefficient d'inertie thermique de la surface C_v , qui sont constants dans le temps, puis la proportion de végétation veg , le LAI , la longueur de rugosité z_0 , l'albédo α et l'émissivité ε qui dépendent du cycle saisonnier. La résistance stomatique RS , c'est-à-dire la régulation des échanges de gaz (CO_2 et vapeur d'eau) entre la feuille et son environnement, est calculée selon le formalisme de Jarvis (1976). Elle rend compte de l'impact de facteurs environnementaux (eau du sol, humidité de l'air, rayonnement solaire et température de l'air) sur l'ouverture des stomates et donc sur la photosynthèse. Un coefficient permet de représenter l'effet de l'assèchement du sol, d'un stress hydrique, sur le comportement de la végétation. Ce coefficient varie de 0 à 1 selon les conditions d'humidité de la zone racinaire, allant du point de flétrissement à la capacité au champ. L'évolution de ce coefficient au cours du temps dépend de la réserve utile du sol.

Cette version de base a été enrichie avec de nouvelles options et de modules permettant de simuler de façon plus détaillée les transferts d'eau et de chaleur à la surface. A la représentation en deux couches (« 2L ») du sol dans la version « force-restore » a été ajoutée une troisième couche pour créer ISBA-3L (Boone et al., 1999). Une version multi-couches plus complexe, permettant de représenter les processus de diffusion de l'eau et de la chaleur dans le sol a été élaborée en parallèle (Boone et al., 2000). L'hydrologie de surface a été améliorée grâce à la prise en compte de l'hétérogénéité sous maille des précipitations (Decharme et Douville, 2006a) et de processus sous maille comme le drainage et le ruissellement (Habets et al., 1999b, Etchevers et al., 2001).

1.2.2 ISBA-A-g_s

Le modèle ISBA-A-g_s (Calvet et al., 1998) basé sur le modèle ISBA-standard, a été développé pour évaluer les impacts du changement climatique sur la végétation tout en prenant en compte l'effet induit par l'augmentation de la concentration en CO₂ dans l'atmosphère sur la végétation (Figure II.2). Capable de simuler la biomasse et le LAI (qui n'est plus considéré comme un paramètre du modèle mais comme une variable pronostique), il permet de représenter le comportement de la végétation face à un stress hydrique, à une augmentation de la température et de la concentration en CO₂, et ainsi de répondre aux problématiques qui en découlent à l'échelle de la parcelle (Rivalland et al., 2005, Gibelin et al., 2008, Garrigues et al. 2015), à l'échelle régionale (Brut et al., 2009, Calvet et al., 2012, Lafont et al., 2012, Canal et al., 2014) et à l'échelle globale (Gibelin et al., 2008).

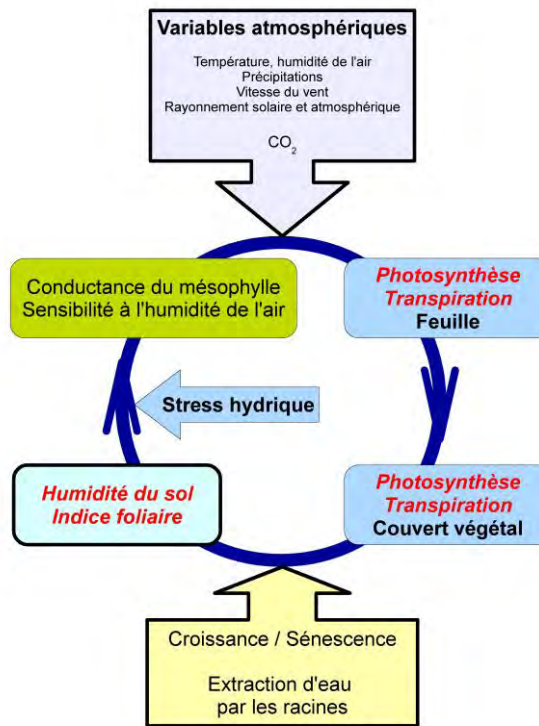


Figure II.2 ISBA-A-g_s

Le modèle utilisé pour décrire les processus de la photosynthèse est le modèle de Jacobs et al. (1996) qui s'est basé sur l'approche de Goudriaan et al. (1985). Celui-ci permet de calculer la conductance de la canopée à partir du taux d'assimilation nette carbonée par la végétation dont les trois facteurs limitants essentiels sont :

- la concentration atmosphérique en CO₂ ;
- la température ;
- le rayonnement photosynthétiquement actif (acronyme « PAR » en anglais) ;
- l'humidité de l'air.

Cette paramétrisation est issue d'un ensemble d'équations permettant de prendre en compte le type de végétation, C3 (Farquhar et al., 1980) ou C4 (Collatz et al., 1991). ISBA-A-g_s est capable de relier la conductance stomatique g_s d'un type de végétation à son assimilation nette carbonée par photosynthèse, A_n. Pour le calcul de A_n (en mg CO₂ m⁻² de feuille s⁻¹) et de g_s

(en mm s^{-1}), plusieurs variables calculées par le modèle sont nécessaires telles que la température de la feuille T_s (en $^{\circ}\text{C}$), le contenu en eau du sol.

Ces processus à l'échelle de la feuille (photosynthèse et transpiration) sont extrapolés à l'échelle du couvert grâce à un schéma de transfert radiatif qui permet de prendre en compte l'atténuation du rayonnement global à l'intérieur du couvert (Calvet et al., 1998 et Carrer et al., 2013). Ainsi l'assimilation nette carbonée et la conductance stomatique à l'échelle du couvert est obtenue en intégrant A_n et g_s calculés à différents niveaux à l'intérieur du couvert végétal.

L'assimilation nette carbonée par la plante lors de la photosynthèse est alors convertie en surface foliaire par un modèle simple de croissance de la végétation (Calvet et Soussana, 2001). Celui-ci associe deux mécanismes liés à la croissance de la biomasse et à la sénescence. La croissance de la biomasse active (en kg C m^{-2}), c'est-à-dire la biomasse étant capable de réaliser la photosynthèse, correspond à l'assimilation nette du couvert en CO_2 (en $\text{kg CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) à chaque pas de temps. Cette biomasse active ou biomasse aérienne décroît par mortalité sous l'effet d'un déficit de photosynthèse causé par un déficit de rayonnement, le stress hydrique, ou des températures excessivement basses ou élevées. Le calcul interactif de l'indice foliaire est ensuite effectué selon l'hypothèse d'un rapport constant entre le LAI et la biomasse foliaire, appelé SLA (Specific Leaf Area), qui dépend du type de végétation. L'option de ISBA-A- g_s utilisée dans ce travail de recherche est l'option « NIT » (Calvet et al., 2000, Calvet et al., 2004, Gibelin et al., 2006). Celle-ci permet de simuler la dépendance du SLA à la teneur massique en azote foliaire et à la concentration en CO_2 (Calvet et al., 2008). L'effet sur la mortalité de la diminution de la concentration en azote de la plante au fur et à mesure de la croissance de la biomasse aérienne, est paramétré à partir du modèle de dilution de l'azote de Lemaire et Gastal (1997). Dans la littérature, la concentration en azote foliaire et le SLA sont utilisés afin de déterminer des paramètres de plasticité (Schulze et al., 1994, Reich et al., 1999 et Rivalland et al., 2003). Ainsi, le SLA dépend aussi de paramètres de plasticité fixés par type de végétation. Un paramètre important permet d'initier ce calcul interactif du LAI lorsque les conditions atmosphériques permettent à la plante de réaliser la photosynthèse : le LAI minimum (LAI_{\min}). Celui-ci permet à la plante d'assimiler de nouveau du carbone en sortie d'hiver. Les valeurs de ce paramètre définies à l'échelle globale, ont été fixées à $0.3 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ pour les cultures et prairies en C3 et C4 et les arbres à feuilles caduques, et à $1 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ pour les arbres à feuilles persistantes. Ces valeurs de LAI_{\min} arbitrairement choisies permettent cependant de représenter une possible variabilité interannuelle des valeurs minimales du LAI simulé par le modèle (Gibelin et al., 2006).

ISBA-A- g_s permet de reproduire la croissance de la végétation dans des conditions en eau limitée grâce à une paramétrisation du stress hydrique qui affecte des paramètres clés de la photosynthèse dans le modèle. C'est l'humidité du sol dont l'estimation prend en compte les propriétés physiques du sol (la proportion d'argile et de sable, le point de flétrissement, la capacité au champ et la quantité d'eau à saturation) qui va contrôler la réponse de la végétation à un assèchement du sol (fonction stress d'ISBA-standard). Au regard de nombreuses observations sur le terrain associées à des analyses de la littérature et ce, pour différents types de végétation, des paramètres de la photosynthèse ont pu être retrouvés par une méthode de modélisation inverse dans différentes conditions de stress hydrique (Calvet et al., 2000). Deux paramètres du modèle de photosynthèse se sont montrés particulièrement sensibles à la fonction de stress hydrique : la conductance mésophyllienne g_m qui décrit les processus physiques et chimiques complexes intervenant lors de la diffusion de l'eau et du CO_2 au sein de la feuille et le déficit maximum de saturation en vapeur d'eau entre la feuille et l'air toléré par la plante D_{\max} . Ainsi, selon la façon dont la fonction stress affecte g_m et D_{\max} , deux types de comportements face à un stress hydrique ont pu être déterminés (Calvet., 2000 pour les couverts herbacés) :

- une stratégie « de tolérance » face à la sécheresse : le WUE reste à peu près constant dans les premières étapes du stress hydrique ;
- une stratégie « d'évitement » face à la sécheresse : le WUE augmente en réponse au stress, la transpiration de la plante diminue, la plante limite ses pertes en eau en fermant ses stomates.

Les cultures en C3 représentatives des céréales à paille simulées par ISBA-A-gs présentent une stratégie d'évitement tandis que les prairies présentent une stratégie de tolérance face à un stress hydrique (Calvet et al., 2012).

2. Initialisation des modèles : occupation des sols

Les interactions entre les surfaces continentales et l'atmosphère décrites dans le chapitre I sont nombreuses. Le climat agit sur la formation des paysages et sur l'occupation du sol (ou « Land cover »). Inversement, l'occupation du sol agit sur le climat par des phénomènes de rétroactions qu'il faut prendre en compte dans les modèles climatiques. Ces processus agissent aussi sur l'évolution des ressources en eau et sur diverses composantes de l'économie, en particulier l'agriculture. Des informations précises sur l'occupation des sols sont primordiales pour le développement et la mise en œuvre des modèles génériques afin de d'obtenir une meilleure représentation des flux sur une surface terrestre hétérogène. L'occupation des sols est considéré comme une variable climatique essentielle (« Essential Climate Variable », ECV) au même titre que le LAI, l'humidité du sol, ou la température de l'air (Pereira et al., 2013 ; Bojinski et al. 2014 ; Constable et al., 2016). Plusieurs outils ont donc été développés afin de constituer des bases de données les plus précises possibles à différents degrés de résolution. L'essor des données satellitaires depuis ces trente dernières années a permis de les affiner.

2.1 Définitions et principe

Les cartes d'occupation des sols sont des inventaires des surfaces terrestres. Elles décrivent donc physiquement la surface terrestre et sont souvent liées à la notion d'« utilisation des sols ». L'utilisation des sols traduit l'usage anthropique des sols et donne une description socioéconomique de la surface.

Il n'existe pas de topologie universelle pour l'occupation du sol. Souvent, les études de cas sont amenées à développer leur propre typologie, spécifique à la région et au climat considérés. La description de l'occupation du sol est donc susceptible de varier fortement, en regard de la diversité des surfaces et des climats à la surface de la Terre. On distingue divers types de surfaces :

- Les surfaces de végétation (forêts tempérées ou tropicales (type d'arbre), cultures (blé, maïs, colza, etc.), prairies, savanes, steppes, etc.) ;
- Les surfaces de sol nu ;
- Les surfaces urbanisées ;
- Les eaux de surface (océans, rivières, lacs) et les surfaces enneigées (neige et glaciers).

Chaque catégorie est bien sûr plus ou moins discrétisée en sous catégories en fonction du lieu, de la qualité et de la résolution de l'information dont on dispose.

Ces cartes ou bases de données ont été développées afin de répondre à trois grands objectifs (rapport GCOS T9: ECV - Land Cover, 2009) :

- évaluer et caractériser les dynamiques des changements de l'occupation du sol ;
- évaluer et caractériser les impacts socioéconomiques et environnementaux des changements de l'occupation du sol ;
- et enfin intégrer ces analyses dans le but d'améliorer la modélisation des surfaces continentales pour la préservation des paysages (reforestation, désertification, etc.) et l'évaluation des ressources naturelles (eaux, surfaces agricoles, etc.) selon les différents scénarios de changement climatique.

La construction d'une carte de l'occupation des sols est de plus en plus basée sur des données issues de la télédétection satellitaire. La couverture spatiale et temporelle que présentent ces données permet d'accéder à des résolutions de plus en plus fines. C'est un atout considérable dans l'élaboration de ces cartes.

L'analyse des images satellitaires permet de déterminer le type d'occupation du sol par traitement du signal spectral (Anderson et al., 1976 ; Friedl et Brodley, 1996). Ce traitement est automatisé selon des méthodes de classification. Ces méthodes comportent trois étapes fondamentales. Des classes de signatures spectrales sont établies dans un premier temps. Les pixels sont ensuite regroupés selon les classes spectrales définies auparavant. Enfin, on procède à une vérification de la classification, c'est-à-dire que l'on évalue la cohérence et la fiabilité des classes choisies. Ces méthodes peuvent être :

- Supervisées, c'est-à-dire que des zones dont l'occupation des sols est connue sont utilisées pour la détermination des différentes classes et sont utilisées comme des zones d'entraînement de l'algorithme ;
- Non supervisées, c'est-à-dire que des groupes sont formés par l'algorithme selon la similarité des pixels de l'image. Le type d'occupation des sols est ensuite attribué à chaque groupe.

La fiabilité des cartes ainsi construites réside dans la résolution des capteurs et de l'hétérogénéité spatiale de la surface terrestre.

En Europe, la base de données CORINE land cover, aux Etats Unis la carte d'occupation des sols de l'USGS (« United States Geological Survey »), à l'échelle globale « Global Land Cover SHARE » (GLC-SHARE) développée par la FAO en 2014, dont les définitions des différentes catégories ont été harmonisées à l'échelle internationale, ne sont que quelques exemples parmi les bases de données existantes en ce qui concerne la description des surfaces terrestres.

Pour ce travail de thèse, deux cartes d'occupations des sols à l'échelle mondiale, ECOCLIMAP à 1 km de résolution (Masson et al., 2003 ; Faroux et al., 2013) et ESA-CCI Land Cover à 300 m de résolution (Holmann et al., 2012 ; Bontemps et al., 2013), ont été utilisées afin de déterminer les zones les plus homogènes de couverts de cultures de céréales à pailles et de prairies.

2.2 ECOCLIMAP

La base de données ECOCLIMAP-I a été développée par le CNRM. Elle regroupe à l'échelle mondiale les valeurs des paramètres du modèle ISBA pour différentes catégories d'occupation du sol à une résolution de 1 km. ECOCLIMAP permet d'initialiser le modèle ISBA dans la plateforme de modélisation SURFEX. SURFEX est utilisé dans les modèles atmosphériques et hydrologiques de Météo-France. Ces paramètres clefs de la surface terrestre tels que la fraction de végétation, le LAI, l'albédo, la profondeur de sol ou la résistance stomatique présentent des valeurs spécifiques à chaque type de surface présent dans le « tile » nature. Ce dernier comprend trois types de surface sans végétation (sol nu, roche, neige permanente) et neuf type de végétation (feuillus, conifères, arbres à feuillages persistants, cultures en C3, cultures en C4, cultures irriguées, prairies tempérées, prairies tropicales, zones humides). La carte d'occupation des sols est basée sur la carte CORINE land cover établie à partir d'observations satellitaires acquises de 1999 à 2005 pour la zone européenne, et sur les données NOAA/AVHRR de l'année 1993 pour les zones en dehors de l'Europe. En combinant cette carte avec une carte éco-climatique qui permet de différencier des types de végétation au sein d'une même catégorie suivant leur position géographique (par exemple toundra et savane), 215 catégories d'écosystèmes ont été cataloguées. Elles permettent de spatialiser les paramètres primaires que sont le LAI, l'épaisseur du sol ou la hauteur des arbres. Les paramètres secondaires tels que les paramètres de la photosynthèse sont associés aux types de végétation. Cette base de données a été mise à jour pour la zone européenne avec 250 écosystèmes supplémentaires représentés (Faroux et al., 2013). Une nouvelle version d'ECOCLIMAP, comprenant davantage de types de végétation et privilégiant l'utilisation de cartes de paramètres (sans passer par les catégories d'écosystèmes) est en cours de développement.

2.3 ESA-CCI Land cover

Dans le cadre du projet « Climate Change Initiative » de l'agence spatiale européenne (ESA), trois cartes d'occupation des sols correspondant à des périodes différentes ont été développées dans le cadre du projet ESA-CCI Land Cover (ESA-CCI LC). Ces cartes proposent une description de la surface terrestre en 22 classes incluant les cultures (irriguées ou pluviales), les prairies, la végétation basse naturelle (savanes, steppes, couverts mélangés), les forêts, les zones humides, les zones artificialisées, les eaux de surfaces et les glaciers et neiges permanentes. La résolution spatiale est fine : 300 m de résolution. Les cartes couvrent les périodes 1998-2002, 2003-2007 et 2008-2012. Les images issues de MERIS, SPOT-VEGETATION, PROBA-V et AVHRR ont été utilisées.

3. Land Data Assimilation System

3.1 Etat de l'art

Les modèles de surfaces continentales de type SVAT sont devenus des outils puissants, largement utilisés dans le but d'obtenir des informations sur la variabilité saisonnière et interannuelle des flux de surface et de la végétation. Utilisés en mode « offline », c'est-à-dire forcés par des observations ou des analyses atmosphériques, ils permettent de suivre l'évolution des différents flux de surface dans un contexte de changement climatique. Notre compréhension des interactions sol-végétation-atmosphère repose donc sur la paramétrisation des processus biophysiques représentés dans ces modèles. Les erreurs inhérentes aux sorties des modèles sont clairement identifiées par les utilisateurs (Walker et al., 2003; De Lanoy et al., 2007 ; Jarlan et al., 2008; Lafont et al., 2012 ; Garrigues et al., 2015). Elles peuvent être liées :

- aux incertitudes des forçages atmosphériques ;
- à l'absence de représentation de certains processus biophysiques dans la paramétrisation du modèle ;
- au nombre et à l'estimation des paramètres du modèle ;
- à l'initialisation des variables d'état du modèle.

Ce dernier point est très important car certaines variables clefs comme l'humidité du sol et le LAI conditionnent fortement la capacité de photosynthèse de la végétation ainsi que la répartition du bilan d'eau et d'énergie à la surface par le biais de l'évapotranspiration (Shukla and Mintz, 1982). Ces variables biophysiques doivent donc être correctement initialisées ou contraintes au sein des modèles (Koster et Milly, 1996 ; Rodell et al., 2005 ; Koster et al., 2009).

L'intégration de données satellitaires dans les modèles peut constituer une réponse à la réduction des erreurs des modèles. En particulier, elle peut jouer un rôle dans l'estimation des paramètres du modèle ayant un impact sur la représentation des processus biophysiques à l'interface sol-végétation-atmosphère ainsi que dans l'initialisation des variables clefs.

Les données d'observations issues de la télédétection sont aujourd'hui disponibles à l'échelle mondiale et pour des résolutions de plus en plus fines, représentent une ressource inestimable pour améliorer ces modèles (Ichii et al., 2009 ; Ghilain et al., 2012 ; Kowalik et al., 2009; Ferrant et al., 2014; Szczypta et al.,2012 ; Szczypta et al.,2014). Les efforts de la communauté scientifique ont porté sur la façon d'intégrer ces observations satellitaires (ou in situ) au sein des modèles de surface. Combiner de manière optimale des sorties modèles et des observations satellitaires dans le but d'obtenir une analyse est appelé « assimilation ».

Des méthodes d'assimilation de données d'observation ont été développées afin de répondre aux problématiques inhérentes à la paramétrisation (nombre de paramètres nécessitant un calage, prise en compte de processus physiques et biologiques, etc.). Dans un premier temps, une méthode simple de modélisation inverse permet d'intégrer d'une certaine façon des observations satellitaires dans les modèles de surfaces continentales. Elle consiste à utiliser les observations dans une démarche de calage d'un ou plusieurs paramètres du modèle. Des variables biogéophysiques d'intérêt, telles que les flux de CO₂, l'humidité du sol ou le LAI, simulées par le modèle selon différentes valeurs de paramètres, sont comparées aux observations. Une fonction coût détermine ensuite la valeur optimale des paramètres permettant aux variables simulées par le modèle de reproduire le plus précisément possible les observations (Williams et al. 2009, Canal et al., 2014).

D'autres approches basées sur des méthodes statistiques permettent d'améliorer l'initialisation des modèles SVAT et d'optimiser la trajectoire des variables d'intérêt simulées par le modèle lorsqu'une observation est disponible. Parmi celles-ci, l'interpolation optimale (Mahfouf et al., 1999), les méthodes d'assimilations variationnelles (Bouyssel et al., 1999) et les filtres de Kalman, d'ensemble (Reichle et al., 2002) ou étendu (Mahfouf et al., 2009, Drush et al., 2009) ont été adaptés aux surfaces continentales. Ces méthodes sont largement utilisées dans des procédures d'optimisation de paramètres clefs intervenant dans la photosynthèse, la respiration, la phénologie, le bilan hydrique du sol et le bilan d'énergie. C'est le cas pour Kuppel et al. (2012 et 2013) qui utilise le modèle ORCHIDEE et une méthode d'assimilation variationnelle, le Carbon Cycle Data Assimilation System (CCDAS) afin d'optimiser 21 paramètres pour des forêts de feuillus. Dans ces études, les données d'observation ne sont pas issues de la télédétection mais sont des mesures par Eddy-Covariance de flux de CO₂ issue de 12 sites de la campagne de mesures FLUXNET

(Baldocchi et al. , 2001, 2008). L'optimisation des paramètres a été effectuée pour chaque site individuellement, c'est-à-dire que chaque site présente un jeu de paramètres optimisés, ainsi que pour l'ensemble des 12 sites, c'est-à-dire un même jeu de paramètres optimisés pour les douze sites. L'optimisation des paramètres sur l'ensemble des sites a permis d'améliorer la représentation de la respiration de l'écosystème du modèle ORCHIDEE. Une validation par des observations indépendantes de celles utilisées dans le processus d'assimilation a permis de montrer une amélioration de la représentation du cycle du LAI simulé en accord avec des observations satellitaire de NDVI.

D'autres travaux ont été menés de manière à assimiler des produits satellitaires de la végétation comme le LAI et l'humidité du sol (Sabater et al., 2006 ; Jarlan et al. 2007 ; Albergel et al., 2010). La représentation de l'évolution de l'humidité du sol au sein des modèles est complexe. En effet, les données satellitaires d'humidité du sol ne concernent que l'humidité de surface (les premiers cm près de la surface). Hors, comme on l'a vu précédemment, une estimation de l'humidité du sol sur la totalité de la zone racinaire est primordiale pour le suivi de la végétation et du cycle hydrologique et il n'existe pas d'observation spatialisée de cette variable. Une description du sol incluant une fine couche de surface interagissant avec l'atmosphère et le sol sous-jacent où les racines se développent est donc nécessaire. De nombreuses études ont cependant permis de retrouver le contenu en eau de la zone racinaire à partir de l'humidité de surface par assimilation (Entekhabi et al., 1994, Houser et al., 1998, Walker et al., 2001). Ces algorithmes sont basés sur l'assimilation de données d'humidité superficielle dans les modèles de surface (Ragab, 1995; Walker, 2001; Sabater et al., 2007, 2008). L'assimilation conjointe de l'humidité de surface et du LAI a montré une amélioration de la représentation des flux de surface et a permis de réduire l'impact des incertitudes inhérentes aux forçages (Albergel et al., 2010 ; Barbu et al. , 2011 ; Barbu et al. , 2014 ; Fairbairn et al. , 2015). L'apport de l'assimilation de variables de la végétation comme le LAI dans l'amélioration de la représentation des processus hydrologiques et des flux de carbone a lui aussi été démontré (Gu et al., 2006 ; Jarlan et al., 2009).

3.2 LDAS – ISBA-A-gs

Le Land Data Assimilation System (LDAS) développé au CNRM permet d'intégrer des observations satellitaires dans le modèle ISBA-A-gs décrit précédemment. C'est aujourd'hui le seul système d'assimilation permettant d'assimiler de façon séquentielle des produits satellitaires décrivant la végétation, comme le LAI. L'algorithme de ce système d'assimilation de données permet de corriger de manière optimale la trajectoire du modèle ISBA à chaque fois qu'une observation est disponible. En effet, contrairement aux approches classiquement utilisées dans les modèles de culture ou les modèles des flux de carbone, la phénologie dans ISBA-A-gs n'est pas contrainte par des sous-modèles en degrés-jours. La phénologie est entièrement pilotée par la photosynthèse. Cette dernière répond directement ou indirectement à toutes les variables atmosphériques (et pas seulement la température de l'air comme dans les modèles en degrés-jours), ainsi qu'à l'humidité du sol et à la densité du couvert végétal. De ce fait, la LAI est très flexible et peut être analysé à un instant donné : les observations de LAI peuvent être intégrées dans ISBA-A-gs au fil de l'eau.

ISBA-A-gs a l'avantage de posséder peu de paramètres, en utilisant un algorithme d'assimilation séquentielle : le filtre de Kalman étendu simplifié (Barbu et al., 2011, 2014). Ainsi, des sorties modèles de ISBA et des observations satellitaires telles que le LAI et l'humidité de surface sont combinées de manière optimale afin de fournir une analyse, c'est-à-dire la trajectoire corrigée du LAI et de l'humidité du sol simulés. Des statistiques sont générées par le LDAS afin de pouvoir juger de la qualité de l'assimilation. L'incrément d'analyse, c'est-à-dire la différence entre l'analyse et la prévision du modèle et dont l'unité

correspond à la variable assimilée, permet donc de juger de la performance du modèle. Ainsi, lorsqu'une observation est disponible, l'algorithme d'assimilation va corriger la trajectoire du modèle de façon optimale au regard de cette observation. Plus l'incrément sera grand, plus le modèle s'éloigne de l'observation et inversement, plus l'incrément sera faible, plus le modèle se rapproche de l'observation. Une meilleure représentation du cycle du LAI et donc une meilleure représentation de la phénologie, de l'humidité de surface ainsi que la représentation des flux de surface dans ISBA a été observée (Albergel et al., 2010 ; Barbu et al. , 2011 ; Barbu et al. , 2014 ; Fairbairn et al. , 2015).

Dans ce travail de recherche, l'assimilation du LAI satellitaire seule sera réalisée afin d'optimiser des paramètres clefs de la végétation dont la réserve utile des plantes pour des couverts de céréales à paille. Ces résultats seront comparés avec les résultats d'une optimisation de la réserve utile par le modèle ISBA-A-gs seul.

4. Bilan du Chapitre II

Ce chapitre expose les bases de la modélisation des surfaces continentales, les enjeux et les limites liés à leur développement et à leur utilisation.

- Les interactions au sein du système sol-plante-atmosphère sont nombreuses et complexes impliquant des processus biophysiques et des rétroactions à différentes échelles spatiales et temporelles. L'évaluation et le suivi des impacts du changement climatique à l'échelle globale sur les différentes composantes intervenant dans le cycle hydrologique, le bilan d'énergie et l'évolution de la végétation est un enjeu majeur pour la communauté scientifique aujourd'hui.
- Les modèles de surfaces continentales offrent des perspectives de réponse à cette problématique en permettant de représenter les flux de surface et les processus biophysiques par des paramétrisations plus ou moins complexes.
- Ces modèles présentent des limites clairement identifiées. Les efforts de recherche se sont donc concentrés sur ces pistes d'amélioration des modèles telles que :
 - Une meilleure prise en compte de l'hétérogénéité de la surface terrestre et donc une meilleure représentation de l'occupation des sols est nécessaire. Les propriétés de la surface terrestre varient selon le type d'occupation du sol et influencent différemment les flux de surface.
 - Une description détaillée des processus biophysiques au sein des modèles entraîne une multiplication de paramètres impliquant des incertitudes et nécessitant un calage. Des modèles présentant peu de paramètres tels qu'ISBA-A-gs représentent donc un atout majeur limitant les incertitudes liés à la paramétrisation du modèle.
- Le développement de système d'assimilation de données satellitaires présentant une large couverture spatiale et temporelle a considérablement amélioré la représentation des flux de surface. Ces algorithmes d'assimilation permettant de combiner de manière optimale des sorties modèles et des

observations afin de fournir une analyse, ont montré leur potentiel d'utilisation dans le cadre d'une optimisation des paramètres du modèles. Ils permettent aussi d'initialiser correctement les variables dont l'observation est assimilée, réduisant ainsi les erreurs de modélisation.

CHAPITRE III. Cartographie des surfaces homogènes de cultures de céréales à paille et de prairies à l'échelle mondiale

1. Introduction

Les résultats présentés dans le chapitre 4 concernent la restitution de la réserve utile des zones homogènes de cultures de céréales à paille pluviales. Pour ces cultures pluviales, la variabilité des rendements dépend principalement de la variabilité climatique. La restitution de la réserve utile se fait de manière indirecte à partir d'observations satellitaires d'un indice de surface foliaire (LAI ou Leaf Area Index en anglais). L'intégration de ces observations de LAI dans le modèle ISBA-A-gs permet de proposer plusieurs méthodes pour cartographier la réserve utile pour ce type de couvert. Un travail préalable décrit ici consiste à cartographier les zones homogènes de céréales à paille pluviales. La méthode employée permet également de cartographier les prairies permanentes pluviales. Par ailleurs, les observations satellitaires du LAI sont utilisées pour déterminer le paramètre LAI_{min} du modèle ISBA-A-gs qui est la valeur minimale du LAI, en conditions hivernales. En effet, nous avons vu dans le Chapitre 2 que le LAI_{min} intervient dans l'initiation de la photosynthèse lorsque les conditions atmosphériques y sont favorables en sortie d'hiver. J'ai effectué des tests préliminaires qui ont montré que la valeur de ce paramètre a une influence sur la simulation de la phase de croissance de la plante, en particulier sur la date de son démarrage et sur sa durée. Des incertitudes sur ce paramètre peuvent affecter le réalisme du démarrage de la végétation. C'est particulièrement vrai aux latitudes moyennes pour les céréales à paille.

D'autre part, l'occupation des sols fait partie des ECV (« *Essential Climate Variables* ») définies par le GCOS (« *Global Climate Observation System* »). Une mauvaise estimation du type d'occupation du sol peut avoir un impact considérable dans le calcul des transferts à l'interface sol-végétation-atmosphère au sein des modèles de surface continentale.

La méthode développée dans les chapitres 4 et 5, repose sur l'étape préliminaire décrite ici, consistant à réduire les incertitudes sur le type d'occupation du sol et sur la valeur du LAI_{min} .

Ce chapitre propose, dans une première partie, une inter-comparaison de deux cartes d'occupations des sols. Ceci permet de mettre en évidence des surfaces homogènes pour des types de végétation tels que les cultures de céréales à paille et les prairies permanentes.

Dans la seconde partie de ce Chapitre, les produits satellitaires LAI GEOV1 fournis par le programme européen « Copernicus Land Data Service » sont utilisés afin de cartographier et d'évaluer le paramètre LAI_{min} pour les surfaces « homogènes » de cultures de céréales à paille et de prairies mises en évidence dans la première partie.

2. Cartographie des cultures de céréales à paille et de prairies pluviales à l'échelle mondiale

2.1 Comparaison ECOCLIMAP – ESA-CCI Land cover

Une carte globale des cultures pluviales de céréales à paille, et des prairies a été réalisée, en croisant les cartes d'occupations des sols ESA-CCI LC et ECOCLIMAP. Les surfaces de cultures pluviales et de prairies étant très similaires pour les cartes construites pour la période 2003-2007 (2005), et 2008-2012 (2010), la carte ESA-CCI LC de 2005 a été utilisée seule. Elle correspond à la période d'acquisition des données satellitaires utilisées sur la zone Euro-Méditerranée pour construire la version actuelle d'ECOCLIMAP (Faroux et al., 2013).

Dans ECOCLIMAP, les classes de cultures et de prairies sont discrétisées en quatre sous catégories : les cultures en C3 et les prairies en C3, les cultures en C4 et les prairies en C4. En pratique, les "cultures en C3" correspondent aux céréales à paille, et les "prairies en C3" aux prairies permanentes des latitudes moyennes et hautes. Les cultures en C4 correspondent aux graminées tropicales cultivées, comme le maïs, le sorgho, la canne à sucre, le mil, .. Les prairies en C4 sont essentiellement présentes dans les zones tropicales. Ces quatre types de végétation font appel à des valeurs de paramètres de la photosynthèse qui sont différentes dans le modèle ISBA. En revanche, ESA-CCI LC ne fait pas cette différence entre C3 et C4. Ainsi, seules les cultures pluviales sont différenciées des cultures irriguées, et les prairies forment une unique classe.

Une autre différence majeure entre ces deux cartes est la résolution spatiale. La version d'ECOCLIMAP utilisée ici a une résolution spatiale de 1 km, alors que ESA-CCI LC a une résolution spatiale de 300 m. Grâce à sa résolution spatiale améliorée, ESA-CCI LC m'a permis d'évaluer plus précisément le degré d'hétérogénéité affectant la classification utilisée dans ECOCLIMAP. Il faut cependant garder à l'esprit qu'aucune classification de types de végétation issue de données satellitaire n'est correcte à 100%, et qu'il peut exister des problèmes de définition de la nomenclature. Par exemple, à partir de quelle densité ou de hauteur des arbres peut-on considérer qu'une surface est couverte de forêt plutôt que de prairie ?

L'objectif ici est de mettre en évidence les zones garantissant une certaine homogénéité de cultures et de prairies, relativement à d'autres régions du monde, et de réaliser une carte à 1 km de résolution dont les points de grille sont entièrement homogènes selon la nomenclature ESA-CCI LC. Ces zones représentent de possibles cas d'étude.

Dans un premier temps, j'ai extrait à l'échelle mondiale, tous les points de grille d'ECOCLIMAP qui présentaient plus de 40% de l'une ou l'autre des quatre classes citées précédemment. Ce seuil permet d'obtenir des surfaces de cultures et de prairies (C3 et C4).

Ces quatre masques ainsi formés, j'ai analysé leur correspondance avec ESA-CCI LC. J'ai ensuite utilisé ESA-CCI LC pour sélectionner les points de grille ECOCLIMAP homogènes à 1 km de résolution.

Le masque de cultures en C3 ECOCLIMAP présente une grande variabilité lorsqu'on l'applique aux classes de végétation ESA-CCI LC. Cependant, près de la moitié des points de grille du masque sont occupés par des cultures pluviales selon ESA-CCI LC (Figure III.1). Ceci est cohérent avec le seuil de 40 % utilisé pour sélectionner ces points de grille ECOCLIMAP. L'autre moitié du masque est composée de prairies, de cultures irriguées, de forêt ainsi que d'autres types de végétation selon ESA-CCI LC. Le masque de cultures en C4 est composé majoritairement de cultures pluviales (près de 60%) (Figure III.2). Ces points de grille en commun ont été considérés comme des cultures pluviales de type C4. On observe une plus faible variabilité des classes ESA-CCI LC au sein de la classe cultures en C4 ECOCLIMAP : les prairies représentent 20%, les autres classes se répartissent dans les derniers 20%.

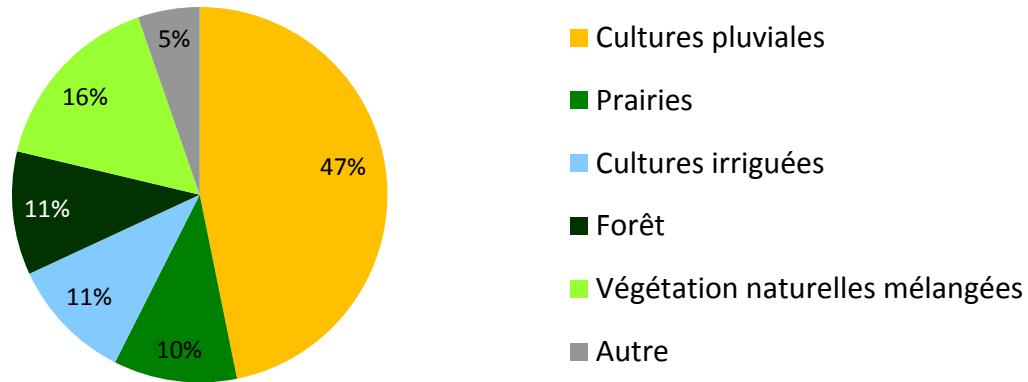


Figure III.1 Composition du type de végétation « cultures en C3 » d'ECOCLIMAP-I d'après ESA-CCI LC

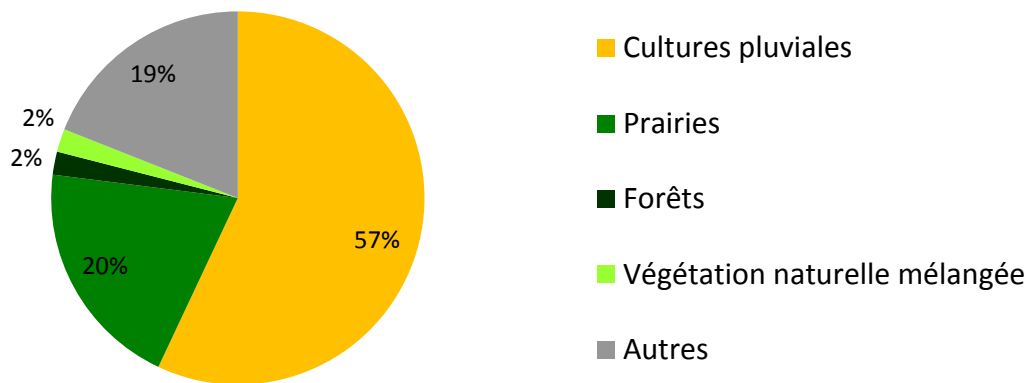


Figure III.2 Composition du type de végétation « cultures en C4 » ECOCLIMAP d'après ESA-CCI LC

Pour les prairies, la correspondance entre les deux classifications est plus difficile à mettre en évidence. Les masques de prairies en C3 et C4 ECOCLIMAP ne sont majoritairement pas considérés comme tels par ESA-CCI LC. En effet, seulement 14% et 11% sont représentés par des prairies selon ESA-CCI pour les catégories C3 et C4 respectivement (Figure III.3 et Figure III.4). Trente % des points de grille constitués de prairies en C3 sont considérés comme étant de la végétation éparses par ESA-CCI LC, 25% des forêts et 10% comme du sol nu. On observe une grande représentation des forêts, des couverts arbustifs ainsi que des cultures pluviales dans le masque des prairies en C4 (plus de 20% pour chacun).

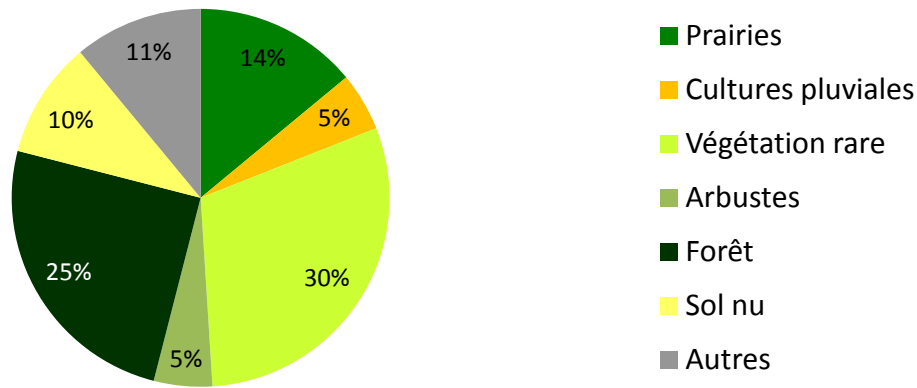


Figure III.3 Composition du type de végétation « Prairies en C3 » d'ECOCLIMAP d'après ESA-CCI LC

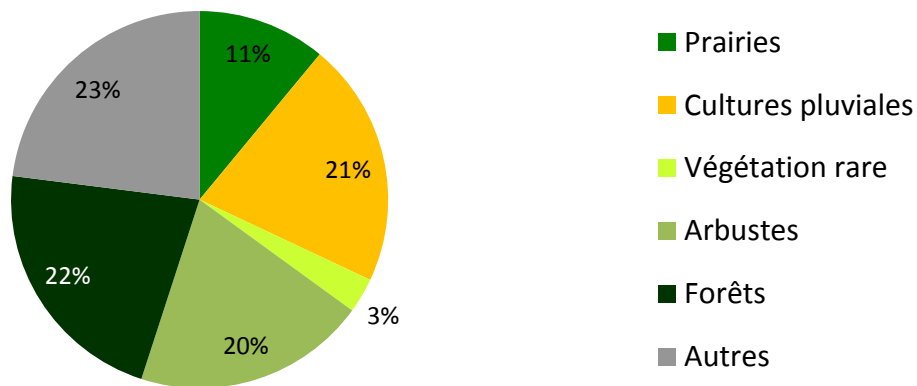


Figure III.4 Composition du type de végétation « prairie en C4 » d'ECOCLIMAP d'après ESA-CCI LC

La comparaison de ces deux cartes d'occupation des sols a permis de mettre en avant l'incertitude qui réside dans la classification des pixels selon les méthodes utilisées (supervisée ou non supervisée), les capteurs utilisés (AVHRR, MERIS, etc.) et la terminologie de la classification utilisée (cultures en C3 ou C4, cultures pluviales, etc.). En croisant les deux informations ECOCLIMAP et ESA-CCI LC, on peut espérer réduire l'incertitude sur le type d'occupation du sol que l'on considère, et obtenir ainsi sur ces points de grille une meilleure représentation par le modèle ISBA des variables géophysiques observées depuis l'espace, comme le LAI.

2.2 Détermination des zones irriguées

Il est primordial dans ce travail de prendre en compte uniquement les zones de cultures pluviales afin que la variabilité interannuelle du LAI soit contrôlée majoritairement par les variations climatiques.

L'agriculture compte pour 70% de la consommation des ressources en eau mondiale (Shiklomanov, 2000). Selon les données de la FAO pour 2005, 18% des zones cultivées sont irriguées (FAO, 2005a ; Siebert et al., 2005). Au vu de l'analyse effectuée en 2.1, les classes de « cultures irriguées » des cartes ECOCLIMAP et ESA-CCI LC sont très disparates, j'ai

décidé d'utiliser à la place la carte développée par la FAO « Global Map of Irrigation Areas » afin de créer un masque de ces zones irriguées.

La première version de cette carte a été réalisée en 1999 (Döll et Siebert, 1999) et a depuis été améliorée de façon continue. Se basant sur des statistiques nationales et régionales, des enquêtes locales et des informations géo-spatiales pouvant être issues de la télédétection, un pourcentage de surface présentant un équipement pour l'irrigation, appelé aussi densité d'irrigation, a été attribué pour chaque pixel de 5 arcs minute (environ 10 km) de résolution à l'échelle globale associé à une estimation de la qualité de l'information. On vérifie aisément que les grandes régions connues d'irrigation sont bien représentées par une forte densité d'irrigation : dans les bassins du Gange et de l'Indus en Inde, les bassins du fleuve Huang He (fleuve Jaune) et du fleuve Yangsté en Chine qui produisent principalement du riz (Figure III.7), le long du Nil en Egypte et au Soudan (principalement de l'agriculture d'élevage, du millet et du sorgho), la plaine du Po (principalement du maïs et du riz), le long du Danube (maïs, blé) (Figure III.5), le bassin du Mississippi-Missouri (principalement du soja) et une partie de la Californie (principalement des fruits et des légumes) (Figure III.6).

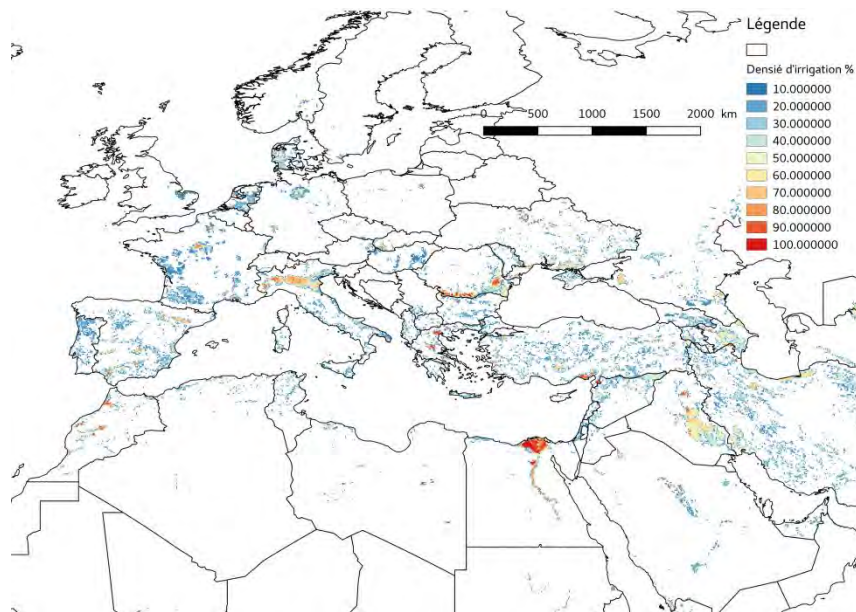


Figure III.5 Irrigation dans la zone Euro-méditerranéenne : les zones les plus intensément irriguées sont la plaine du Po (principalement du maïs), le long du Danube (maïs, blé), le delta du Nil en Egypte.

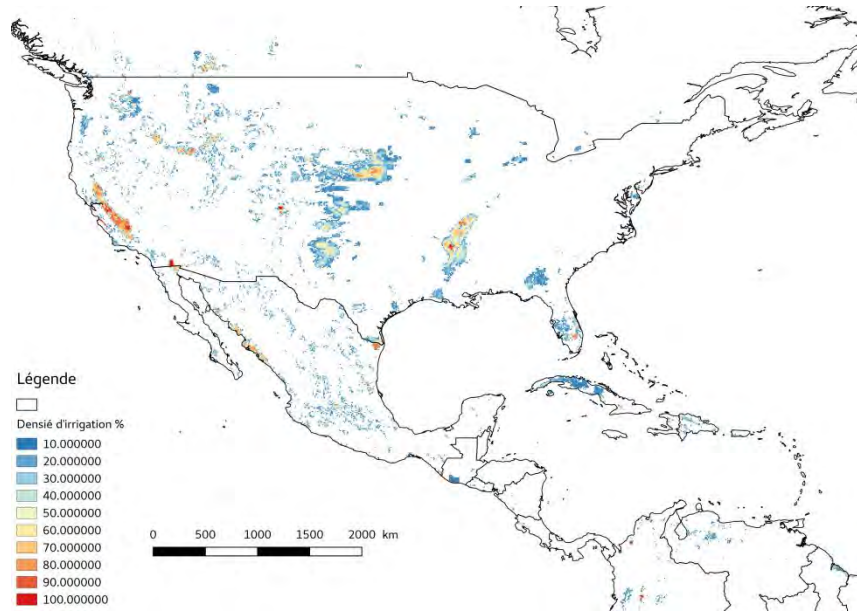


Figure III.6 Irrigation en Amérique du nord : les zones les plus intensément irriguées sont le bassin du Mississippi-Missouri (principalement du soja) et une partie de la Californie (principalement des fruits et des légumes)

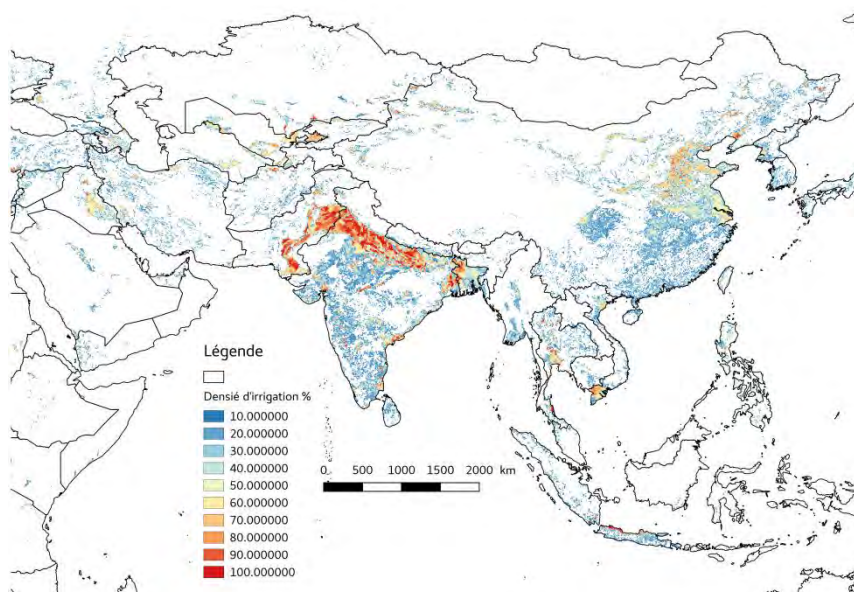


Figure III.7 Irrigation en Asie : les zones les plus intensément irriguées sont les bassins du Gange et de l'Indus en Inde, les bassins du fleuve Huang He (fleuve Jaune) et le fleuve Yangtze en Chine qui produisent principalement du riz.

2.3 Construction des masques de cultures de céréales à paille et de prairies pluviales

Afin de minimiser l'incertitude sur l'occupation du sol et d'identifier les zones les plus homogènes de cultures pluviales de céréales à paille et de prairies permanentes à l'échelle globale, les points de grille communs aux deux cartes ECOCLIMAP et ESA-CCI LC classés comme « cultures en C3 » et « cultures pluviales » respectivement, et « prairies » sont retenus (voir 2.1). Cette nouvelle carte est ensuite confrontée au masque de densité d'irrigation construit en appliquant un seuil de telle sorte que tous les points de grille

présentant un pourcentage de surface équipée pour l'irrigation supérieur à 20% sont considérés comme une surface irriguée. Ainsi, les points de grille communs aux deux cartes sont retirés. Le résultat obtenu est présenté dans la Figure III.8. Une zone homogène de cultures pluviales en C3 est clairement identifiée. Elle s'étend de la façade atlantique européenne au nord-est du Kazakhstan. Elle est particulièrement dense en Ukraine. Cette zone bénéficie d'un climat océanique à l'ouest de l'Europe, caractérisé par des hivers frais et humides et des étés doux, et d'un climat continental à l'est de l'Europe caractérisé par une forte amplitude thermique annuelle (environ 20°C) due à des hivers longs et froids et des étés chauds. Les grandes prairies au centre des Etats-Unis ainsi que les prairies centrales ou steppes d'Asie sont aussi clairement représentées.

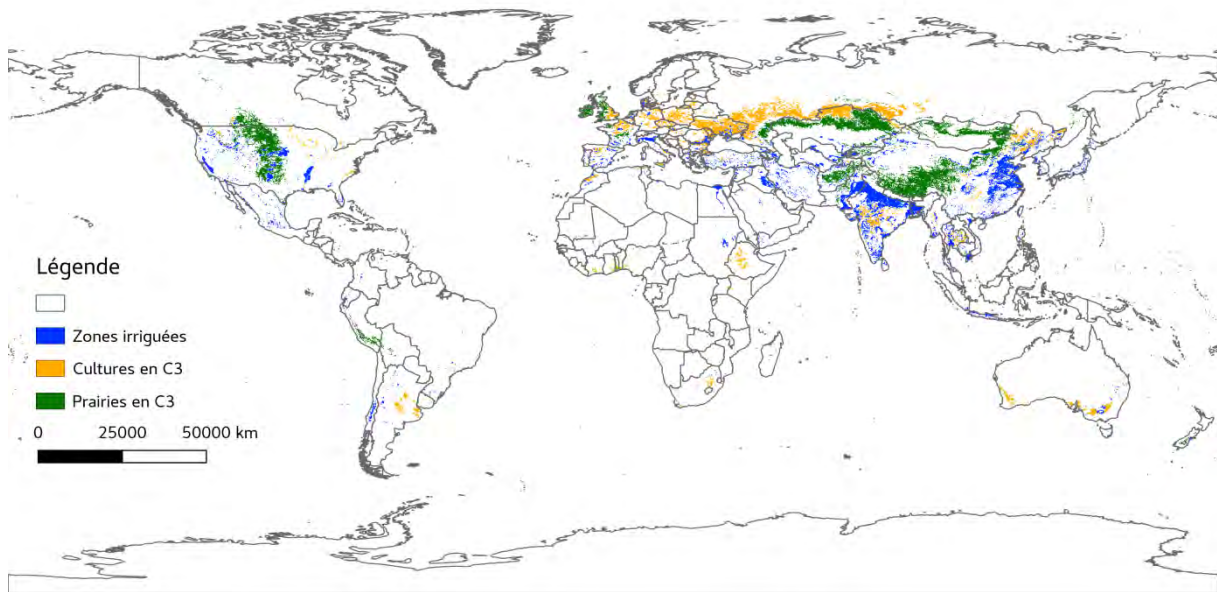


Figure III.8 Carte mondiale des zones homogènes de cultures de céréales à paille et de prairies ainsi que la carte mondiale des zones potentiellement irriguées.

3. Cartographie du paramètre LAI_{min} observé et cohérence avec le modèle ISBA-A-gs

3.1 Cartographie des valeurs moyennes de LAI_{min} observées en Europe

Le masque de cultures pluviales pluviales, créé précédemment, permet de mettre en évidence les principaux pays européens producteurs de céréales que sont: la France, l'Allemagne, la Pologne, le Royaume-Uni, la Roumanie, l'Espagne et l'Ukraine notamment (source FAO). En Europe de l'ouest, le masque des prairies permanentes permet de mettre en évidence les prairies britanniques et les prairies irlandaises dont la superficie représente 75% du territoire irlandais, mais aussi les prairies très présentes dans le centre de la France et en Normandie et enfin les prairies alpines.

L'objectif de cette partie est de cartographier un paramètre, le LAI_{min}, c'est à dire la valeur minimale annuelle moyenne de l'indice foliaire LAI, afin de comparer l'ensemble des valeurs extraites avec les valeurs définies par défaut dans le modèle ISBA.

Les produits satellitaires utilisés dans ce travail sont les produits de LAI GEOV1 et sont fournis par le programme européen « Copernicus Global Land Service ». Ces données sont disponibles tous les dix jours et à une résolution de 1 km × 1 km à l'échelle globale. Elles sont décrites plus précisément dans le Chapitre 4.

Le paramètre LAI_{min} est fixé par défaut à une valeur constante à l'échelle mondiale pour chaque type de végétation. Pour les cultures et les prairies en C3, cette valeur par défaut du LAI_{min} est égale à 0.3. J'ai utilisé le LAI observé pour évaluer cette valeur. Pour ce faire, la moyenne des valeurs minimales annuelles observées de LAI est calculée en chaque point composant le masque de cultures et de prairies en C3 pluviales. La zone étudiée s'étend de l'Europe de l'ouest à l'Europe de l'est. Elle inclut une grande zone homogène de céréales à paille allant de la façade atlantique européenne au nord-est du Kazakhstan. Cette zone a été choisie car elle présente la surface homogène la plus dense de céréales à paille à l'échelle mondiale mais aussi une surface importante de prairies pouvant servir de contrepoint dans l'analyse des résultats. De plus, une importante variabilité de climats est représentée : un climat océanique à l'ouest caractérisé par des hivers frais et humides et des étés doux, un climat méditerranéen caractérisé par des hivers doux et humides et des étés chauds et secs et un climat continental à l'est caractérisé par une grande amplitude thermique avec des hivers plus froids et longs et des étés chauds et plutôt courts.

La carte ainsi que l'histogramme des valeurs de LAI_{min} pour les cultures et les prairies pour cette zone sont présentés dans la Figure III.9.

Les cultures en C3 présentent des valeurs de LAI_{min} relativement homogènes sur toute la zone. La valeur médiane de LAI_{min} est 0.2 m² m⁻² soit une valeur proche de la valeur fixée dans ISBA-A-gs (0.3 m² m⁻²) comme le montre la Figure III.9 b). On observe cependant des valeurs légèrement plus élevées dans le nord-ouest de l'Europe et des valeurs quasi nulles à l'est. Sur la France, les valeurs sont proches de 0.3 m² m⁻².

Les valeurs de LAI_{min} sont plus disparates dans le cas des prairies. En effet, la valeur des LAI_{min} est bien souvent supérieure à 1 m² m⁻² à l'ouest de l'Europe alors que celle-ci est quasiment nulle à l'est. Bien que la médiane des LAI_{min} soit de 0.1 m² m⁻², on observe une distribution clairement bimodale (Figure III.9.c).

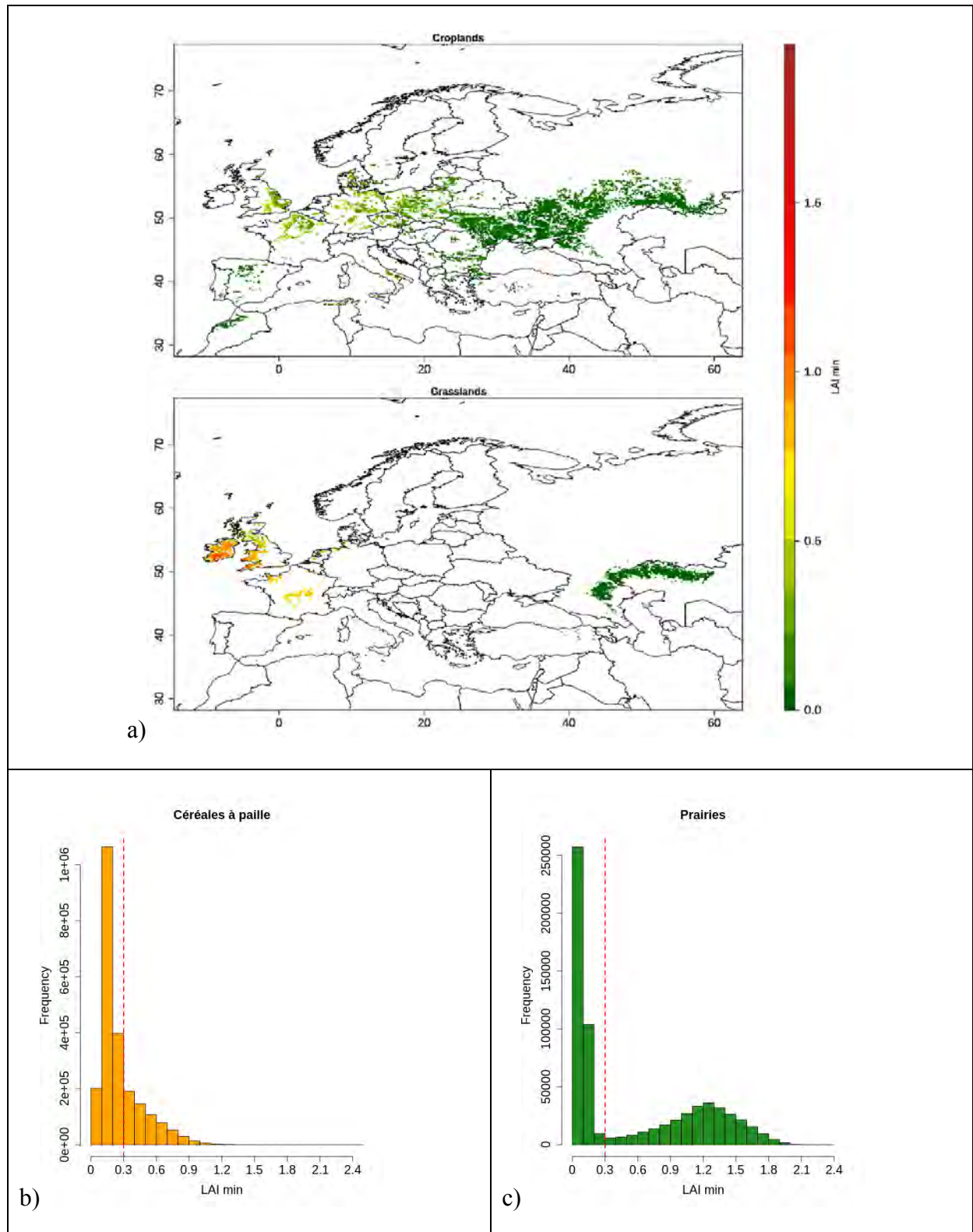


Figure III.9 (a) Carte des LAI_{min} moyennés sur la période 1999-2013 pour les cultures et les prairies en Europe. Histogrammes et valeur par défaut utilisée par ISBA-A-gs (LAI_{min} = 0.3) des valeurs de LAI_{min} pour les (b) cultures et (c) les prairies.

3.2 Zoom sur l'Europe de l'ouest

En Europe de l'ouest, les principales zones de cultures pluviales se situent dans le sud-est du Royaume-Uni, le bassin parisien en France, l'Allemagne et la Pologne. Les prairies permanentes se situent principalement en Irlande, dans le centre de la France et en Normandie (Figure III.10 a). La distribution des valeurs observées de LAI_{min} est proche de la valeur de référence de $0.3 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ d'ISBA-A-gs (Figure III.10 b).

Le climat très humide le long de la côte atlantique Nord et le climat humide et froid des pays alpins ne favorisent pas la culture de céréales à paille à cause de problèmes d'accessibilité des machines aux cultures lorsque les sols deviennent saturés en eau (Brignall et Rounsevell, 1995). Les prairies permanentes dominent dans ces régions qui présentent une grande variabilité de fortes valeurs de LAI_{min} (Figure III.10 c). En Irlande, les valeurs de LAI_{min} sont majoritairement supérieures à $1 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ ce qui est très éloigné de la valeur définie dans le modèle. Le climat humide et les températures relativement douces en hiver permettent de maintenir une valeur minimale de LAI élevée. La valeur par défaut du modèle n'est donc pas appropriée pour les prairies. Comme expliqué précédemment, une valeur trop faible de LAI_{min} fixé dans le modèle peut entraîner une mauvaise simulation de la période de croissance de la végétation. Dans la nouvelle version d'ECOCLIMAP en cours de développement (ECOCLIMAP-SG), le développement de cartes de paramètres, dont le paramètre LAI_{min}, permettra de pallier ce problème. Pour ce travail de thèse, du fait de cette difficulté, et du fait que la version actuelle de SURFEX ne permet pas de gérer les coupes des prairies (ni donc l'évolution du LAI telle qu'elle eut être observée), l'estimation de la réserve utile pour les couverts de prairies n'a pas été tentée.

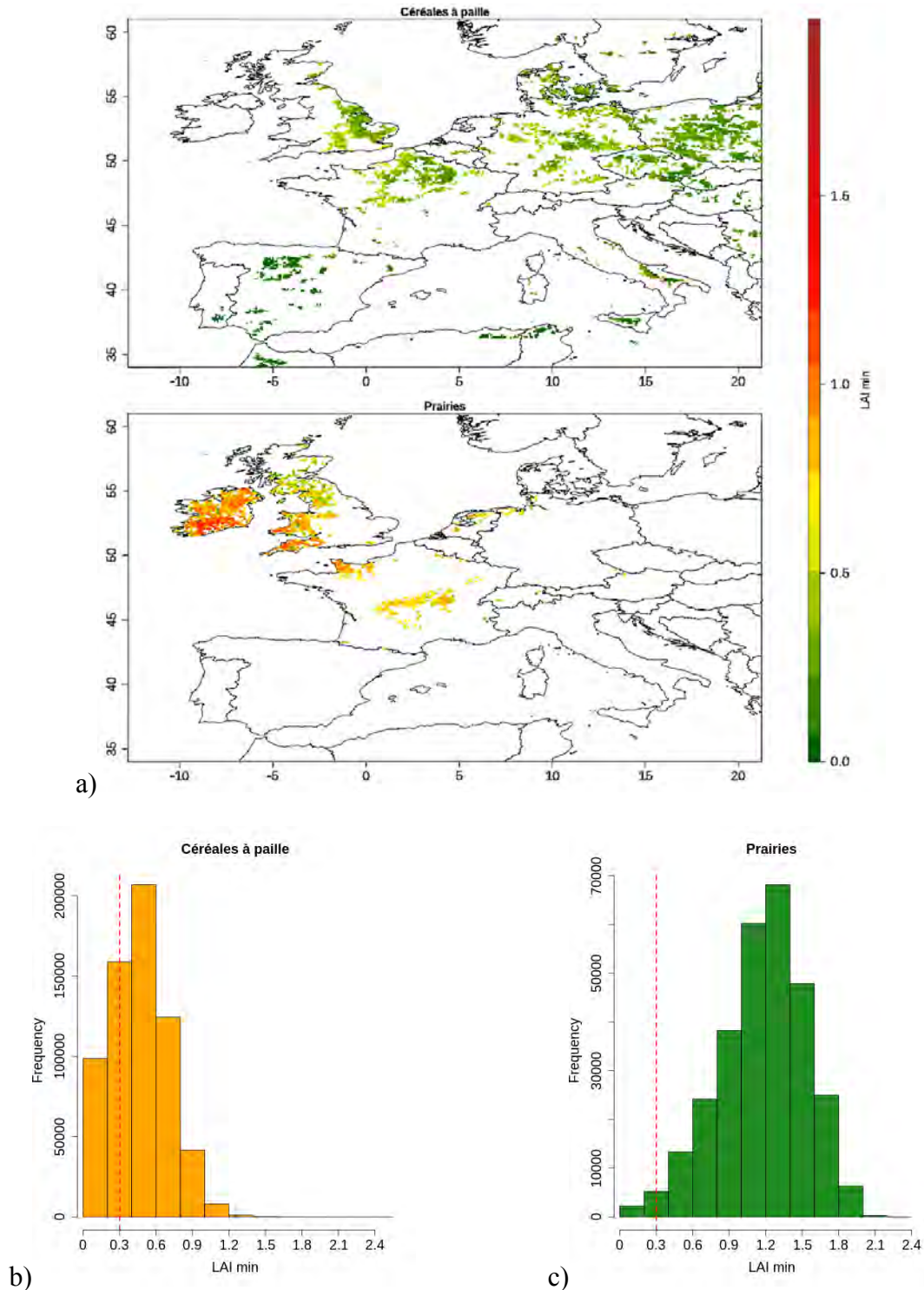


Figure III.10 (a) Carte des LAI_{min} moyennés sur la période 1999-2013 pour les cultures et les prairies en Europe occidentale. b) Histogrammes des valeurs de LAI_{min} et la valeur par défaut utilisée par ISBA-A-gs (LAI_{min} = 0.3) pour (b) les cultures et (c) pour les prairies

3.3 Zoom sur l'Europe de l'est

Une large zone est propice à la culture de céréales à paille qui s'étend de l'Europe Centrale jusqu'à l'Ukraine et la Russie (Rabbinge and van Diepen, 2000) (Figure III.11a). Cette région présente des sols particulièrement fertiles. Les valeurs de LAI_{min} de cette région ne dépassent pas la valeur du modèle ISBA de 0.3 m² m⁻² (Figure III.11). La forte amplitude

annuelle des températures, les conditions plutôt sèches et les hivers froids et longs du climat continental caractérisant cette zone pourraient expliquer ces faibles valeurs. Les conditions de températures ne permettent pas à la végétation de maintenir une valeur minimale de LAI en hiver équivalente à celle observée en Europe occidentale.

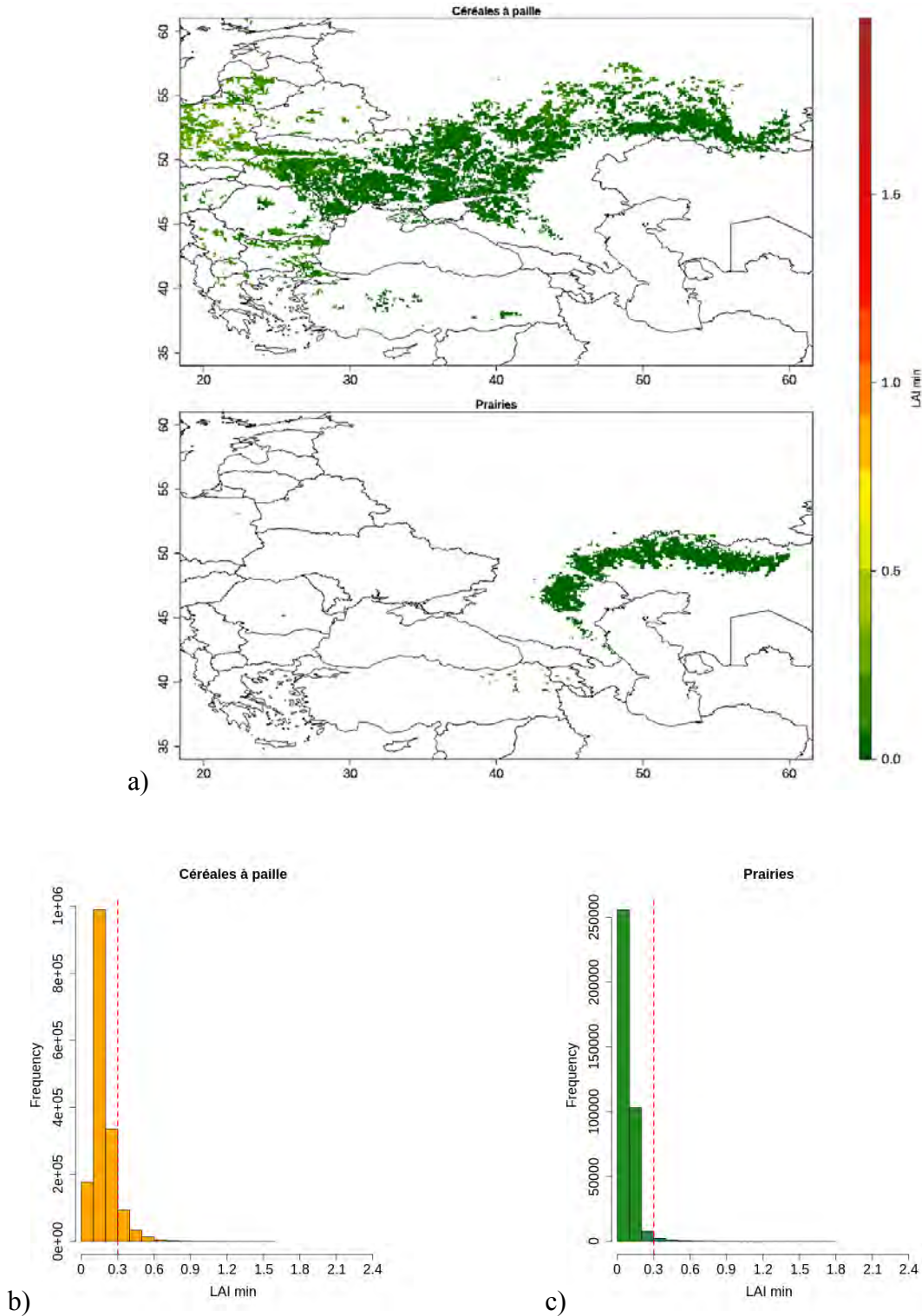


Figure III.11 (a) Carte des LAI_{min} moyennés sur la période 1999-2013 pour les cultures et les prairies en Europe centrale et orientale. Histogrammes et valeur par défaut utilisés par ISBA-A-gs (LAI_{min} = 0.3) des valeurs de LAI_{min} pour (b) les cultures et (c) les prairies

4. Bilan du Chapitre III

La comparaison de cartes d'occupations des sols construites à partir de données de télédétections (ESA-CCI LC et ECOCLIMAP) a permis d'identifier des zones homogènes de cultures pluviales et de prairies à l'échelle globale malgré des différences notables entre les deux cartes :

- Près de 50 % des points de grille de la carte ECOCLIMAP-I du couvert « cultures en C3 » ont pu être retenus étant considérés aussi comme des points de grille de « cultures pluviales » par la carte d'occupation des sols ESA-CCI-LC ;
- Seulement 14 % des points de grille de la carte ECOCLIMAP-I du couvert « prairies en C3 » ont été validés par la carte ESA-CCI-LC ;
- Les zones irriguées mises en évidence grâce à la base de données de la FAO permettent d'écarter les zones agricoles présentant des équipements pour l'irrigation. Si on avait conservé ces zones, la variabilité des rendements n'aurait pas été gouvernée par une variabilité climatique (impossible alors de restituer indirectement la réserve utile).

La comparaison de deux bases de données indépendantes est un premier pas afin de réduire considérablement l'incertitude résidant dans l'estimation de l'occupation du sol. Ceci permet de prendre en compte uniquement le type de végétation étudié.

La cartographie du paramètre LAI_{min} extrait des séries temporelles de LAI GEOV1 à une résolution de $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$ pour l'Europe pour chaque pixel du masque de cultures de céréales à paille et du masque de prairies permanentes, a mis en évidence :

- L'influence du type de climat sur ce paramètre qui présente des valeurs globalement plus élevées, en Europe de l'ouest bénéficiant d'un climat océanique, particulièrement pour les prairies permanentes. A contrario, à l'Est où le climat de type continental est caractérisé par une forte amplitude annuelle des températures et des hivers froids et longs, les valeurs de LAI_{min} sont les plus faibles;
- Les cultures de céréales à paille en Europe présentent une valeur de LAI_{min} observée globalement proche de la valeur fixée à $0.3 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ à l'échelle globale dans le modèle ISBA pour les couverts de cultures ;
 - Les prairies permanentes en Europe présentent une distribution bimodale des valeurs de LAI_{min} observée avec des valeurs dépassant largement la valeur par défaut du modèle à l'ouest de l'Europe (valeurs supérieures à $1 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$) et inférieures à $0.3 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ à l'est de l'Europe.

CHAPITRE IV. Potentiel de l'utilisation des données satellitaires pour la modélisation de la biomasse et pour le suivi des sécheresses en France

1. Introduction

Une représentation réaliste des interactions dynamiques entre le sol, la végétation et l'atmosphère au sein des modèles des surfaces continentales, est primordiale pour l'évaluation des impacts de la variabilité climatique sur les ressources en eau et les ressources agricoles. Des avancées dans la compréhension de ces systèmes complexes ont permis de développer des modèles de surfaces capables de représenter les processus biophysiques aux différentes interfaces sol-végétation-atmosphère.

Ces modèles sont basés sur des équations utilisant des paramètres dont la valeur doit être fixée pour un biome et un type de végétation et/ou de sol donnés. Ces paramètres peuvent généralement être mesurés à l'échelle locale et des valeurs peuvent être trouvées dans la littérature scientifique. Il arrive cependant que certains paramètres soient difficilement mesurables ou n'aient été estimés que pour un nombre limité de biomes ou de sites. C'est le cas de la réserve utile du sol ou de la teneur en azote des feuilles. L'approche que j'ai suivie dans ce travail a consisté à réaliser une étape de calage de ces paramètres dans le modèle ISBA, c'est-à-dire l'ajustement de leurs valeurs en se basant sur une variable observée par télédétection, le LAI. Afin d'évaluer l'impact du calage sur la variable clef du modèle considéré, une étape de validation doit être réalisée. Pour ce faire, une variable simulée différente de celle utilisée pour le calage est comparée à des observations. Il peut s'agir de la biomasse aérienne ou des échanges de flux de matière avec l'atmosphère.

Des produits satellitaires représentant différentes variables terrestres clefs telles que le LAI ou l'humidité de surface du sol par exemple, sont désormais disponibles à l'échelle globale pour les trente dernières années environ. Ceci offre de nouvelles perspectives pour l'étalonnage des modèles sur des échelles spatiales et temporelles importantes. Le potentiel de ces données satellitaires pour l'amélioration du modèle ISBA-A-gs est exploré dans ce Chapitre. L'amélioration par calage de la réserve utile, du LAI simulé des cultures de céréales à paille, est évaluée grâce aux données de LAI observées par télédétection sur la période 1999-2013.

J'ai utilisé deux types de données d'observations : des séries temporelles de LAI satellitaires permettant d'optimiser les paramètres d'intérêt du modèle et des statistiques agricoles permettant d'évaluer et de valider l'optimisation de ceux-ci. Une analyse, présentée dans la section 4.1 de ce Chapitre, a permis de mettre en avant la forte corrélation entre la variabilité interannuelle de la végétation telle qu'elle peut être appréhendée par le LAI satellitaire et celle des rendements particulièrement pour les cultures de céréales à paille. Ce résultat valide donc l'utilisation de ces observations indépendantes.

La méthode utilisée afin d'estimer la réserve utile pour des cultures de céréales à paille pour les départements fortement agricoles en France est décrite dans la section 4.3.1. Les résultats sont présentés dans l'article, section 4.3.2

Les réserves utiles obtenues sont comparées avec une carte de réserve utile établie sur la France par l'Institut National de Recherche Agronomique (INRA) (Al Majou et al., 2008). Ceci a permis de mettre en évidence des similitudes des deux estimations indépendantes de réserves utiles notamment pour le bassin parisien mais aussi de larges différences sur les types de sols calcaires en particulier. Ces résultats sont présentés dans la section 4.

2. Données utilisées : produits satellitaires bruts et désagrégés et rendements agricoles

2.1 Cultures de céréales à paille en France

Rendements agricoles :

La France est le premier producteur de céréales en Europe et particulièrement le premier producteur de blé. Les données de rendements agricoles sont recueillies grâce à des enquêtes effectuées tous les ans. Une base de données du Ministère de l'Agriculture, Agreste, rassemble toutes ces statistiques agricoles (<http://agreste.agriculture.gouv.fr/page-d-accueil/article/donnees-en-ligne>). Des données annuelles de rendements pour chaque type de cultures sont disponibles à l'échelle du département. J'ai utilisé des rendements de cultures pluviales de céréales à paille dont l'avoine, l'orge, le seigle, le triticale et le blé pour la période 1999-2013 pour 45 sites. Ces sites correspondent à 45 départements producteurs de céréales et ont été utilisés dans les études précédentes de Calvet et al. (2012) et Canal et al. (2014) (Figure IV.11). Dans ces études, des simulations de la biomasse aérienne réalisées avec le modèle ISBA-A-gs sur chacun des sites ont été comparées avec les statistiques agricoles disponibles à l'échelle du département correspondant. J'ai adopté une approche similaire, mais en utilisant une version plus récente de SURFEX, et en utilisant des données satellitaires.



Figure IV.1 Quarante-cinq sites de céréales à paille en France (Calvet et al. 2012, Canal et al. 2014)

Produits satellitaires et produits satellitaires désagrégés :

Les produits satellitaires utilisés dans ce travail sont les produits de LAI GEOV1 et sont fournis par le programme européen « Copernicus Global Land Service ». Ces données sont disponibles tous les dix jours et à une résolution de 1 km × 1 km à l'échelle globale. A cette résolution, différents types de végétation coexistent au sein d'un même pixel. Afin d'améliorer la cohérence entre les observations de LAI et les statistiques agricoles disponibles à l'échelle du département les séries temporelles de LAI sont moyennées sur un carré autour des 45 sites dont la dimension a été optimisée à 35 km x 35 km (voir plus bas).

Dans un premier temps, le LAI GEOV1 a été désagrégé, c'est-à-dire que l'on a isolé une valeur distincte de LAI décadaire pour chaque type de végétation présent au sein du pixel. La technique utilisée a été proposée initialement par Carrer et al. (2014) pour l'albédo de surface. Elle consiste à appliquer un filtre de Kalman afin de combiner de manière optimale le LAI satellitaire et les informations a priori de la base de données ECOCLIMAP telle que la fraction et le cycle annuel du LAI de chaque type de végétation (Faroux et al., 2007, Masson et al., 2003) pour obtenir un LAI spécifique à chaque type de végétation présent (Munier et al., 2017). Un LAI spécifique des céréales à paille est donc calculé à chaque fois qu'une observation satellitaire est disponible. Le LAI désagrégé correspondant aux cultures de C3 est obtenu à une résolution de 5 km x 5 km.

J'ai utilisé deux types de séries de LAI satellitaires: le LAI satellitaire GEOV1 brut et le LAI satellitaire désagrégé correspondant aux céréales à paille (Munier et al., 2017).

Analyse des rendements agricoles et des produits satellitaires :

La question posée ici est de savoir si les données d'observations dont on dispose peuvent être utilisées et « intégrées » d'une certaine façon dans le modèle ISBA-A-gs pour estimer des paramètres clefs de la végétation, plus précisément la réserve utile, en reproduisant la variabilité interannuelle observée de la végétation. Afin, dans un premier temps, d'évaluer dans quelle mesure la variabilité interannuelle du pic annuel LAI observé est comparable à celle des rendements, différentes valeurs annuelles moyennes de LAI ont été calculées selon deux composantes :

- La surface du carré considéré autour des coordonnées des 45 sites étudiés (de 5 km × 5 km jusqu'à 45 km × 45 km tous les 5 km × 5 km) ;
- Le seuil en deçà duquel les observations de LAI ne sont pas prises en compte dans le calcul du pic annuel de LAI (ce seuil est une fraction de la valeur maximale annuelle de LAI observé pour le site considéré).

Le meilleur résultat est obtenu pour le LAI désagrégé en utilisant un seuil de 50% des valeurs maximales annuelles de LAI pour une zone de 35 km × 35 km. Ceci permet d'obtenir une corrélation significative entre LAI moyen observé et rendements pour 31 sites sur 45. Un résultat assez semblable est obtenu en utilisant le LAI satellitaire brut, avec une corrélation significative pour 30 sites pour une taille de pixel similaire.

Ces travaux qui ont fait l'objet d'un article présenté dans la section 4.3, utilisent préférentiellement la série temporelle de LAI désagrégé pour une grille de 35 km × 35 km. En effet, la désagrégation du LAI a un impact important sur les valeurs maximales annuelles du LAI comme le montre la Figure IV.2 où les moyennes des valeurs annuelles maximales de LAI désagrégé, de LAI satellitaire et de rendement sont comparées. Elle n'influence pas la variabilité interannuelle comme le montrent les courbes du LAI brut et du LAI désagrégé qui évoluent de la même manière et qui présentent toutes deux une forte corrélation avec les rendements (R^2 de 0.86 et de 0.84 respectivement).

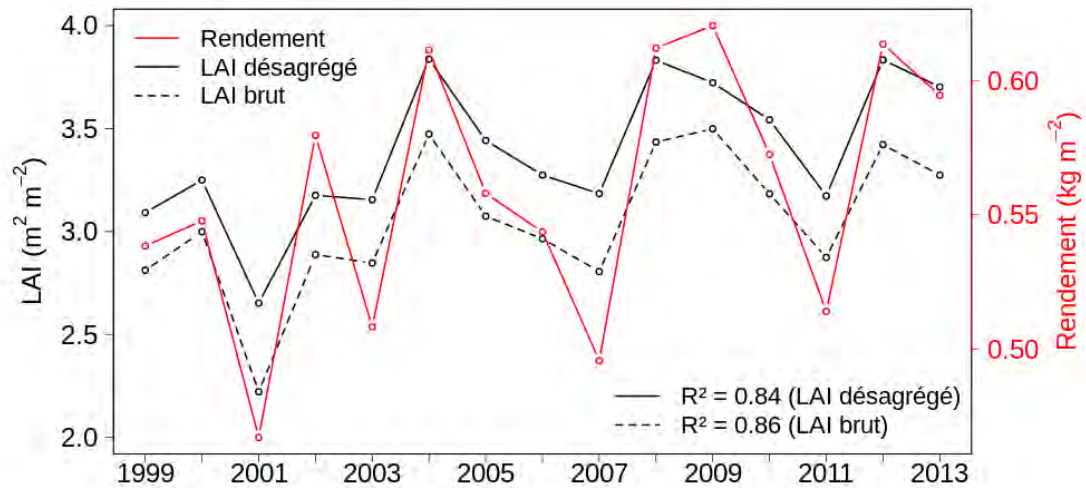


Figure IV.2 Comparaison des valeurs maximum de LAI satellitaire avec les rendements agricoles pour les 31 départements présentant des corrélations significatives pour les céréales à paille

2.2 Prairies en France

Les prairies permanentes, c'est-à-dire des prairies naturelles ou des prairies qui ont été semées depuis au moins 6 ans, sont majoritairement présentes dans le nord-ouest et le centre de la France. La gestion d'une prairie est différente de celle des cultures de céréales à paille où une seule récolte (coupe) constitue le rendement annuel. D'autre part, les rendements annuels des prairies correspondent à la somme des prélèvements de matière sèche après chaque coupe alors que le rendement en grains est considéré pour les céréales. Plusieurs coupes peuvent être effectuées à partir du printemps jusqu'à l'automne. La somme de ces rendements intermédiaires va constituer le rendement total annuel.

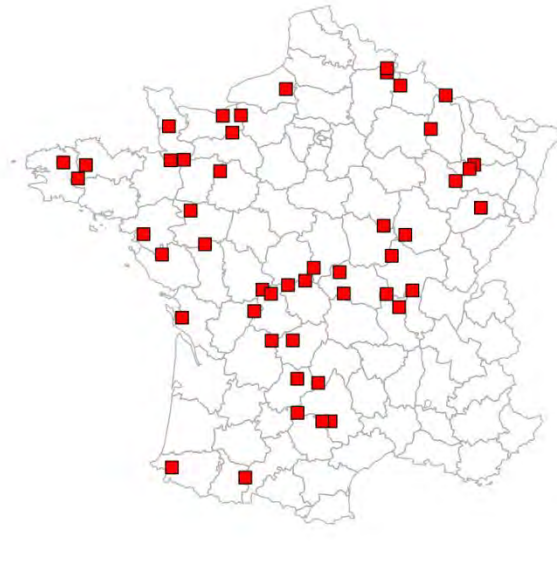


Figure IV.3 Quarante-huit sites de prairies permanentes en France (Calvet et al., 2012, Canal et al., 2014)

La même procédure, décrite dans la section 2.1, est appliquée pour 48 sites correspondant à 48 départements (Calvet et al., 2012 ; Canal et al., 2014), dont la production des prairies destinées aux fourrages est importante. Le résultat est présenté dans la Figure

IV.1. Contrairement à ce qui a été observé pour les céréales à paille, il n'y a pas de corrélation significative entre les valeurs maximales de LAI brut/ désagrégé et les rendements annuels des prairies avec des valeurs de R^2 égales à 0.10 et 0.13, respectivement.

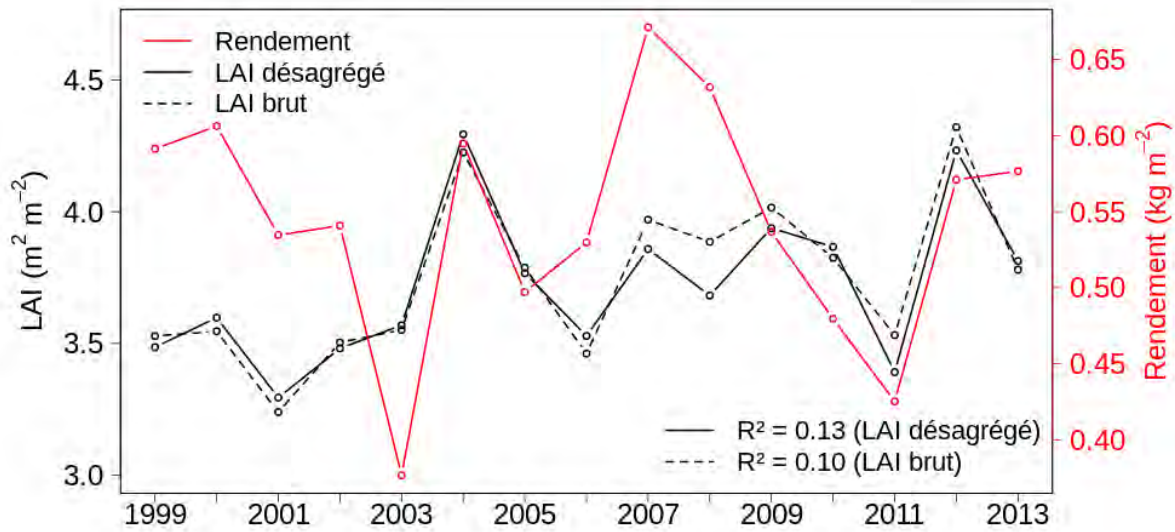


Figure IV.4 Comparaison des valeurs maximum de LAI satellitaire et les rendements agricoles moyennés pour les 48 départements pour les prairies

L'analyse des rendements montre que l'année 2007 a été particulièrement favorable pour les prairies permanentes, contrairement aux céréales à paille. Cette information n'est pas contenue dans la série temporelle des valeurs maximales de LAI dont le maximum de la période 1999-2013 n'est pas en 2007. Cette faible corrélation peut s'expliquer par le mode de gestion des prairies. En effet, le rendement annuel est le résultat de plusieurs coupes, et la valeur maximale du LAI satellitaire n'est pas représentative du rendement résultant de toutes les coupes. De précédents travaux réalisés par Canal et al. (2014) estimant la réserve utile pour ces 48 points en se basant sur les rendements agricoles, ont montré que les meilleurs résultats étaient obtenus pour les prairies permanentes. Dans mon cas d'étude basé sur les données satellitaire, il n'est pas envisageable d'estimer la réserve utile pour les prairies, l'information sur la variabilité interannuelle de la végétation provenant des séries temporelles de LAI satellitaires n'étant pas cohérente avec la variabilité interannuelle des rendements agricoles.

3. Etude comparative WOFOST-ISBA-A-gs

Une évaluation préliminaire du modèle ISBA-A-gs et du LDAS est présentée. Une comparaison des biomasses simulées par ceux-ci et des biomasses simulées par un modèle de culture avec des observations de rendements agricoles et a permis de montrer le potentiel du modèle ISBA et du LDAS pour simuler la variabilité interannuelle de la végétation et son application en agro-météorologie.

3.1 Modèle de culture : WOFOST

Le modèle WOFOST (« World Food Studies ») est un modèle de culture (Van Diepen et al., 1989) appelé aussi « modèle éco-physiologique ». Il est développé par l'Université de Wageningen aux Pays-Bas. Un modèle de culture décrit la phénologie d'une culture, ses interactions avec le sol et le climat, les pratiques culturales (cultures irriguées, fertilisation, etc.). Ils représentent des atouts précieux pour les agriculteurs pour la prise de

décisions et la gestion de leur exploitation. WOFOST a donc été développé dans le but d'étudier la production des zones cultivées, selon le type de culture, le type de sol et les conditions hydrologiques et météorologiques. Trois types de cultures sont représentés dans ce modèle :

- Cultures irriguées : on simule dans ce cas la production potentielle de la culture, c'est-à-dire la production de biomasse dans des conditions idéales. L'émergence et la croissance de la culture est contrainte uniquement par la lumière et la température, et les apports en eau et en nutriments sont considérés comme optimum ;
- Cultures pluviales : pour simuler des conditions d'apport en eau limitée, c'est l'humidité du sol qui va limiter la croissance, l'apport en nutriments étant considéré comme optimum ;
- Cultures sans fertilisation : les conditions d'apport en nutriments limités tels que l'azote, le potassium et le phosphore qui sont considérés comme les principaux nutriments essentiels à la croissance de la culture, sont représentées par un facteur de croissance limitée.

WOFOST est un modèle mécaniste qui décrit et quantifie à l'échelle journalière, les processus éco-physiologiques au sein du système sol-plante-atmosphère tels que les stades phénologiques (de l'émergence de la graine à la sénescence) de la culture prise en compte, l'interception de la lumière, l'assimilation du CO₂, la transpiration, la respiration, le bilan hydrique (Manuel d'utilisateur WOFOST, 2014). La biomasse, le LAI, l'utilisation de l'eau sont calculés au pas de temps journalier (Figure IV.5).

Ce modèle est utilisé par le Centre Commun de Recherche (JRC en anglais) de la Commission Européenne dans le cadre du système de suivi des cultures MARS (<https://ec.europa.eu/jrc/en/mars>). J'ai utilisé des simulations de WOFOST sans irrigation réalisées par le JRC et je remercie Bettina Baruth et Raul Lopez pour cette contribution. Ces simulations sont faites sur une grille de 25 km par 25 km et la variabilité sous-maille des sols est représentée (les simulations sont faites pour chaque type de sol puis sont agrégées). Elles n'incorporent pas d'observations satellitaires ou in situ de la végétation.

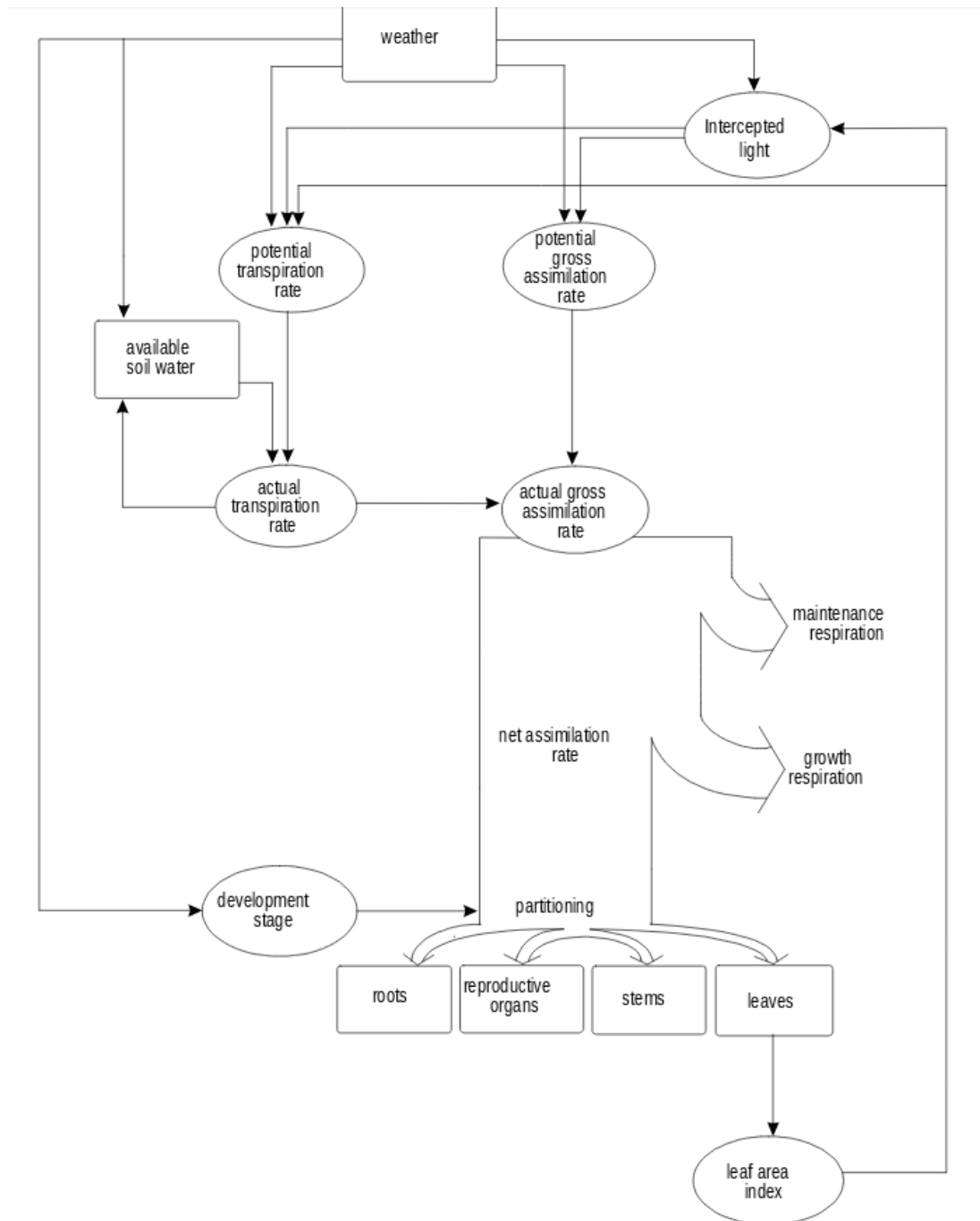


Figure IV.5 Schéma simplifié de WOFOST (Guide utilisateur WOFOST 7.1.7, d'après Boodgaard et al., 2014)

3.2 Comparaison ISBA-A-gs vs. WOFOST

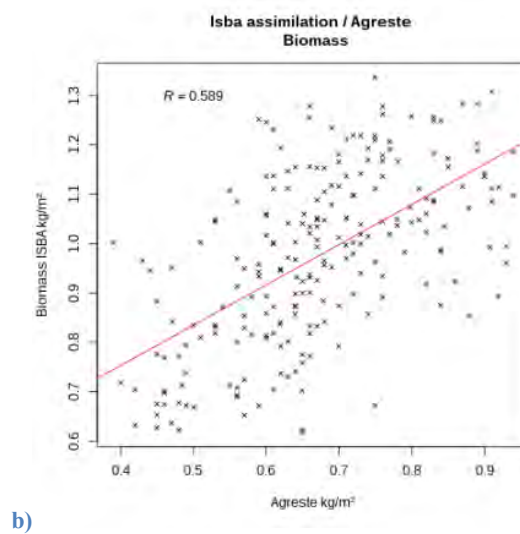
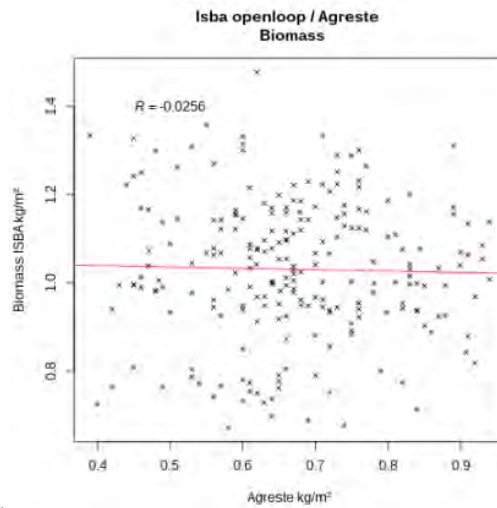
Les performances des modèles ISBA-A-gs, LDAS et le modèle de culture WOFOST, sont évaluées grâce aux statistiques agricoles Agreste. La biomasse est simulée pour chacun des 45 sites présentés dans la Figure IV.1 pour la période 2007 à 2013. La configuration utilisée pour ISBA est celle définie par défaut, ce qui correspond à une profondeur racinaire de 1.5 m.

Les valeurs biomasses maximales annuelles pour chacun des modèles sont comparées aux rendements annuels de blé Agreste. Ainsi, les trois diagrammes de dispersion présentés dans la Figure IV.6, montrent les corrélations entre les biomasses maximales des 45 sites × 7

années et les rendements pour ces mêmes points. Les valeurs de R^2 sont de 0.000, 0.347 et 0.144 pour ISBA-A-gs, le LDAS et WOFOST respectivement.

ISBA-A-gs, utilisé dans sa configuration standard, ne permet pas de reproduire la variabilité interannuelle comme le modèle de culture WOFOST dont les biomasses maximales simulées présentent une corrélation significative avec les rendements.

En revanche, le LDAS, qui permet de corriger la trajectoire du modèle à chaque fois qu'une observation de LAI satellitaire est disponible, est capable de reproduire la variabilité interannuelle des rendements et d'améliorer la corrélation par rapport au modèle de culture WOFOST avec un pourcentage de variance expliquée de 35%.



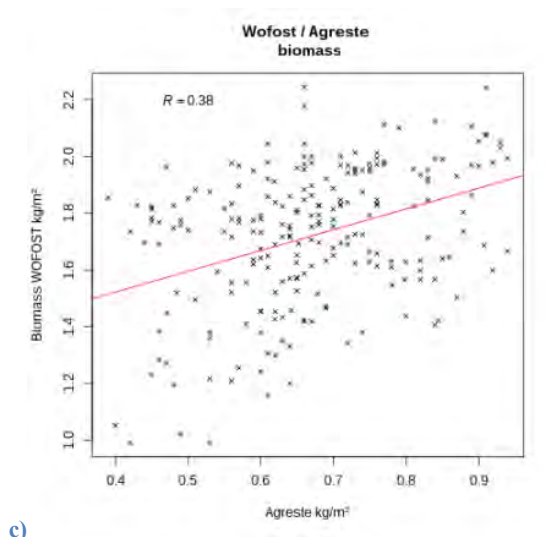


Figure IV.6 Comparaison des biomasses simulées avec a) ISBA-A-gs open loop ; b) LDAS et c) WOFOST, avec les rendements agricoles Agreste, pour 45 départements, sur une période de 5 ans (2007-2011), ce qui représente 225 observations de rendement.

Cette comparaison entre les modèles ISBA-A-gs et le LDAS avec un modèle de culture WOFOST a permis de mettre en évidence que:

- Le modèle ISBA-A-gs, sans apport d'observations satellitaires, simule une biomasse aérienne ne présentant aucune corrélation significative avec les rendements ;
- Le modèle WOFOST, sans apport d'observations satellitaires, simule une biomasse aérienne présentant une corrélation significative avec les rendements ;
- L'intégration de données satellitaires dans ISBA-A-gs en utilisant le LDAS permet au modèle de reproduire la variabilité interannuelle des rendements.

Asseng et al. (2013) ont montré que l'incertitude de la biomasse simulée par les modèles de culture, dont la paramétrisation inclut la phénologie des cultures, augmentait sensiblement lorsque les conditions atmosphériques présentent des températures élevées. Le LDAS, de par le faible nombre de paramètres et sa capacité d'intégrer l'information présente dans les données satellitaires sur la variabilité interannuelle et géographique des céréales à paille, semble pouvoir apporter des informations complémentaires à celles fournies par les modèles de culture.

4. Optimisation de paramètres pour une meilleure représentation des sécheresses : modélisation inverse vs. assimilation séquentielle de données

4.1 Résumé de l'article

Afin d'estimer un paramètre clef du modèle ISBA-A-gs, la quantité maximum en eau contenue dans le sol et disponible pour la végétation (MaxAWC), des séries temporelles

Optimisation de paramètres pour une meilleure représentation des sécheresses : modélisation inverse vs. assimilation séquentielle de données

satellites du LAI GEOVI à une résolution de $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$, fournies par le « Copernicus Global Land Service », ont été utilisées pour la période 1999-2013 et pour des cultures pluviales de céréales à paille en France. Les 45 sites décrits ci-dessus sont considérés.

L'objectif est de trouver pour chacun des sites une valeur de MaxAWC qui permette au modèle ISBA-A-gs de simuler des valeurs de LAI aussi proches que possible des valeurs observées.

Dans une première étape, deux méthodes ont été comparées : une méthode simple de modélisation inverse et une méthode plus complexe consistant à intégrer les observations dans le modèle via un système d'assimilation de données, le Land Data Assimilation System (LDAS). Ce dernier permet de combiner de manière optimale des observations (LAI satellitaire) et des sorties modèles (LAI simulé) pour obtenir une analyse (LAI analysé). Le critère de sélection des valeurs optimales de MaxAWC est basé sur la minimisation du « Root Mean Square Error » (RMSE) dans le cas de la méthode de modélisation inverse et sur la minimisation des incréments d'analyse du LAI dans le cas de la méthode LDAS.

La deuxième étape consiste à valider de manière indirecte les valeurs de MaxAWC optimisées issues des deux méthodes. Pour ce faire, la biomasse aérienne simulée (Bag) est comparée avec les rendements agricoles issus de la base de données agricoles Agreste. Ainsi, des corrélations significatives (avec une $p\text{-value} < 0.01$), entre la biomasse simulée et les rendements agricoles ont été trouvées pour 36% des départements dans le cas de la méthode de modélisation inverse et 53% dans le cas de la méthode LDAS.

Dans une dernière étape, les valeurs de MaxAWC obtenues par optimisation et les biomasses obtenues avec les deux méthodes sont évaluées. Les valeurs issues de la méthode LDAS sont plus réalistes que celles issues de la méthode de modélisation inverse. De plus, la méthode LDAS permet d'améliorer la représentation des années particulières présentant une anomalie négative causées par une sécheresse ou un excès d'eau. On montre que MaxAWC est fortement sous-estimé si le LAI n'est pas désagrégé.

D'autre part, une corrélation significative existe entre la médiane des valeurs maximales de LAI désagrégé avec les valeurs estimées de MaxAWC notamment celles issues de la méthode LDAS. Cela montre qu'un modèle de régression linéaire simple, basé sur des données satellitaires de LAI pourrait permettre de cartographier directement la réserve utile. Ce modèle empirique doit être évalué sur d'autres zones homogènes de cultures de céréales à paille.

Optimisation de paramètres pour une meilleure représentation des sécheresses :
modélisation inverse vs. assimilation séquentielle de données

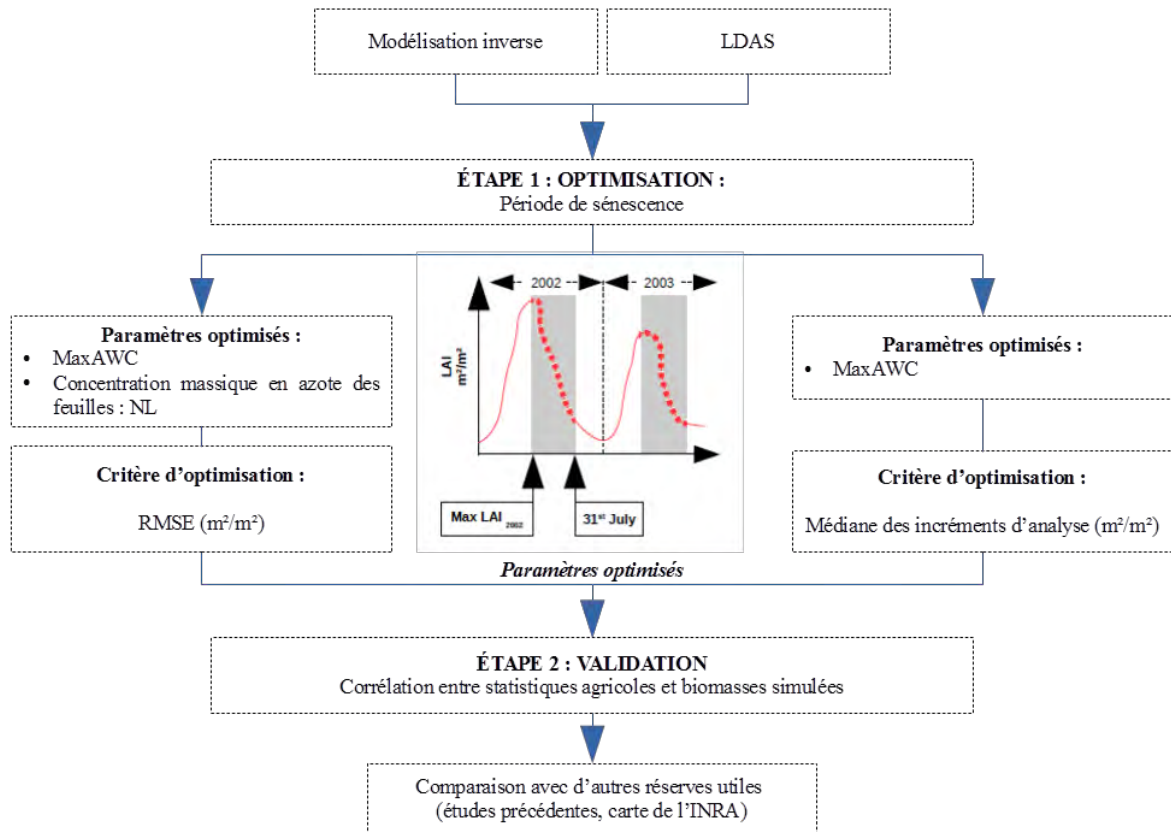


Figure IV.7 Schéma de la méthode d'estimation de la réserve utile

4.2 Article Dewaele et al., HESS 2017 : Parameter optimisation for a better representation of drought by LSMs : inverse modelling vs. sequential data assimilation



Parameter optimisation for a better representation of drought by LSMs: inverse modelling vs. sequential data assimilation

Hélène Dewaele, Simon Munier, Clément Albergel, Carole Planque, Nabil Laanaia, Dominique Carrer, and Jean-Christophe Calvet

CNRM – UMR3589 (Météo-France, CNRS), Toulouse, 31057, France

Correspondence to: Jean-Christophe Calvet (jean-christophe.calvet@meteo.fr)

Received: 2 March 2017 – Discussion started: 17 March 2017

Revised: 16 August 2017 – Accepted: 18 August 2017 – Published: 28 September 2017

Abstract. Soil maximum available water content (MaxAWC) is a key parameter in land surface models (LSMs). However, being difficult to measure, this parameter is usually uncertain. This study assesses the feasibility of using a 15-year (1999–2013) time series of satellite-derived low-resolution observations of leaf area index (LAI) to estimate MaxAWC for rainfed croplands over France. LAI interannual variability is simulated using the CO₂-responsive version of the Interactions between Soil, Biosphere and Atmosphere (ISBA) LSM for various values of MaxAWC. Optimal value is then selected by using (1) a simple inverse modelling technique, comparing simulated and observed LAI and (2) a more complex method consisting in integrating observed LAI in ISBA through a land data assimilation system (LDAS) and minimising LAI analysis increments. The evaluation of the MaxAWC estimates from both methods is done using simulated annual maximum above-ground biomass (B_{ag}) and straw cereal grain yield (GY) values from the Agreste French agricultural statistics portal, for 45 administrative units presenting a high proportion of straw cereals. Significant correlations (p value < 0.01) between B_{ag} and GY are found for up to 36 and 53 % of the administrative units for the inverse modelling and LDAS tuning methods, respectively. It is found that the LDAS tuning experiment gives more realistic values of MaxAWC and maximum B_{ag} than the inverse modelling experiment. Using undisaggregated LAI observations leads to an underestimation of MaxAWC and maximum B_{ag} in both experiments. Median annual maximum values of disaggregated LAI observations are found to correlate very well with MaxAWC.

1 Introduction

Extreme weather conditions markedly affect agricultural production. The interannual variability of rainfed crop yields is driven to a large extent by the climate variability. Comparing agricultural statistics to climate data shows the impact of atmospheric conditions on vegetation production. For example, lower temperature in northern Europe tends to shorten the period of crop growth. Conversely, persistent high temperatures as well as droughts in southern Europe are linked to negative anomalies of crop yields (Olesen et al., 2011). Li et al. (2010) showed that air temperature tends to influence mean crop yields at small scales (400 to 600 km), whereas rainfall drives crop yields at larger scales (50 to 300 km). Capa-Morocho et al. (2014) also showed the influence of air temperature on crop yields. They established a link between temperature anomalies related to the El Niño phenomenon and potential crop yield anomalies, obtained from reanalysis data and crop model, respectively.

In the context of climate change and of natural climate variability, there is a need to monitor the impacts of droughts on crops and water resources at continental and global scales (Quiroga et al., 2011; Van der Velde et al., 2012; Crow et al., 2012; Bastos et al., 2014). Modelling of continental surfaces into atmospheric and hydrological models has evolved in recent decades towards land surface models (LSMs) able to simulate the coupling of the water, energy and carbon cycles (Calvet et al., 1998; Krinner et al., 2005; Gibelin et al., 2006). In particular, LSMs are now able to simulate photosynthesis and plant growth. A major source of uncertainty in both LSMs and crop models is the maximum available water content of the soil (MaxAWC). This quantity represents the amount of water stored in the soil available for plant transpi-

ration along the vegetation growing cycle (Portoghese et al., 2008; Piedallu et al., 2011). MaxAWC is constrained by soil parameters and by the plant rooting depth. In regions vulnerable to drought risk exposure, MaxAWC is a key driver of the plant response to the climate variability.

Soil characteristics influence the vegetation response to climate (Folberth et al., 2016). In a model benchmarking study (Eitzinger et al., 2004) simulated evapotranspiration, soil moisture and biomass were compared with observations. Eitzinger et al. used three crop models that differ in the representation of the available soil water content (AWC): WOFOST (WORLD Food Studies model; Van Diepen et al., 1989), CERES (Crop Environment RESOURCE Synthesis model; Ritchie and Otter, 1985) and SWAP (Statewide Agricultural Production model; van Dam et al., 1997). They showed that a better description of rooting depth and evapotranspiration, taking account of soil type and crop type, could significantly improve these models. Tanaka et al. (2004), Portoghese et al. (2008) and Piedallu et al. (2011) have highlighted the important role of the soil characteristics (soil texture, rooting depth) on MaxAWC. Soylyu et al. (2011) and Wang et al. (2012) illustrated the major impact of MaxAWC on evapotranspiration. While soil properties such as soil texture determine the soil water holding capacity (in kg m^{-3}), information on rooting depth is needed to determine MaxAWC (in kg m^{-2}). A better representation of MaxAWC could improve the simulated interannual variability of both water fluxes and vegetation biomass by LSMs.

The lack of in situ observations of MaxAWC to calibrate and assess LSMs limits the ability of LSMs to represent drought effects on plants. Using satellite observations and data assimilation techniques could be a solution to this problem. A list of atmospheric, oceanic and terrestrial essential climate variables (ECVs) which can be monitored at a global scale from remote sensing observations was proposed by the Global Climate Observing System (GCOS). Leaf area index (LAI), fraction of absorbed photosynthetically active radiation (FAPAR) and soil moisture are key ECVs for land surface modelling. The use of these satellite-derived products to verify LSM simulations or to optimise key LSM parameters has been assessed by several authors (e.g. Becker-Reshef et al., 2010; Crow et al., 2012; Ferrant et al., 2014; Ford et al., 2014; Ghilain et al., 2012; Ichii et al., 2009; Kowalik et al., 2014; Szczypta et al., 2012, 2014). Data assimilation is a field of active research. Data assimilation techniques allow the integration of different observation types (e.g. in situ or satellite derived) into LSMs in order to optimally combine them with model outputs: the correction applied to the model state is called the increment and the corrected model state is the analysis. Previous works have studied the impact of assimilation of LAI observations and found that it can significantly improve the representation of vegetation growth (e.g. Albergel et al., 2010; Barbu et al., 2011, 2014).

The Interactions between Soil, Biosphere and Atmosphere (ISBA) LSM includes a modelling option able to simulate

photosynthesis and plant growth (Calvet et al., 1998; Gibelin et al., 2006). ISBA produces consistent surface energy, water and carbon fluxes, together with key vegetation variables such as LAI and the living above-ground biomass (B_{ag}). Previous studies showed that this model can represent well the interannual variability of B_{ag} over grassland and straw cereal sites in France provided MaxAWC values are tuned (Calvet et al., 2012; Canal et al., 2014). In these studies, MaxAWC for straw cereals was retrieved by maximising the correlation coefficient between simulated annual maximum B_{ag} (B_{agX}) and grain yield (GY) observations. The MaxAWC values were obtained for 45 French administrative units (“départements”) presenting a large proportion of rainfed straw cereals. For grasslands, dry matter yield observations were used. Significant correlations were found between the simulated B_{agX} value of grassland and dry matter yield of grasslands for up to 90 % of the administrative units. On the other hand, only 27 % of the 45 straw cereals départements (i.e. only 12 départements) had significant correlations. A possible cause of the difficulty to simulate the interannual variability of straw cereals’ GY was that the standard deviation of GY represented less than 10 % of the mean GY. This was a relatively weak signal. For grasslands a much larger value, of about 30 % of the mean dry matter yield, was observed (Canal et al., 2014).

The main purpose of this study is to estimate MaxAWC for straw cereals using reverse modelling techniques based on satellite-derived LAI observations disaggregated over separate vegetation types. Simulated and observed LAI are compared for a 15-year period (1999–2013) over the same 45 agricultural spots used in the previous studies of Calvet et al. (2012) and Canal et al. (2014). We use LAI observations instead of GY to estimate MaxAWC. The GY observations are used to verify the interannual variability of the simulated B_{agX} . This can be considered as an indirect validation of the retrieved MaxAWC. In a first experiment, we use a simple inverse modelling technique to estimate MaxAWC together with the mass-based leaf nitrogen content, minimising a cost function based on observed and simulated LAI values. In another experiment, we use a land data assimilation system (LDAS) able to sequentially assimilate LAI observations. In this case, MaxAWC solely is retrieved by minimising the LAI analysis increments. In the following, these two experiments are referred to as inverse modelling and LDAS tuning, respectively.

The main goals of this study are to (1) assess the usefulness of integrating satellite-derived LAI observations into a LSM, (2) compare inverse modelling and LDAS tuning and (3) determine MaxAWC values.

The observation data sets are described in Sect. 2, together with the version of ISBA used in this study and the LDAS. Results obtained from both methods are presented in Sect. 3, and analysed and discussed in Sect. 4. Conclusions and prospects are given in Sect. 5.

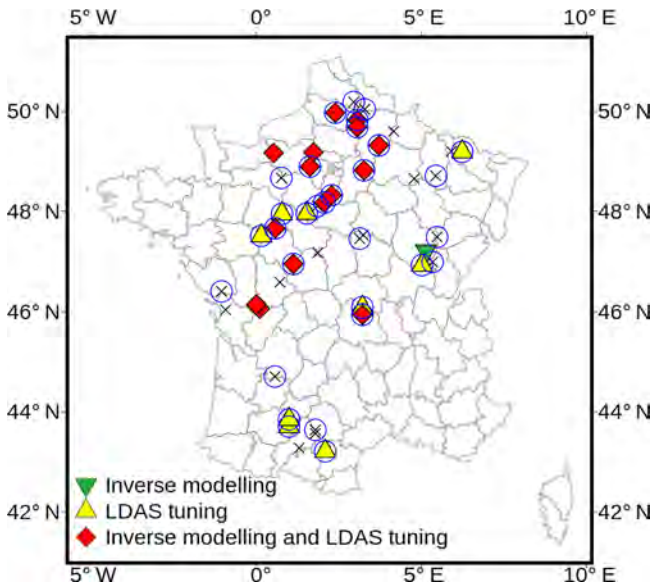


Figure 1. Straw cereal sites (35 km \times 35 km) in France in 45 administrative units (“départements”). Triangle and diamond symbols show the départements presenting a significant temporal correlation ($R^2 > 0.41$, F -test p value < 0.01) between Agreste GY values and LAI_{\max} (blue circles), both inverse modelling and LDAS tuning (red diamonds), LDAS tuning only (yellow upward-facing triangle) and inverse modelling only (green downward-facing triangle). The “x” symbol indicates départements where no significant correlation between biomass simulations and GY could be found.

2 Material and methods

The forcing and validation observations used in this study over the 1999–2013 period are described below. The location of the considered straw cereal spots is presented in Fig. 1.

2.1 Satellite LAI product

We use the GEOV1 global LAI product (Baret et al., 2013) provided in near real time (every 10 days) at a spatial resolution of 1 km \times 1 km by the European Copernicus Global Land Service (<http://land.copernicus.eu/global/>). The GEOV1 LAI product is derived from SPOT-VGT satellite observations starting in 1999. The complete 1999–2013 LAI time series comes from SPOT-VGT and is fully homogeneous. The product is well evaluated against ground observations (see the Supplement). The GEOV1 product is a low-resolution product (1 km \times 1 km). At this spatial scale, it is not possible to isolate pure straw cereal pixels and it is preferable to disaggregate the LAI (i.e. compute the LAI of each vegetation type) before integrating it into a straw cereal model. We disaggregated the GEOV1 LAI data following the method developed by Carrer et al. (2014), based on a Kalman filtering technique. This method permits separating the individual LAI of different vegetation types that co-exist in a grid pixel and then provides dynamic estimates

of LAI for each type of vegetation within the pixel (Munier et al., 2017). The Kalman filter optimally combines satellite LAI data and prior information from the ECOCLIMAP land cover database (Faroux et al., 2007; Masson et al., 2003). ECOCLIMAP prescribes physiographic parameters (fractional vegetation cover, soil depth, etc.) for several vegetation types including grasslands, forests and C3 crops like straw cereals. Mean annual LAI cycles per vegetation type from ECOCLIMAP are used as a first guess to partition the GEOV1 LAI every time a new satellite observation is available.

2.2 Atmospheric forcing

The global WFDEI data set (Weedon et al., 2014) is used in this study to drive the ISBA simulations. It provides 3-hourly surface atmospheric variables on a 0.5° \times 0.5° grid: air temperature, air humidity, wind speed, atmospheric pressure, solid and liquid precipitation, incoming shortwave and longwave radiation. WFDEI is based on the ERA-Interim atmospheric reanalysis (Dee et al., 2011). It includes elevation corrections and seasonal monthly bias corrections from ground-based observations.

2.3 Agricultural GY statistics

The Agreste portal (<http://agreste.agriculture.gouv.fr/>) provides annual statistical surveys over France which make it possible to establish a database of yearly GY values. The GY estimates are available per crop type and per administrative unit (département). We use GY values for rainfed straw cereals such as barley, oat, rye, triticale and wheat, for the same 45 départements as in Calvet et al. (2012) and Canal et al. (2014). Calvet et al. (2012) and Canal et al. (2014) used Agreste data for the 1994–2008 and 1994–2010 periods, respectively, for both straw cereals and fodder production. We use Agreste data from 1999 to 2013, only for straw cereal GY.

2.4 The ISBA model

The ISBA LSM is included in the SURFEX (SURFace EXternalisée) modelling platform (Masson et al., 2013). The newest version of SURFEX (version 8) is used in this study with the “NIT” biomass option for ISBA. The “C3 crop” plant functional type is considered.

ISBA simulates the diurnal course of heat, water and CO₂ fluxes, including gross primary production (GPP). The set of ISBA options we use permits the simulation of LAI and B_{ag} on a daily basis (Calvet et al., 1998, 2008). The model includes a soil moisture stress function (F_s) applied to photosynthesis key parameters. For low vegetation such as grass or crops, the parameters related to soil moisture stress (Calvet, 2000) are the mesophyll conductance (g_m) and the maximum leaf-to-air saturation deficit (D_{max}). Values of g_m and D_{max} for straw cereals in well-watered conditions are given in Ta-

ble S1 (in the Supplement), together with other model parameters. It must be noted that this value of g_m was derived using inverse modelling by Canal et al. (2014) for the same straw cereal sites as those considered in this study. In moderately dry conditions, g_m and D_{\max} are affected by F_s in such a way as to increase the intrinsic water use efficiency (WUE). This corresponds to a drought-avoiding behaviour (Calvet, 2000). The model is also able to represent a drought-tolerant behaviour (stable or decreasing WUE) and Calvet et al. (2012) showed that straw cereals tend to behave as drought avoiding, while grasslands tend to behave as drought tolerant.

The above-ground biomass (B_{ag}) consists of two components within ISBA: the structural biomass and the active biomass. The latter corresponds to the photosynthetically active leaves and is related to B_{ag} by a nitrogen dilution allometric logarithmic law (Calvet and Soussana, 2001). The mass-based leaf nitrogen concentration (N_L) is a parameter of the model affecting the specific leaf area (SLA), which is the ratio of LAI to leaf biomass (in $\text{m}^2 \text{kg}^{-1}$). The SLA depends on N_L and on plasticity parameters (Gibelin et al., 2006). The N_L parameter is key for LAI simulations and has to be included in any inverse modelling experiment involving LAI.

The net assimilation of CO_2 by the leaves (A_n) is driven by environmental factors such as the atmospheric CO_2 concentration, air humidity, the incoming solar radiation and the leaf surface temperature. To upscale the net assimilation of CO_2 and transpiration at the vegetation level, a multilayer radiative transfer scheme is used (Carrer et al., 2013). The daily canopy-scale accumulated value of A_n serves as an input for the vegetation growth and mortality sub-models, and the phenology is completely driven by A_n (no growing degree-day parameterisation is used).

The plant transpiration flux is used to calculate the soil water budget through the root water uptake. The soil hydrology scheme used in this study is referred to as “FR-2L” in SURFEX. It represents two soil layers: a thin surface layer with a uniform depth of 1 cm and a root-zone layer of depth Z_r . The latter is used as a surrogate for MaxAWC in the calibration process. Soil texture parameters such as the gravimetric fraction of sand and clay are extracted from the Harmonized World Soil Database (Nachtergaele et al., 2012). Physical soil parameters such as volumetric soil moisture at field capacity (θ_{Fc}) and wilting point (θ_{Wilt}) are calculated thanks to pedotransfer functions based on soil texture. The MaxAWC parameter is given by

$$\text{MaxAWC} = \rho (\theta_{\text{Fc}} - \theta_{\text{Wilt}}) \times Z_r. \quad (1)$$

Parameters are defined in the Appendix and model parameter values are summarised in Table S1 in the Supplement.

2.5 Land data assimilation system

We used the LDAS described in Barbu et al. (2011, 2014). It consists of a sequential data assimilation system operated

offline (uncoupled with the atmosphere). The assimilation is based on a simplified extended Kalman filter (SEKF), able to integrate observations such as LAI and soil moisture in the ISBA model. In this study, only LAI observations are assimilated and the LDAS produces analysed LAI values.

The key update equation of the SEKF is

$$\Delta x^t = x_a^t - x_f^t = K (y_o^t - y^t), \quad (2)$$

where Δx is the analysis increment, x is a control vector of one dimension representing LAI values propagated by the ISBA LSM, and y_o is the observation vector representing the GEOV1 LAI observations. The t superscript stands for time. The initial time is denoted by the 0 superscript. The “a”, “f” and “o” subscripts denote analysis, forecast and observation, respectively. The y^t term of Eq. (2) represents the model value at the analysis time:

$$y^t = h(x^0), \quad (3)$$

where h is the observation operator and

$$K = \mathbf{B}\mathbf{H}^T (\mathbf{H}\mathbf{B}\mathbf{H}^T + \mathbf{R})^{-1}. \quad (4)$$

The Kalman gain is derived from the background error covariance matrix \mathbf{B} and from the observation error covariance matrix \mathbf{R} . Matrix \mathbf{H} that appears in Eq. (4) represents the Jacobian of potentially nonlinear h function:

$$\mathbf{H} = \frac{\partial y^t}{\partial x^0} \quad (5)$$

which gives the following Jacobian matrix:

$$\mathbf{H} = \begin{pmatrix} \frac{\partial \text{LAI}^t}{\partial \text{LAI}^0} \end{pmatrix}. \quad (6)$$

The initial state at the beginning of an assimilation window is analysed via the information provided by an observation at the end of the assimilation window (Rüdiger et al., 2010). In this approach, the LAI increments (Eq. 2) are applied at the end of 1-day assimilation intervals. The elements of the Jacobian matrix are estimated by finite differences, individually perturbing each component of the control vector x by a small amount δx :

$$\mathbf{H} = \frac{y(x + \delta x) - y(x)}{\delta x}. \quad (7)$$

The background error covariance matrix \mathbf{B} is assumed to be constant at the start of each analysis cycle. The covariance matrices \mathbf{B} and \mathbf{R} are assumed to be diagonal. In the simplified version of the EKF used in this study, namely SEKF, the \mathbf{B} matrix does not evolve with time. The standard deviation of errors of GEOV1 LAI is assumed to be 20 % of GEOV1 LAI. The same assumption is made for the standard deviation of errors of the modelled LAI (20 % of modelled LAI) for modelled LAI values higher than $2 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$. For modelled LAI

values lower than $2 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$, a constant error of $0.4 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ is assumed. This assumption is based on option 3 presented in Barbu et al. (2011). They showed that this option gives the best simulated LAI over an instrumented grassland site in southwestern France.

2.6 Upscaling disaggregated LAI observations to département level

Each agricultural spot shown in Fig. 1 corresponds to the area within a département presenting the highest fraction of straw cereals. These 45 locations were chosen by Calvet et al. (2012) on a $8 \text{ km} \times 8 \text{ km}$ grid using fractions of vegetation types derived from ECOCLIMAP (Faroux et al., 2013). Disaggregated LAI observations have a spatial resolution of $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$. This represents a small area compared to the size of a département (from 2000 to $10\,000 \text{ km}^2$). Local values of the straw cereal LAI may not be representative of the straw cereal production at the département level described by Agreste. Preliminary tests showed that averaging the disaggregated LAI on the same $8 \text{ km} \times 8 \text{ km}$ grid cell used by Calvet et al. (2012) was not sufficient to represent the interannual variability of the GY observations at the département level. Therefore, an analysis of the consistency of the two observation data sets (in situ GY and disaggregated satellite LAI) is performed. The average maximum annual value of the disaggregated GEOV1 LAI observation (LAI_{Omax}) is calculated for various grid cell sizes for this task. In practice, the LAI_{Omax} value corresponds to the mean LAI values above a given fraction of the observed maximum annual LAI (LAI_{max}). We consider five grid cell sizes of $5 \text{ km} \times 5 \text{ km}$, $15 \text{ km} \times 15 \text{ km}$, $25 \text{ km} \times 25 \text{ km}$, $35 \text{ km} \times 35 \text{ km}$ and $45 \text{ km} \times 45 \text{ km}$ (from 25 to 2025 km^2). The five LAI_{Omax} time series are compared with the GY time series for each département. The area size corresponding to the largest number of départements presenting a significant correlation between LAI_{Omax} and GY is selected.

2.7 Model calibration/validation

The feasibility of retrieving MaxAWC from LAI satellite data is explored using two different approaches: inverse modelling and LDAS tuning. For the two approaches, this calibration step is followed by a validation step aiming at demonstrating the relevance of the retrieved MaxAWC values and the added value of the retrieval technique.

The satellite LAI observations are available year-round but the sensitivity of straw cereal LAI to MaxAWC may change greatly from one period of the year to another. Prior to calibrating the model, a sensitivity study of the time window used for the MaxAWC retrieval is performed. Three periods are considered: (1) growing period (from 1 March to the date of the observed LAI_{max}); (2) peak LAI (period for which observed LAI is higher than 50% of observed LAI_{max});

(3) senescence (from the date when observed LAI_{max} is reached to 31 July). The ISBA simulations are stopped on 31 July as this date corresponds to the maximum harvest date at most locations.

The validation of the calibrated model consists of comparing the interannual variability of the simulated maximum annual above-ground biomass to the interannual variability of the GY observations. The 1999–2013 period is considered. In drought conditions, modelled B_{ag} can rise to a maximum value and then drop rapidly. Therefore the peak B_{ag} can be dependent on modelling uncertainties and on uncertainties in the atmospheric forcing. In order to limit the impact of model errors, an average value of the simulated B_{agX} is used instead of an instantaneous value. This average value is calculated using all the B_{ag} values above a threshold corresponding to 90% of the maximum annual B_{ag} . It was checked that this threshold value permits the maximisation of the number of départements presenting a significant correlation with GY. Then, scaled anomalies of the average simulated B_{agX} are compared with scaled anomalies of the GY observations, and the R^2 score is calculated. Scaled anomalies (A_s) are calculated using the mean and standard deviation of the two variables over the 1999–2013 period:

$$A_{sB_{\text{agX}}} = \frac{(B_{\text{agX}} - \overline{B_{\text{agX}}})}{\sigma(B_{\text{agX}})}, \quad (8)$$

$$A_{s\text{GY}} = \frac{(\text{GY} - \overline{\text{GY}})}{\sigma(\text{GY})}. \quad (9)$$

The interannual variability of the modelled LAI_{max} is assessed using the coefficient of variation (CV). The CV is given in % and is calculated according the following formula with σ the standard deviation and μ the mean:

$$\text{CV} = 100 \times \sigma / \mu. \quad (10)$$

The MaxAWC retrieval is considered to be successful if the Pearson correlation is significant at 1% level (F -test p value < 0.01).

2.8 Design of the experiments

2.8.1 Inverse modelling

Two parameters are estimated: N_L and MaxAWC. For a given value of N_L , a set of 13 LAI simulations is produced, corresponding to the following MaxAWC values: 44, 55, 66, 77, 88, 99, 110, 121, 132, 154, 176, 198 and 220 mm. Since N_L is a key parameter for LAI simulations, it has to be retrieved together with MaxAWC and this simulation process is repeated 5 times, for the following N_L values: 1.05, 1.30, 1.55, 2.05 and 2.55 %.

The LAI root mean squared error (RMSE) over the period between the occurrence of the observed LAI_{max} and 31 July for the 15 years is used to select the best simulation. The

MaxAWC used in the simulation with the lowest RMSE is selected as the optimal one:

$$\text{RMSE} = \sqrt{\sum_{i=0}^n \frac{(\text{LAI}_i - \text{LAIo}_i)^2}{n}}, \quad (11)$$

where LAI is for simulated LAI, LAIo is for observed LAI and n is the length of the data vector.

2.8.2 LDAS tuning

The LAI observations are integrated into ISBA by the LDAS. The LDAS produces analysed values of LAI and B_{ag} . Therefore, there is no need to estimate N_L and the only degree of freedom in this case is the value of MaxAWC. Thirteen analyses are made, corresponding to the same MaxAWC values used in the inverse modelling experiment (Sect. 2.8.1).

The median analysis increment (Eq. 2) can present positive or negative values. Small corrections provided by the LDAS indicate that simulation outputs are close to observations and that the dynamics is well represented. The value closest to zero indicates the best simulation and the corresponding MaxAWC value is considered as the retrieved MaxAWC.

3 Results

3.1 Disaggregated satellite LAI vs. grain yield observations

In a first step before integrating the disaggregated LAI observations into the ISBA model, we checked the consistency of the interannual variability of LAIo_{max} (Sect. 2.6) with that of the observed GY from Agreste. We investigated several values of the size of the area around each site coordinate to calculate the average of LAIo_{max}, from 25 to 2025 km². Individual LAIo_{max} values at a spatial resolution of 1 km × 1 km correspond to the mean of LAI values above the LAIo_{max} threshold (Sect. 2.6). Several LAIo_{max} threshold values ranging from 40 to 95 % of LAI_{max} were investigated together with the grid cell size (see Fig. S1 in Supplement). A LAIo_{max} threshold value of 50 % and a grid cell size of 35 km × 35 km (1225 km²) were selected. In this configuration, a significant temporal correlation (F -test p value < 0.01) between the average LAIo_{max} and the observed GY is obtained for 31 départements. The latter are shown in Fig. 1 (empty blue circles). The 45 grid cells of 35 km × 35 km are further used to calculate average 10-day LAI observations to be integrated in the ISBA model through either inverse modelling or LDAS tuning. The fraction of straw cereals derived from ECOCLIMAP for these grid cells ranges from 15 to 100 %, with a median value of 68 % (see Table S2 in Supplement).

The temporal correlation between LAIo_{max} and GY is illustrated in Fig. 2. The two 15-year time series correspond

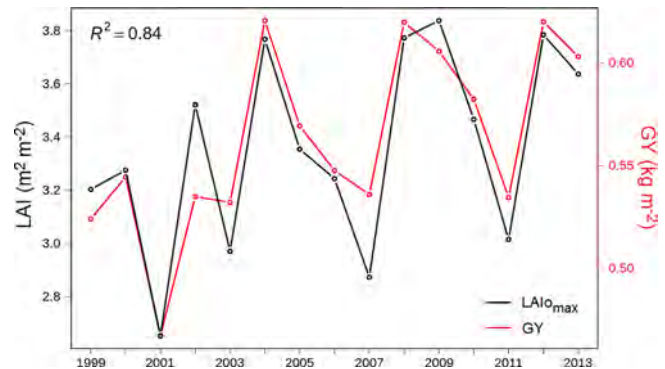


Figure 2. Interannual variability of straw cereals in France: 15-year time series (1999–2013) of the mean disaggregated satellite-derived LAIo_{max} and of the mean Agreste grain yield (GY) observations for 31 French départements where LAIo_{max} and GY are significantly correlated. The fraction of explained variance is $R^2 = 0.84$.

to average annual values of LAIo_{max} and GY across the 31 départements where LAIo_{max} is found to correlate with GY. The two time series present a very good correlation, with $R^2 = 0.84$. This shows that the disaggregated satellite-derived LAI is able to capture the interannual variability of GY.

3.2 Sensitivity study

Figure 3 presents the impact of ISBA parameters on the simulated annual maximum LAI and on its interannual variability. Two key parameters are considered: MaxAWC and N_L . The same parameter values are applied to all 45 départements, and mean modelled LAI_{max} are used to calculate CV values (Eq. 10). The CV values are shown in Fig. 3 as a function of these parameters, together with LAI_{max}.

It appears that the interannual variability of the modelled LAI_{max} is governed by MaxAWC. The CV values of more than 12 % are derived from the ISBA simulations at low values of MaxAWC (e.g. 50 mm). On the other hand, high MaxAWC values (> 200 mm) correspond to limited interannual variability of LAI_{max} (CV < 4 %), in relation to a lower sensitivity of plants to drought.

The N_L parameter has a limited impact on CV and its impact depends on MaxAWC. For large (small) MaxAWC values above (below) the standard average value of 132 mm used in ISBA, the largest values of N_L tend to cause a decrease (increase) of CV. In the inverse modelling experiment, N_L mainly impacts the average simulated LAI_{max} value. In the ISBA model, N_L is linearly related to the specific leaf area (SLA) and large N_L values correspond to large SLA values, i.e. larger LAI values for a given simulated leaf biomass (Gibelin et al., 2006). However, Fig. 3 shows that MaxAWC has a more pronounced impact than N_L on LAI_{max}. Increasing MaxAWC from 50 to 250 mm triggers a rise in LAI_{max}, from about 2 m² m⁻² at low N_L values to 3 m² m⁻²

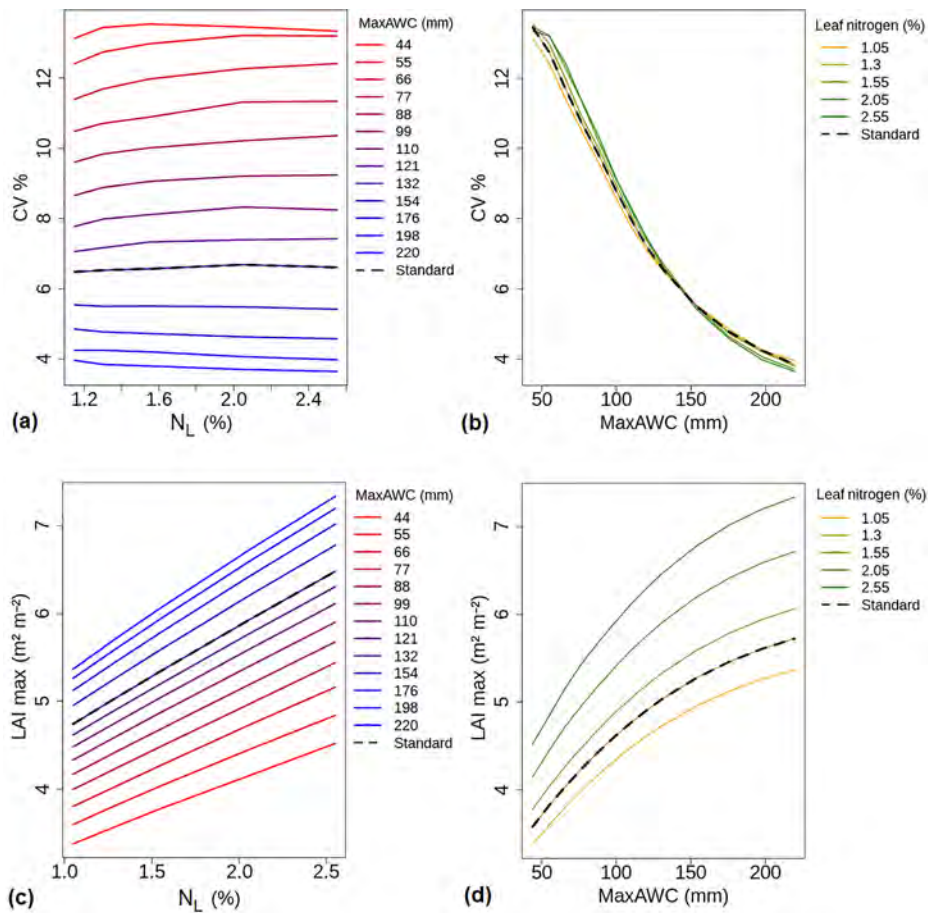


Figure 3. Impact of MaxAWC and N_L parameters on the annual maximum LAI simulated by ISBA and on its interannual variability. The interannual variability is quantified using the coefficient of variation (CV, in %). Mean CV values (across all 45 départements) are plotted as a function of (a) N_L and (b) MaxAWC, for various values of MaxAWC and N_L , respectively. Mean LAI_{max} values (across all 45 départements) are plotted as a function of (c) N_L and (d) MaxAWC, for various values of MaxAWC and N_L , respectively. The dashed lines are obtained using standard average ISBA parameter values (MaxAWC = 132 mm and N_L = 1.3 %).

at high N_L values. Switching N_L from low to high values at a given MaxAWC level also raises LAI_{max}, but not more than $2 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$.

This result confirms that MaxAWC is the key parameter to be retrieved in order to improve the representation of straw cereal biomass, for both inverse modelling and LDAS tuning experiments. The impact of MaxAWC on the cost functions (LAI RMSE and median LAI analysis increments, Eqs. 11 and 2, respectively) may depend on the LAI observation period. We tested the two retrieval methods for three different optimisation periods: start of growing period, peak LAI and senescence (see Sect. 2.7).

This is illustrated in Fig. 4, which shows the average cost function across all 45 départements. In both experiments, MaxAWC has little impact on the cost function during the start of the growing season. The most pronounced response of both LAI RMSE and analysis increments is observed during the senescence. For this period of the growing cycle, both cost functions present a minimum value at MaxAWC

= 110 mm. Also, the largest RMSE and increment values are observed during senescence, indicating that the processes at stake during this period are more difficult to simulate. For straw cereals, senescence is related to soil moisture stress (Cabelguenne and Debaeke, 1998) and during this period the value of MaxAWC has a marked impact on the representation of the effect of drought by the model. The peak LAI period is less favourable to the integration of LAI observations into the model, with a reduced accuracy on the retrieved MaxAWC.

3.3 Outcomes of the optimisation

A direct result of the optimisation procedure is the reduction of the cost function value. This is illustrated in Fig. 5 for all 45 départements. Figure 5 presents the impact of the optimisation on the cost functions of inverse modelling and LDAS tuning during the senescence period: LAI RMSE and LDAS LAI increments, respectively.

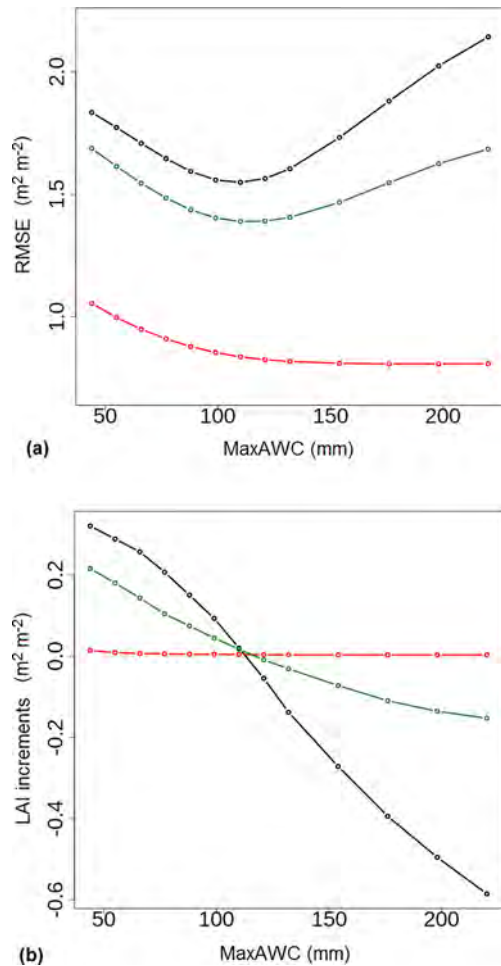


Figure 4. Mean cost function values vs. MaxAWC across all 45 départements of (a) inverse modelling and (b) LDAS tuning experiments for three different optimisation periods: (red) start of growing period (from 1 March to LAI_{max} date); (green) peak LAI (dates for which $LAI > 0.5 LAI_{max}$); (black) senescence (from LAI_{max} date to 31 July). Inverse modelling is based on the minimisation of LAI RMSE (Eq. 11). LDAS tuning is based on the minimisation of the median LAI analysis increment (Eq. 2).

The RMSE values are systematically reduced by the inverse modelling experiment. For all 45 départements, the median value of the LAI RMSE drops from 1.6 to $1.2 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$. While LAI RMSE exceeds $1.5 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ for 29 départements before the optimisation, this RMSE value is exceeded for only three départements after the optimisation. It must be noted that this is a much better result than the RMSE obtained in Fig. 4 ($1.6 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$) for the cost function including all 45 départements, with a MaxAWC value of 110 mm. This shows the impact of the spatial variability of MaxAWC.

For LDAS tuning, most of the median daily increment values are sharply reduced: while 17 values are larger (smaller) than 0.2 (-0.2) $\text{m}^2 \text{ m}^{-2}$ before the optimisation, all the values range from -0.1 to $0.1 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ after the optimisation.

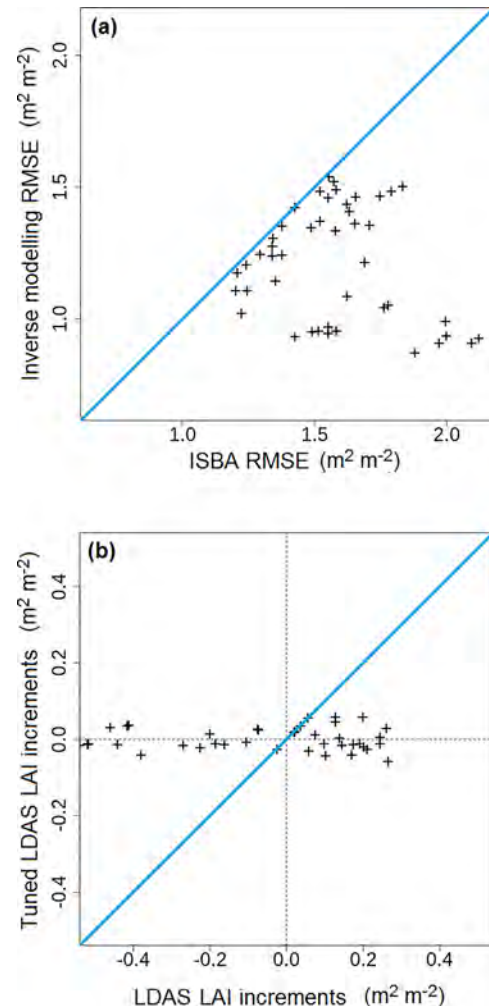


Figure 5. Cost function values during the senescence period after vs. before LAI observation integration for all 45 départements: (a) LAI RMSE (Eq. 11) for inverse modelling and (b) LAI analysis increments (Eq. 2) for LDAS tuning. Identity lines are in blue.

The spatial median value of the LDAS LAI increments varies from $-0.03 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ for original LDAS to $-0.01 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ for LDAS tuning, for all 45 départements. Table 1 summarises results showing the impact of the optimisation on indicators such as the number of départements presenting a significant correlation of B_{agX} with GY and the median value of the cost functions. Table 2 also gives median and standard deviation values of the retrieved MaxAWC and of the retrieved N_L in the case of inverse modelling, together with modelled B_{agX} and LAI_{max} values. The results are given for the départements presenting a significant correlation of B_{agX} with GY and for all 45 départements. An extended version of Table 1 (Table S3 in the Supplement) also gives results for undisaggregated LAI and for 15 validated départements for both inverse modelling and LDAS tuning.

In the case of LDAS tuning, the median retrieved MaxAWC ($129 \pm 44 \text{ mm}$ for all 45 départements and

Table 1. Impact of the optimisation (either inverse modelling or LDAS tuning) on parameter values (spatial median values \pm standard deviation) of the ISBA model (MaxAWC and N_L), on the median value of B_{agX} and LAI_{max} , on peak simulated B_{ag} and on the models scores during the senescence period with respect to the disaggregated LAI observations. The results are given for the validated départements, i.e. those presenting a significant correlation (p value < 0.01) of B_{agX} with Agreste straw cereal grain yield observations. Results for all 45 départements are given in brackets and in italics. Parameter values resulting from the optimisation are in bold. Because simulated LAI_{max} and B_{agX} vary from one year to another, spatial median values are based on median temporal values across the considered 15-year period.

	Basic ISBA	Inverse modelling	Original LDAS	LDAS tuning
Number of départements presenting significant positive correlations (p value < 0.01)	18	16	21	24
MaxAWC (mm)	132 \pm 2 (132 \pm 2)	153 \pm 40 (111 \pm 44)	132 \pm 2 (132 \pm 2)	133 \pm 46 (129 \pm 44)
N_L (%)	1.30 (constant value)	1.05 \pm 0.20 (1.05 \pm 0.20)	1.30 (constant value)	1.30 (constant value)
B_{agX} (kg m ⁻²)	0.99 \pm 0.05 (1.01 \pm 0.07)	0.96 \pm 0.16 (0.89 \pm 0.16)	0.96 \pm 0.07 (0.93 \pm 0.11)	0.98 \pm 0.17 (0.97 \pm 0.17)
Peak B_{ag} (kg m ⁻²)	1.20 \pm 0.05 (1.22 \pm 0.07)	1.18 \pm 0.09 (1.14 \pm 0.13)	1.20 \pm 0.10 (1.17 \pm 0.14)	1.19 \pm 0.18 (1.17 \pm 0.18)
LAI_{max} (m ² m ⁻²)	3.84 \pm 0.29 (3.84 \pm 0.30)	3.83 \pm 0.47 (3.59 \pm 0.46)	4.17 \pm 0.26 (3.98 \pm 0.3)	4.15 \pm 0.53 (3.95 \pm 0.52)
LAI RMSE (m ² m ⁻²)	1.6 \pm 0.1 (1.6 \pm 0.2)	1.4 \pm 0.2 (1.2 \pm 0.2)	1.2 \pm 0.1 (1.3 \pm 0.1)	1.1 \pm 0.2 (1.1 \pm 0.1)
Median LAI increments (m ² m ⁻²)			0.06 \pm 0.28 (-0.03 \pm 0.33)	-0.01 \pm 0.03 (-0.01 \pm 0.03)

Table 2. Impact of N_L on MaxAWC retrieval using a single-parameter inverse modelling technique. The retrieved median MaxAWC and LAI RMSE are given for all 45 départements together with their standard deviation.

N_L (%)	1.05	1.30	1.55	2.05	2.55
Number of départements presenting significant positive correlations (p value < 0.01)	16	13	12	6	3
MaxAWC (mm)	110 \pm 44	110 \pm 44	99 \pm 43	99 \pm 41	88 \pm 40
LAI RMSE (m ² m ⁻²)	1.2 \pm 0.2	1.2 \pm 0.2	1.3 \pm 0.2	1.4 \pm 0.2	1.5 \pm 0.2

133 \pm 46 mm for significant départements) is close to the standard value used in ISBA (132 \pm 2 mm) but the standard deviation is much larger. This shows that LDAS tuning is able to generate spatial variability in MaxAWC values.

A similar degree of variability is obtained by inverse modelling, but the retrieved MaxAWC presents much lower values for all 45 départements: 111 \pm 44 mm. On the other hand, a much larger value of 153 \pm 40 mm is found for the 16 validated départements. The retrieved N_L (1.05 \pm 0.20) is smaller than the default value of 1.30%. The role of N_L in the optimisation is discussed in Sect. 4.1.

Figure 6 shows the impact of optimising MaxAWC on the mean annual LAI cycle, with respect to the observed annual LAI cycle over the 45 départements. Inverse modelling tends to produce a smaller LAI_{max} median value (3.59 m² m⁻² for all 45 départements) than basic ISBA simulations or LDAS simulations (3.84 and 3.98 m² m⁻², respectively). Inverse modelling tends to reduce simulated LAI in May and June,

while the LDAS simulations (either original LDAS or LDAS tuning) are much closer to the observations.

The two optimisation methods succeed in reducing the LAI RMSE of the basic ISBA simulations (1.6 m² m⁻² for all 45 départements). With optimised MaxAWC, the tuned LDAS annual mean LAI cycle is closer to the observations than LAI resulting from inverse modelling, with LAI RMSE equal to 1.1 m² m⁻² for LDAS tuning, as against 1.2 m² m⁻² for inverse modelling.

3.4 Validation

Agricultural GY statistics (Sect. 2.3) are used for validation. The optimisation is considered as successful in départements where the correlation between yearly time series of B_{agX} and GY is significant (p value < 0.01). Table 1 shows that even without tuning MaxAWC, the integration of LAI in ISBA by the original LDAS permits an increase in the number of départements where p value < 0.01 from 18 in basic ISBA simulations to 21. LDAS tuning further increases this number to

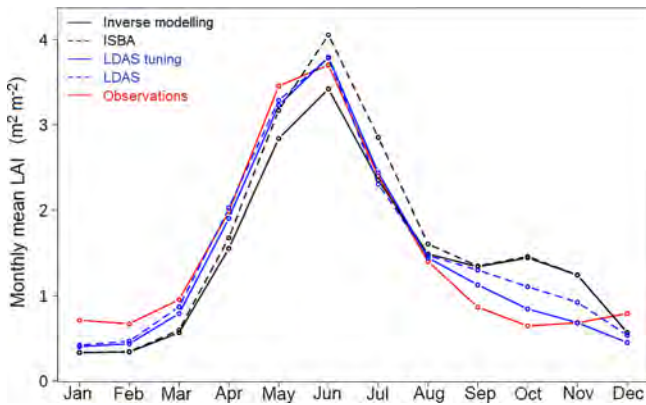


Figure 6. Mean LAI annual cycle of straw cereals over France (45 départements) during the 1999–2013 period: satellite-derived observations (red line); basic ISBA simulation (dark dashed line); original LDAS simulation (blue dashed line); inverse modelling simulation (solid dark line); LDAS tuning simulation (solid blue line).

24 départements. With only 16 validated départements, inverse modelling is not able to outperform the original LDAS simulations.

Time series of mean scaled anomalies of B_{agX} and GY are shown in Fig. 7 for all 45 départements before and after inverse modelling or LDAS tuning. The marked negative anomalies (< -1) in 2001, 2003 and 2011 are represented well after LDAS tuning. On the other hand, the impact of sunlight deficit and low temperatures during the growing period of 2001 cannot be represented well after inverse modelling. The marked negative GY anomaly observed in 2007 is not very well represented by the model. Moreover, Fig. 7 shows that parameter tuning does not significantly improve R^2 values. Basic ISBA and original LDAS simulations present R^2 values of 0.65 and 0.80, as against 0.65 and 0.82 after inverse modelling and LDAS tuning, respectively.

Figure 8 further shows that the interannual variability of B_{agX} is markedly better represented using LDAS tuning. The scaled modelled B_{agX} and the scaled GY observations averaged over 45 départements present a R^2 value of 0.82, against 0.65 for inverse modelling. Considering only the successfully validated départements, more similar R^2 values are observed: 0.88 and 0.80, respectively. Figure 9 presents the spatial correlation between the scaled B_{agX} and the scaled GY observations averaged over the 15-year period considered in this study. Considering the 45 départements, $R^2 = 0.61$ for LDAS tuning and $R^2 = 0.58$ for inverse modelling. Again, LDAS tuning supersedes inverse modelling, including when the comparison is limited to successfully validated départements, with R^2 values of 0.74 and 0.63, respectively.

It must be noted that all the correlations presented in Figs. 8 and 9 are significant, with all p values smaller than 0.001.

In addition to GY data, we made an attempt to use the satellite-derived GLEAM evapotranspiration product (Mi-

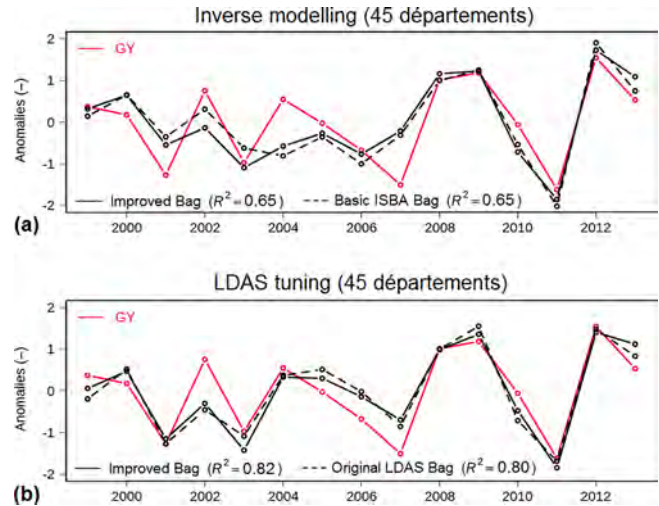


Figure 7. Scaled GY observation anomalies (A_{SGY}) and scaled simulated B_{agX} anomalies (A_{SBagX}) after LAI observation integration for all 45 départements: (a) inverse modelling and (b) LDAS tuning. Red lines are for observations, dark lines are for simulations, dark dashed line is for the original un-tuned simulations. The fraction of explained variance by A_{SBagX} is $R^2 = 0.65$ for inverse modelling, and 0.82 for LDAS tuning.

ralles et al., 2011) but very poor correlations were obtained for most départements (the median R^2 value was less than 0.06). On the other hand, good correlations were found for photosynthesis using the GPP FLUXNET-MTE product described in Jung et al. (2009). With respect to basic ISBA simulations, GPP RMSE was nearly systematically improved by the original LDAS simulations, and LDAS tuning drastically reduced the largest RMSE values, observed in southwestern France (see Figs. S2 and S3 in the Supplement).

3.5 Impact of the optimisation technique on MaxAWC estimates

Differences in validation results can be caused by uncertainties in Agreste GY observations or by the difficulty in upscaling the observations and the simulations (Sect. 2.6). In order to limit this effect, we further compared the MaxAWC estimates and the simulated vegetation variables for a subset of the départements corresponding to the 15 départements which are validated for both inverse modelling and LDAS tuning. Table S3 shows that for this subset of départements, MaxAWC values are similar: 154 ± 40 and 156 ± 40 mm, respectively. On the other hand, vegetation variables are more realistically simulated after LDAS tuning: median LAI RMSE is $1.2 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ as against $1.4 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ for inverse modelling. The median LAI_{max} value is much larger for LDAS tuning: $4.35 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$, against $3.85 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ for inverse modelling. However, peak B_{ag} values are similar: 1.26 kg m^{-2} for LDAS tuning and 1.23 kg m^{-2} for inverse modelling.

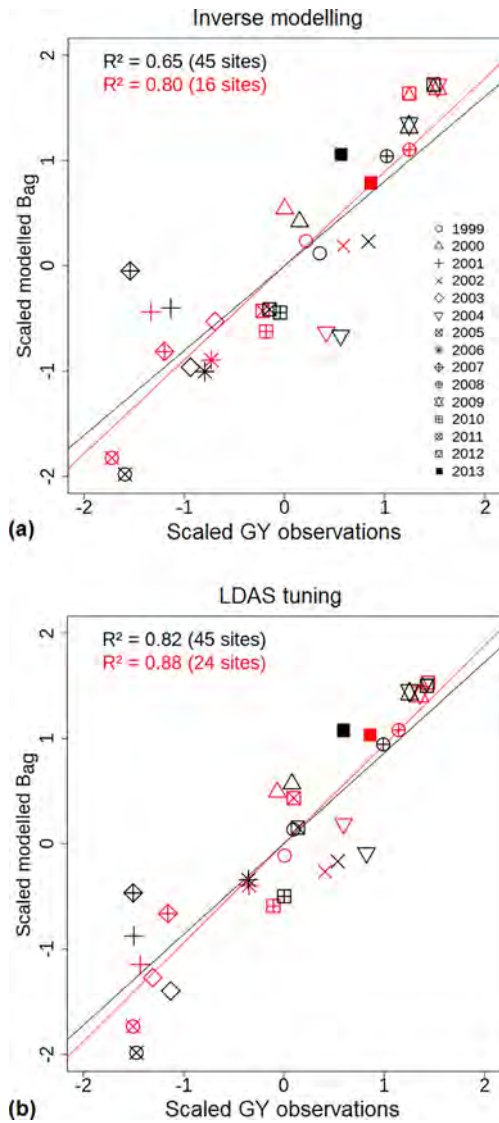


Figure 8. Temporal correlation between A_{sBagX} and A_{sGY} for (red symbols) départements presenting significant positive correlations (p value < 0.01) between simulated B_{agX} and GY and (red and black symbols) all 45 départements, and for (a) inverse modelling and (b) LDAS tuning.

The similarity in MaxAWC estimates and the contrasting simulated LAI values are illustrated in Fig. 10. Analysed LAI from LDAS tuning is closer to the LAI observations than the simulated LAI resulting from inverse modelling. The MaxAWC estimates are slightly smaller for inverse modelling and correlate very well with the MaxAWC estimates from LDAS tuning ($R^2 = 0.81$). The latter result is also valid when all 45 départements are considered, with $R^2 = 0.72$.

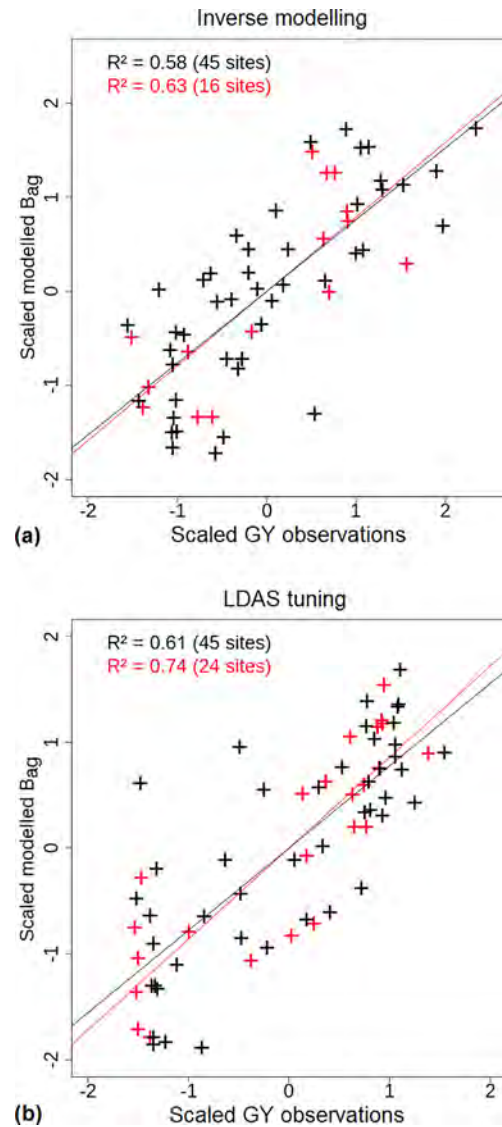


Figure 9. As in Fig. 8, except for spatial correlation.

4 Discussion

4.1 What is the added value of the LDAS?

The LDAS approach leads to more realistic simulations of LAI (see Fig. 10) and slightly improves Bag simulations (Figs. 7–10). In addition, N_L does not need to be determined because LAI is directly constrained by the LAI observations.

Minimising analysis increments to estimate MaxAWC is a much more complex approach than inverse modelling. Overall, MaxAWC estimates from the two methods are relatively consistent (see Sect. 3.5) but inverse modelling tends to produce smaller values. On the other hand, GY observations show that the simulated vegetation variables are more realistically simulated after LDAS tuning than after inverse modelling. This can be explained by a better capability of the

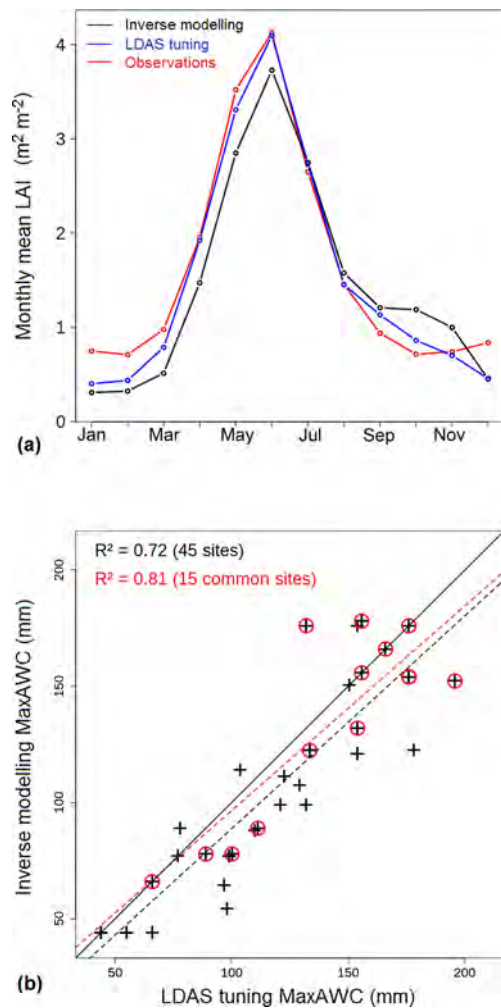


Figure 10. Inverse modelling vs. LDAS tuning: (a) mean LAI annual cycle for 15 validated départements with both methods from satellite-derived observations (red line), inverse modelling (dark line) and LDAS tuning (blue line); (b) MaxAWC comparison for (+) all 45 départements ($R^2 = 0.72$) and for (red circles) the 15 common départements ($R^2 = 0.81$).

LDAS to use the observations to drive the model trajectory: the sequential assimilation of LAI is able to constrain the simulated LAI values.

It can be shown that the impact of tuning N_L in the inverse modelling method can be significant. Table 2 presents MaxAWC and LAI RMSE values obtained from inverse modelling when only one parameter, MaxAWC, is optimised. Results are shown for five values of N_L ranging from 1.05 to 2.55 %. The number of validated départements drops when N_L increases, from 16 at $N_L = 1.05$ % to only 3 at $N_L = 2.55$ %. At the same time, the MaxAWC estimates tend to present smaller values, down to 88 ± 40 mm at $N_L = 2.55$ %. This result can be explained by the fact that larger values of either MaxAWC or N_L tend to increase LAI_{max} (Fig. 3).

Improving the simulation of vegetation variables has a positive impact on the quality of simulated hydrological variables such as evapotranspiration and soil moisture (Szczypta et al., 2012). Therefore, the larger MaxAWC values obtained from LDAS tuning (129 ± 44 mm) are likely to be more realistic than those obtained from inverse modelling (111 ± 44 mm).

4.2 Are MaxAWC estimates and simulated peak B_{ag} realistic?

Independent MaxAWC estimates confirm that the MaxAWC values obtained from LDAS tuning (129 ± 44 mm) are more realistic than those obtained from inverse modelling (111 ± 44 mm). On the other hand, the two techniques give similar median B_{agX} values (Table 1).

In order to verify the MaxAWC values derived from LAI observations, we extracted MaxAWC values from a map produced by l'Institut National de la Recherche Agronomique (INRA) at a spatial resolution of $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$. This map was established using pedotransfer functions based on soil physical properties information such as soil texture, soil depth, bulk density and organic matter (Al Majou et al., 2008). A given local MaxAWC value corresponds to a soil typological unit (STU). The $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$ soil mapping units may contain several STUs and the STU fraction is known. We computed weighted-average MaxAWC values for every $35 \times 35 \text{ km}$ grid cell. The resulting INRA MaxAWC values of the 45 départements present a median value of 151 mm and a standard deviation of 54 mm.

The median peak B_{ag} values are about 1.2 kg m^{-2} in all simulations. This is consistent with total maximum above-ground biomass values for cereals, which range between 1.1 and 1.7 kg m^{-2} (e.g. Loubet et al., 2011). Because B_{agX} corresponds to the mean B_{ag} above 90 % of the peak B_{ag} value (Sect. 2.7), median B_{agX} values are smaller than peak B_{ag} and do not exceed 1 kg m^{-2} (Table 1).

4.3 Are LAI satellite data suitable for the optimisation of MaxAWC?

Our results show that using disaggregated LAI observations is key.

The optimisation methods used in this study are based on disaggregated LAI satellite data and the quality of the results depends on the reliability of the observation data set. The MaxAWC parameter is a crucial parameter for the senescence period, between LAI_{max} and harvesting (Fig. 4). Because LAI_{max} is related to a large extent to MaxAWC (Fig. 3d), an underestimation of observed maximum LAI values would force the retrieval method to underestimate MaxAWC.

Figure 11 compares the mean of annual maximum values of raw LAI and disaggregated LAI for the 45 départements and for 1225 km^2 grid cells. Using disaggregated

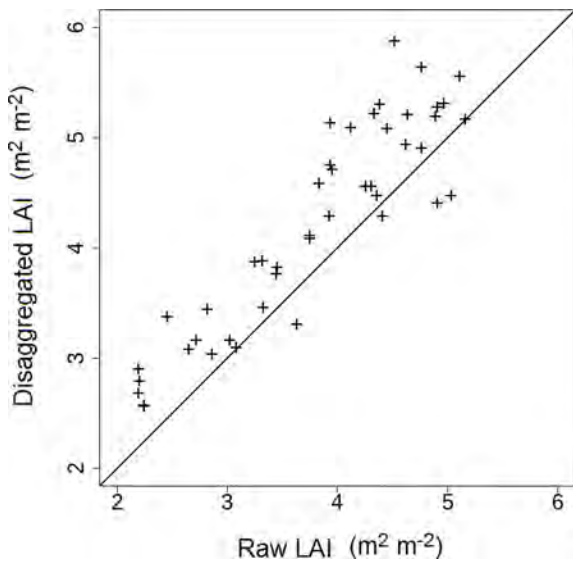


Figure 11. Comparison of mean annual LAI_{max} of the raw GEOV1 product and of the disaggregated GEOV1 product.

LAI increases the observed value of maximum LAI by up to 40 % with respect to raw LAI. The mean difference is $0.43 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$. This mitigates a marked underestimation of the MaxAWC estimates. As shown in Table S3, the MaxAWC values obtained from LDAS tuning ($110 \pm 38 \text{ mm}$) and from inverse modelling ($83 \pm 30 \text{ mm}$) are much lower (15 to 25 %) than those retrieved using disaggregated LAI observations. Moreover, the number of validated départements using GY observations presenting significant positive correlation is reduced: only 10 and 18 for inverse modelling and LDAS tuning, as against 16 and 24 with disaggregated LAI, respectively. Also, peak B_{ag} values (for all 45 départements) are smaller: 1.01 and 1.08 kg m^{-2} , against 1.14 and 1.17 kg m^{-2} with disaggregated LAI, respectively.

4.4 Can model simulations predict the relative gain or loss of agricultural production during extreme years?

The continuous constraint on the model applied by the LDAS on simulated vegetation variables allows the indirect representation of adverse effects. This is illustrated in Fig. 7: the negative anomaly of 2007 is much better represented by the LDAS than by simple ISBA simulations.

The observed disaggregated LAI and GY in Fig. 2 show that 2004, 2008, 2009 and 2012 were favourable years for straw cereal production, while 2001, 2003, 2007 and 2011 were unfavourable years. Unfavourable conditions for straw cereal production were caused by droughts, by excess of water, or by a deficit in solar radiation. For example, the 2000–2001 winter was characterised by extensive floods and by a deficit of solar irradiance until the end of the spring. These climate events markedly affected plant growth especially in

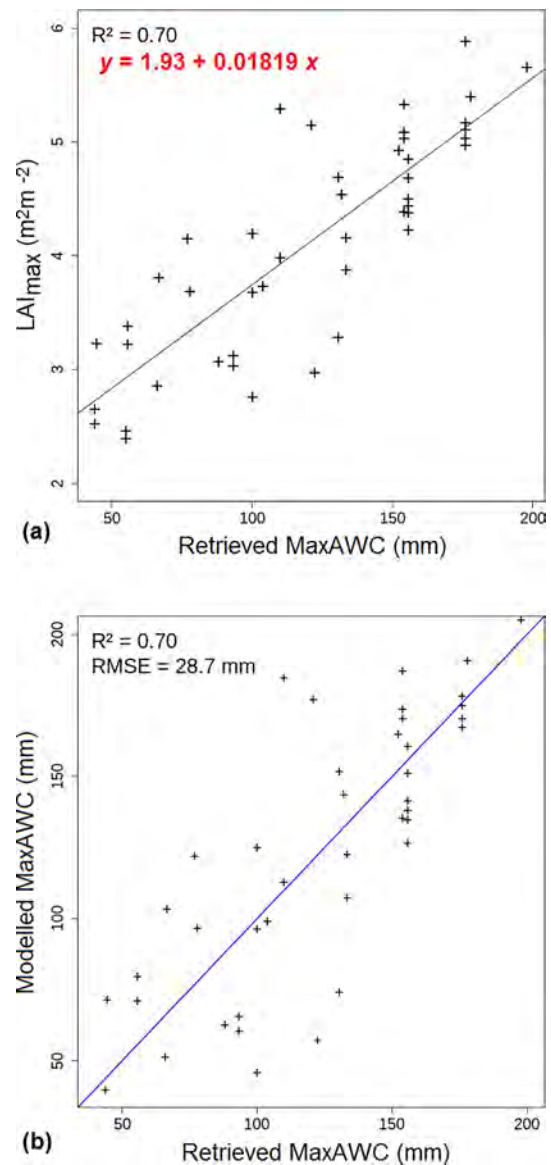


Figure 12. Use of median observed annual maximum of LAI to retrieve MaxAWC for all 45 départements: (a) linear regression relationship between maximum LAI and the LDAS tuning MaxAWC estimates; (b) MaxAWC estimates derived from the statistical model using maximum LAI observations as a predictor vs. the LDAS tuning MaxAWC estimates.

northern France (Agreste Bilan, 2001). The 2003 and 2011 years were particularly warm, with a marked precipitation deficit at springtime (Agreste Bilan, 2003, 2011). Concerning 2007, although climate conditions were favourable to plant growth during spring, extremely wet conditions occurred at the end of the growing season. This triggered accessibility issues and disease development (Agreste Bilan, 2007). These processes limiting biomass production in response to an excess of water are not represented in the ISBA model.

4.5 Can observed LAI characteristics be used to estimate MaxAWC?

We show that satellite-derived LAI observations have potential to map MaxAWC very simply.

We investigated the use of a simple statistical analysis of the disaggregated LAI observations to estimate MaxAWC. Figure 3 shows that there is a marked relationship between MaxAWC and the simulated LAI_{max} and LAI CV. To what extent are these relationships observable?

In order to answer this question, we used the LDAS tuning MaxAWC estimates as a reference data set. We compared the observed median annual maximum LAI and LAI CV with MaxAWC. No significant correlation could be shown for LAI CV, with R^2 smaller than 0.2. On the other hand, a very good correlation ($R^2 = 0.70$ for all 45 départements) was found for median annual maximum LAI (Fig. 12). Using this simple linear regression model, MaxAWC can be estimated with a RMSE of 28.7 mm. A very similar result is obtained considering only the 24 validated départements for LDAS tuning. The modelled MaxAWC values are given in Table S2 (see Supplement).

5 Conclusions

Satellite data are used to optimise a key parameter of the ISBA land surface model for straw cereals in France: the maximum available soil water content, MaxAWC. Two optimisation methods are used. Inverse modelling consists in minimising the LAI RMSE and LDAS tuning consists in minimising LAI analyses increments. The added value of the optimisation is evaluated using simulated above-ground biomass, through its correlation with in situ grain yield observations.

It is found that disaggregated LAI observations during the senescence are more informative than raw LAI observations and than LAI observations during the growing phase. The best results are obtained using LDAS tuning: the simulated above-ground biomass correlates better with grain yield observations, and the retrieved MaxAWC values are more realistic. It is shown that LDAS simulations can predict the relative gain or loss of agricultural production during extreme years, much better than model simulations even after parameter optimisation.

Finally, it is shown that median annual maximum disaggregated LAI observations correlate with MaxAWC estimates over France. This simple metric derived from LAI observations could be used to map MaxAWC. More research is needed to investigate to what extent this conclusion holds for other regions of the world and other vegetation types.

Data availability. The satellite-derived observations are freely accessible from the Copernicus Global Land Service (<http://land.copernicus.eu/global/>; Copernicus, 2015). The WFDEI atmospheric variables can be downloaded on an ftp site at IIASA, Vienna (<ftp://rfddata:forceDATA@ftp.iiasa.ac.at>; Weedon et al., 2015). The Agreste portal (<http://agreste.agriculture.gouv.fr/>; Agreste, 2015) provides annual statistical surveys over France.

Appendix A: Nomenclature

List of symbols

$A_{s,BagX}$	Scaled anomaly of B_{agX} of a given year (–)
$A_{s,GY}$	Scaled anomaly of GY of a given year (z score) (–)
AWC	Simulated available soil water content (kg m^{-2})
B_{ag}	Simulated living above-ground biomass (kg of dry matter m^{-2})
B_{agX}	Maximum of simulated living above-ground biomass (kg of dry matter m^{-2})
CV	Coefficient of variation (%)
D_{\max}	Maximum leaf-to-air saturation deficit (kg kg^{-1})
F_s	Soil moisture stress function
g_m	Mesophyll conductance in well-watered conditions (mm s^{-1})
GY	Annual grain yields of crops (kg m^{-2})
LAI	Leaf area index ($\text{m}^2 \text{m}^{-2}$)
LDAS	Land data assimilation system
LSM	Land surface model
MaxAWC	Maximum available soil water content (mm or kg m^{-2})
NIT	Photosynthesis-driven plant growth version of ISBA-A-gs
N_L	Leaf nitrogen concentration (% of leaf dry mass)
SLA	Specific leaf area ($\text{m}^2 \text{kg}^{-1}$)
WUE	Leaf-level water use efficiency (ratio of net assimilation of CO_2 to leaf transpiration)
Z_r	Depth of the root zone layer (m)
Greek symbols	
ρ	Water density (kg m^{-3})
θ	Volumetric soil water content ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)
θ_{Fc}	Volumetric soil water content at field capacity ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)
θ_{Wilt}	Volumetric soil water content at wilting point ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)

The Supplement related to this article is available online at <https://doi.org/10.5194/hess-21-4861-2017-supplement>.

Competing interests. The authors declare that they have no conflict of interest.

Acknowledgements. The work of Hélène Dewaele was supported by CNES and by M eteo-France. The work of Simon Munier was supported by European Union Seventh Framework Programme (FP7/2007–2013) under grant agreement no. 603608, “Global Earth Observation for integrated water resource assessment” (earthH2Observe). The work of Nabil Laanaia was supported by the Belgian MASC BELSPO project under contract no. BR/121/A2/MASC. The authors would like to thank the Copernicus Global Land service for providing the satellite-derived LAI products.

Edited by: Hannah Cloke

Reviewed by: two anonymous referees

References

- Agreste: Annual statistical surveys over France, available at: <http://agreste.agriculture.gouv.fr/> (last access: September 2017), 2015.
- Agreste Bilans: Agreste, Publications, Chiffres et Données No. 11, Bilan conjoncturel de l’année agricole 2001, 16 pp., available at: www.agreste.agriculture.gouv.fr/IMG/pdf/BILAN2001NOTE.pdf (last access: February 2017), 2001.
- Agreste Bilans: Agreste, Publications, Chiffres et Données Agriculture, Bilan conjoncturel Novembre 2003, 2 pp., available at: <http://agreste.agriculture.gouv.fr/IMG/pdf/conjenc10311.pdf> (last access: February 2017), 2003.
- Agreste Bilans: Agreste, Publications, Chiffres et Données No. 10–11, Bilan conjoncturel 2007, 40 pp., available at: www.agreste.agriculture.gouv.fr/IMG/pdf/bilan2007note.pdf (last access: February 2017), 2007.
- Agreste Bilans: Agreste, Publications, Chiffres et Données Agriculture No. 7, Bilan conjoncturel 2011, 45 pp., available at: www.agreste.agriculture.gouv.fr/IMG/pdf_bilan2011note.pdf (last access: February 2017), 2011.
- Albergel, C., Calvet, J.-C., Mahfouf, J.-F., Rüdiger, C., Barbu, A. L., Lafont, S., Roujean, J.-L., Walker, J. P., Crapeau, M., and Wigneron, J.-P.: Monitoring of water and carbon fluxes using a land data assimilation system: a case study for southwestern France, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 14, 1109–1124, <https://doi.org/10.5194/hess-14-1109-2010>, 2010.
- Al Majou, H., Bruand, A., Duval, O., Le Bas, C., and Vauer, A.: Prediction of soil water retention properties after stratification by combining texture, bulk density and the type of horizon, *Soil Use Manage.*, 24, 383–391, <https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.2008.00180.x>, 2008.
- Barbu, A. L., Calvet, J.-C., Mahfouf, J.-F., Albergel, C., and Lafont, S.: Assimilation of Soil Wetness Index and Leaf Area Index into the ISBA-A-gs land surface model: grassland case study, *Biogeosciences*, 8, 1971–1986, <https://doi.org/10.5194/bg-8-1971-2011>, 2011.
- Barbu, A. L., Calvet, J.-C., Mahfouf, J.-F., and Lafont, S.: Integrating ASCAT surface soil moisture and GEOV1 leaf area index into the SURFEX modelling platform: a land data assimilation application over France, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 18, 173–192, <https://doi.org/10.5194/hess-18-173-2014>, 2014.
- Baret, F., Weiss, M., Lacaze, R., Camacho, F., Makhmara, H., Pacholczyk, P., and Smets, B.: GEOV1: LAI and FAPAR essential climate variables and FCOVER global time series capitalizing over existing products, Part I: Principles of development and production, *Remote Sens. Environ.*, 137, 299–309, 2013.
- Bastos, A., Gouveia, C. M., Trigo, R. M., and Running, S. W.: Analysing the spatio-temporal impacts of the 2003 and 2010 extreme heatwaves on plant productivity in Europe, *Biogeosciences*, 11, 3421–3435, <https://doi.org/10.5194/bg-11-3421-2014>, 2014.
- Becker-Reshef, I., Vermote, E., Lindeman, M., and Justice, C.: A generalized regression-based model for forecasting winter wheat yields in Kansas and Ukraine using MODIS data, *Remote Sens. Environ.*, 114, 1312–1323, 2010.
- Cabelguenne, M. and Debaeke, P.: Experimental determination and modelling of the soil water extraction capacities of crops of maize, sunflower, soya bean, sorghum and wheat, *Plant Soil*, 202, 175–192, <https://doi.org/10.1023/A:1004376728978>, 1998.
- Calvet, J.-C.: Investigating soil and atmospheric plant water stress using physiological and micrometeorological data, *Agr. Forest Meteorol.*, 103, 229–247, 2000.
- Calvet, J.-C. and Soussana, J.-F.: Modelling CO₂-enrichment effects using an interactive vegetation SVAT scheme, *Agr. Forest Meteorol.*, 108, 129–152, 2001.
- Calvet, J.-C., Noilhan, J., Roujean, J., Bessemoulin, P., Cabelguenne, M., Olioso, A., and Wigneron, J.: An interactive vegetation SVAT model tested against data from six contrasting sites, *Agr. Forest Meteorol.*, 92, 73–95, 1998.
- Calvet, J.-C., Gibelin, A.-L., Roujean, J.-L., Martin, E., Le Moigne, P., Douville, H., and Noilhan, J.: Past and future scenarios of the effect of carbon dioxide on plant growth and transpiration for three vegetation types of southwestern France, *Atmos. Chem. Phys.*, 8, 397–406, <https://doi.org/10.5194/acp-8-397-2008>, 2008.
- Calvet, J.-C., Lafont, S., Cloppet, E., Souverain, F., Badeau, V., and Le Bas, C.: Use of agricultural statistics to verify the interannual variability in land surface models: a case study over France with ISBA-A-gs, *Geosci. Model Dev.*, 5, 37–54, <https://doi.org/10.5194/gmd-5-37-2012>, 2012.
- Canal, N., Calvet, J.-C., Decharme, B., Carrer, D., Lafont, S., and Pigeon, G.: Evaluation of root water uptake in the ISBA-A-gs land surface model using agricultural yield statistics over France, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 18, 4979–4999, <https://doi.org/10.5194/hess-18-4979-2014>, 2014.
- Capa-Morocho, M., Rodriguez-Fonseca, B., and Ruiz-Ramoz, M.: Crop yields as a bioclimatic index of El Nino impact in Europe: Crop forecast implications, *Agr. Forest Meteorol.*, 198–199, 42–52, <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2014.07.012>, 2014.
- Carrer, D., Roujean, J.-L., Lafont, S., Calvet, J.-C., Boone, A., Decharme, B., Delire, C., and Gastellu-Etchegorry, J.-P.: A canopy radiative transfer scheme with explicit FAPAR for the interactive vegetation model ISBA-A-gs: im-

- pact on carbon fluxes, *J. Geophys. Res.-Biogeo.*, 118, 1–16, <https://doi.org/10.1002/jgrg.20070>, 2013.
- Carrer, D., Meurey, C., Ceamanos, X., Roujean, J.-L., Calvet, J.-C., and Liu, S.: Dynamic mapping of snow-free vegetation and bare soil albedos at global 1 km scale from 10-year analysis of MODIS satellite products, *Remote Sens. Environ.*, 140, 420–432, <https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.08.041>, 2014.
- Copernicus: LAI GEOV1, available at: <http://land.copernicus.eu/global/> (last access: September 2017), 2015.
- Crow, W. T., Kumar, S. V., and Bolten, J. D.: On the utility of land surface models for agricultural drought monitoring, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 16, 3451–3460, <https://doi.org/10.5194/hess-16-3451-2012>, 2012.
- Dee, D. P., Uppala, S. M., Simmons, A. J., Berrisford, P., Poli, P., Kobayashi, S., Andrae, U., Balmaseda, M. A., Balsamo, G., Bauer, P., Bechtold, P., Beljaars, A. C. M., van de Berg, L., Bidlot, J., Bormann, N., Delsol, C., Dragani, R., Fuentes, M., Geer, A. J., Haimberger, L., Healy, S. B., Hersbach, H., Hólm, E. V., Isaksen, L., Kallberg, P., Köhler, M., Matricardi, M., McNally, A. P., Monge-Sanz, B. M., Morcrette, J. J., Park, B. K., Peubey, C., de Rosnay, P., Tavolato, C., Thépaut, J.-N., and Vitart, F.: The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system, *Q. J. Roy. Meteor. Soc.*, 137, 553–597, <https://doi.org/10.1002/qj.828>, 2011.
- Eitzinger, J., Trnka, M., Hösche, J., Žalud, Z., and Dubrovský, M.: Comparison of CERES, WOFOST and SWAP models in simulating soil water content during growing season under different soil conditions, *Ecol. Model.*, 171, 223–246, <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2003.08.012>, 2004.
- Faroux, S., Kaptué Tchuenté, A. T., Roujean, J.-L., Masson, V., Martin, E., and Le Moigne, P.: ECOCLIMAP-II/Europe: a twofold database of ecosystems and surface parameters at 1 km resolution based on satellite information for use in land surface, meteorological and climate models, *Geosci. Model Dev.*, 6, 563–582, <https://doi.org/10.5194/gmd-6-563-2013>, 2013.
- Ferrant, S., Gascoin, S., Veloso, A., Salmon-Monviola, J., Claverie, M., Rivalland, V., Dedieu, G., Demarez, V., Ceschia, E., Probst, J.-L., Durand, P., and Bustillo, V.: Agro-hydrology and multi-temporal high-resolution remote sensing: toward an explicit spatial processes calibration, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 18, 5219–5237, <https://doi.org/10.5194/hess-18-5219-2014>, 2014.
- Folberth, C., Skalsky, R., Moltchanova, E., Balkovic, J., Azevedo, L. B., Obersteiner, M., and van der Velde, M.: Uncertainty in soil data can outweigh climate impact signals in global crop yield simulations, *Nat. Commun.*, 7, 11872, <https://doi.org/10.1038/ncomms11872>, 2016.
- Ford, T. W., Harris, E., and Quiring, S. M.: Estimating root zone soil moisture using near-surface observations from SMOS, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 18, 139–154, <https://doi.org/10.5194/hess-18-139-2014>, 2014.
- Ghilain, N., Arboleda, A., Sepulcre-Cantò, G., Batelaan, O., Ardö, J., and Gellens-Meulenberghs, F.: Improving evapotranspiration in a land surface model using biophysical variables derived from MSG/SEVIRI satellite, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 16, 2567–2583, <https://doi.org/10.5194/hess-16-2567-2012>, 2012.
- Gibelin, A.-L., Calvet, J.-C., Roujean, J.-L., Jarlan, L., and Los, S. O.: Ability of the land surface model ISBA-A-gs to simulate leaf area index at the global scale: Comparison with satellites products, *J. Geophys. Res.*, 111, D18102, <https://doi.org/10.1029/2005JD006691>, 2006.
- Ichii, K., Wang, W., Hashimoto, H., Yang, F., Votava, P., Michaelis, A. R., and Nemani, R. R.: Refinement of rooting depths using satellite based evapotranspiration seasonality for ecosystem modelling in California, *Agr. Forest Meteorol.*, 149, 1907–1918, 2009.
- Jung, M., Reichstein, M., and Bondeau, A.: Towards global empirical upscaling of FLUXNET eddy covariance observations: validation of a model tree ensemble approach using a biosphere model, *Biogeosciences*, 6, 2001–2013, <https://doi.org/10.5194/bg-6-2001-2009>, 2009.
- Kowalik, W., Dabrowska-Zielinska, K., Meroni, M., Raczka, U. T., and de Wit A.: Yield estimation using SPOT-VEGETATION products: A case study of wheat in European countries, *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf.*, 32, 228–239, <https://doi.org/10.1016/j.jag.2014.03.011>, 2014.
- Krinner, G., Viovy, N., de Noblet-Ducoudré, N., Ogée, J., Polcher, J., Friedlingstein, P., Ciais, P., Sitch, S., and Prentice, I. C.: A dynamic global vegetation model for studies of the coupled atmosphere-biosphere system, *Global Biogeochem. Cy.*, 19, GB1015, <https://doi.org/10.1029/2003GB002199>, 2005.
- Li, S., Wheeler, T., Challinor, A., Lin, E., Ju, H., and Xu, Y.: The observed relationship between wheat and climate in China, *Agr. Forest Meteorol.*, 150, 1412–1419, <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2010.07.003>, 2010.
- Loubet, B., Laville, P., Lehuger, S., Larmanou, E., Flécharde C., Mascher N., Genermont S., Roche R., Ferrara, R. M., Stella, P., Personne, E., Durand B., Decuq C., Flura, D., Masson, S., Fanucci, O., Rampon, J.-N., Siemens, J., Kindler, R., Gabrielle B., Schruppf, M., and Cellier P.: Carbon, nitrogen and Greenhouse gases budgets over a four years crop rotation in northern France, *Plant Soil*, 343, 109–137, <https://doi.org/10.1007/s11104-011-0751-9>, 2011.
- Masson, V., Le Moigne, P., Martin, E., Faroux, S., Alias, A., Alkama, R., Belamari, S., Barbu, A., Boone, A., Bouyssel, F., Brousseau, P., Brun, E., Calvet, J.-C., Carrer, D., Decharme, B., Delire, C., Donier, S., Essaouini, K., Gibelin, A.-L., Giordani, H., Habets, F., Jidane, M., Kerdrain, G., Kourzeneva, E., Lafaysse, M., Lafont, S., Lebeaupin Brossier, C., Lemonsu, A., Mahfouf, J.-F., Marguinaud, P., Mokhtari, M., Morin, S., Pigeon, G., Salgado, R., Seity, Y., Taillefer, F., Tanguy, G., Tulet, P., Vincendon, B., Vionnet, V., and Voltaire, A.: The SURFEXv7.2 land and ocean surface platform for coupled or offline simulation of earth surface variables and fluxes, *Geosci. Model Dev.*, 6, 929–960, <https://doi.org/10.5194/gmd-6-929-2013>, 2013.
- Miralles, D. G., Holmes, T. R. H., De Jeu, R. A. M., Gash, J. H., Meesters, A. G. C. A., and Dolman, A. J.: Global land-surface evaporation estimated from satellite-based observations, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 15, 453–469, <https://doi.org/10.5194/hess-15-453-2011>, 2011.
- Munier, S., Carrer, D., Planque, C., Camacho, F., Albergel, C., and Calvet, J.-C.: Satellite Leaf Area Index: global scale analysis of the tendencies per vegetation type over the last 17 years, *Remote Sens. Environ.*, submitted, 2017.
- Nachtergaele, F., van Velthuize, H., Verelst, L., Wiberg, D., Batjes, N., Dijkshoorn, K., van Engelen, V., Fischer, G., Jones, A., Montanarella, L., Petri, M., Prieler, S., Teixeira, E., and Shi, X.: Harmonized World Soil Database (version 1.2),

- 2012, available at: http://webarchive.iiasa.ac.at/Research/LUC/External-World-soil-database/HWSD_Documentation.pdf (last access: December 2014), 2012.
- Olesen, J. E., Trnka, M., Kersebaum, K. C., Skjelvag, A. O., Seguin, B., Peltonen-Sainio, P., Rossi, F., Kozyra, J., and Micale, F.: Impacts and adaptation of European crop production systems to climate change, *Euro. J. Agronomy.*, 34, 96–112, <https://doi.org/10.1016/j.eja.2010.11.003>, 2011.
- Piedallu, C., Gégout, J.-C., Bruand, A., and Seynave, I., Mapping soil water holding capacity over large areas to predict potential production of forest stands, *Geoderma*, 160, 355–366, <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2010.10.004>, 2011.
- Portoghese, I., Iacobellis, V., and Sivapalan, M.: Analysis of soil and vegetation patterns in semi-arid Mediterranean landscapes by way of a conceptual water balance model, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 12, 899–911, <https://doi.org/10.5194/hess-12-899-2008>, 2008.
- Quiroga, S., Fernández-Haddad, Z., and Iglesias, A.: Crop yields response to water pressures in the Ebro basin in Spain: risk and water policy implications, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 15, 505–518, <https://doi.org/10.5194/hess-15-505-2011>, 2011.
- Ritchie, J. T. and Otter, S.: Description and performance of CERES-wheat: A user-oriented wheat yield model, *ARS wheat yield project*, 38, 159–175, 1985.
- Rüdiger, C., Albergel, C., Mahfouf, J.-F., Calvet, J.-C., and Walker, J. P.: Evaluation of Jacobians for Leaf Area Index data assimilation with an extended Kalman filter, *J. Geophys. Res.*, 115, D09111, <https://doi.org/10.1029/2009JD012912>, 2010.
- Soylu, M. E., Istanbuluoglu, E., Lenters, J. D., and Wang, T.: Quantifying the impact of groundwater depth on evapotranspiration in a semi-arid grassland region, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 15, 787–806, <https://doi.org/10.5194/hess-15-787-2011>, 2011.
- Szczypta, C., Decharme, B., Carrer, D., Calvet, J.-C., Lafont, S., Somot, S., Faroux, S., and Martin, E.: Impact of precipitation and land biophysical variables on the simulated discharge of European and Mediterranean rivers, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 16, 3351–3370, <https://doi.org/10.5194/hess-16-3351-2012>, 2012.
- Szczypta, C., Calvet, J.-C., Maignan, F., Dorigo, W., Baret, F., and Ciais, P.: Suitability of modelled and remotely sensed essential climate variables for monitoring Euro-Mediterranean droughts, *Geosci. Model Dev.*, 7, 931–946, <https://doi.org/10.5194/gmd-7-931-2014>, 2014.
- Tanaka, K., Takizawa, H., Kume, T., Xu, J., Tantasirin, C., and Suzuki, M.: Impact of rooting depth of soil hydraulic properties on the transpiration peak of an evergreen forest in northern Thailand in the late dry season, *J. Geophys. Res.*, 109, D23107, <https://doi.org/10.1029/2004JD004865>, 2004.
- Van Dam, J. C., Huygen, J., Wesseling, J. G., Feddes, R. A., Kabat, P., Van Walsum, P. E. V., Groenendijk, P., and Van Diepen, C. A.: Theory of SWAP version 2.0. Simulation of water flow, solute transport and plant growth in the Soil–Water–Atmosphere–Plant environment, Report 71, Sub department of Water Resources, Wageningen University, Technical document, 45, 1997.
- Van Der Velde, M., Tubiello, N. F., Vrieling, A., and Bouraoui, F.: Impacts of extreme weather on wheat and maize in France: evaluating regional crop simulations against observed data, *Climatic Change*, 113, 751–765, <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0368-2> 2012.
- Van Diepen, C. A., Wolf, J., Van Keulen, H., and Rappoldt, C.: WOFOST: a simulation model of crop production, *Soil Use Manage.*, 5, 16–24, 1989.
- Wang, S., Fu, B. J., Gao, G. Y., Yao, X. L., and Zhou, J.: Soil moisture and evapotranspiration of different land cover types in the Loess Plateau, China, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 16, 2883–2892, <https://doi.org/10.5194/hess-16-2883-2012>, 2012.
- Weedon, G. P., Balsamo, G., Bellouin, N., Gomes, S., Best, M. J., and Viterbo, P.: The WFDEI meteorological forcing data set: WATCH Forcing Data methodology applied to ERA-Interim reanalysis data, *Water Resour. Res.*, 50, 7505–7514, <https://doi.org/10.1002/2014WR015638>, 2014.

Supplement of Hydrol. Earth Syst. Sci., 21, 4861–4878, 2017
<https://doi.org/10.5194/hess-21-4861-2017-supplement>
© Author(s) 2017. This work is distributed under
the Creative Commons Attribution 3.0 License.



Supplement of

Parameter optimisation for a better representation of drought by LSMs: inverse modelling vs. sequential data assimilation

Hélène Dewaele et al.

Correspondence to: Jean-Christophe Calvet (jean-christophe.calvet@meteo.fr)

The copyright of individual parts of the supplement might differ from the CC BY 3.0 License.

The Copernicus Global Land Service GEOV1 LAI product

Camacho et al. (2013) compared the GEOV1 LAI with in situ LAI observations and with different remote sensing products such as MODIS and CYCLOPES. They highlighted that: "The best accuracy and precision are observed for the GEOV1 LAI product. GEOV1 provides also very good agreement across the whole range of LAI values, with however only a slight underestimation for the highest values". They give the following scores for GEOV1 LAI with respect to ground observations over 30 crop, grass and forest sites in Europe, Africa and North America: $R^2 = 0.81$, $RMSE = 0.74 \text{ m}^2\text{m}^{-2}$.

Reference:

Camacho, F., Cernicharo, J., Lacaze, R., Baret, F., and Weiss, M.: GEOV1: LAI and FAPAR essential climate variables and FCOVER global time series capitalizing over existing products. Part2: Validation and intercomparison with reference products, *Remote Sens. Environ.*, 137, 310–329, 2013.

Key ISBA model parameters

Table S1. Default ISBA parameter values for straw cereals ("C3 crops") in SURFEX V8 for the considered 45 départements.

Parameter name	Symbol	Value	Units	Reference
Rooting depth	Zr	1.5	m	
Soil moisture at wilting point	θ_{Wilt}	0.12 to 0.28	$m^3 m^{-3}$	
Soil moisture at field capacity	θ_{Fc}	0.20 to 0.37	$m^3 m^{-3}$	
Soil moisture at saturation	θ_{Wsat}	0.42 to 0.48	$m^3 m^{-3}$	
Behaviour in dry conditions		drought-avoiding		Calvet et al. (2012)
Leaf nitrogen concentration (mass-based)	N_L	1.3	% of dry matter mass	Gibelin et al. (2006)
Maximum air saturation deficit	D_{max}	0.05	$kg kg^{-1}$	Gibelin et al. (2006)
Mesophyll conductance	g_m	1.75	$mm s^{-1}$	Canal et al. (2014)
Cuticular conductance	g_c	0.25	$mm s^{-1}$	Gibelin et al. (2006)
Minimum LAI value	LAI_{min}	0.3	$m^2 m^{-2}$	Gibelin et al. (2006)

References:

Calvet, J.-C., Lafont, S., Cloppet, E., Souverain, F., Badeau, V., and Le Bas, C.: Use of agricultural statistics to verify the interannual variability in land surface models: a case study over France with ISBA-A-gs, *Geosci. Model Dev.*, 5, 37–54, doi:10.5194/gmd-5-37-2012, 2012.

Canal, N., Calvet, J.-C., Decharme, B., Carrer, D., Lafont, S., and Pigeon, G.: Evaluation of root water uptake in the ISBA-A-gs land surface model using agricultural yield statistics over France, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 18, 4979–4999, 2014.

Gibelin, A.-L., Calvet, J.-C., Roujean, J.-L., Jarlan, L., and Los, S. O.: Ability of the land surface model ISBA-A-gs to simulate leaf area index at the global scale: Comparison with satellites products, *J. Geophys. Res.*, 111, D18102, doi:10.1029/2005JD006691, 2006.

Disaggregated satellite LAI vs. grain yield observations

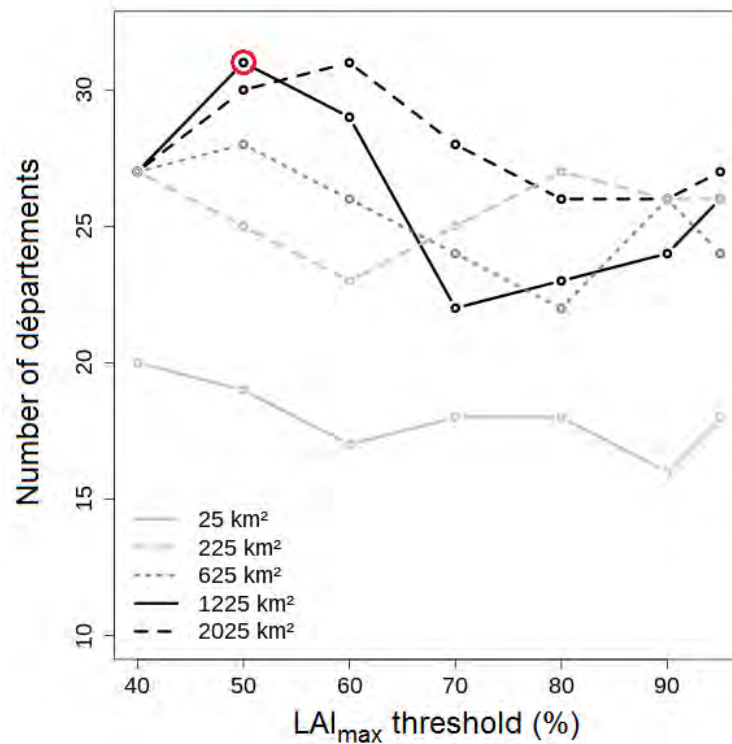


Figure S1. Number of départements presenting a significant correlation ($R^2 > 0.41$, F-test p-value < 0.01) between GY and the mean annual maximum disaggregated LAI derived from satellite observations ($LAI_{o_{max}}$). The $LAI_{o_{max}}$ value corresponds to the mean LAI values above a given fraction of the observed maximum annual LAI ($LAI_{o_{max}}$ threshold). Results are shown for five area size values. The red circle indicates a configuration for 31 départements: area size of 1225 km² (35 km × 35 km) and a $LAI_{o_{max}}$ threshold of 50 %.

Characteristics of the 45 départements 35 km × 35 km grid cells

Table S2. Fraction of straw cereals given by ECOCLIMAP (Faroux et al., 2013), median satellite-derived LAI_{max} , maximum B_{ag} simulated by ISBA, retrieved MaxAWC using LDAS tuning, modelled MaxAWC using a statistical model based on median satellite-derived LAI_{max} , INRA MaxAWC estimates from pedotransfer functions (Al Majou et al., 2008). The simulated B_{agX} of the 24 highlighted départements present a significant correlation with Agreste GY observations.

Département		Longitude	Latitude	Straw cereals (%)	Observed LAI_{max} ($m^2 m^{-2}$)	Maximum B_{ag} ($kg m^{-2}$)	LDAS MaxAWC (mm)	Modelled MaxAWC (mm)	INRA MaxAWC (mm)
Yvelines	(78)	1.63	48.89	76	5.66	1.31	196	205	178 ± 34
Cher	(18)	1.86	47.17	68	5.89	1.31	178	218	129 ± 23
Seine et Marne	(77)	3.26	48.82	92	5.40	1.33	176	191	178 ± 34
Somme	(80)	2.39	49.97	100	5.17	1.32	176	178	66 ± 13
Essonne	(91)	2.28	48.32	95	5.11	1.30	176	175	207 ± 12
Val d'Oise	(95)	1.73	49.18	83	5.03	1.31	176	171	66 ± 13
Marne	(51)	3.71	49.32	93	4.97	1.26	166	167	102 ± 8
Aisne	(02)	3.06	49.83	98	4.38	1.26	156	135	207 ± 50
Eure	(27)	0.53	49.17	52	4.93	1.30	156	165	207 ± 56
Nord	(59)	3.29	50.04	100	4.85	1.34	156	161	207 ± 50
Loir et Cher	(41)	1.53	47.96	95	4.50	1.19	154	141	207 ± 12
Loiret	(45)	2.07	48.18	90	4.44	1.24	154	138	207 ± 12
Meuse	(55)	5.43	48.71	55	5.33	1.17	154	187	72 ± 45
Orne	(61)	0.76	48.67	54	5.09	1.25	154	174	178 ± 34
Pas de Calais	(62)	2.95	50.19	100	4.39	1.30	154	135	207 ± 50
Sarthe	(72)	0.78	47.95	75	4.68	1.25	154	151	178 ± 34
Yonne	(89)	3.24	47.53	51	5.03	1.24	154	171	72 ± 8
Eure et Loir	(28)	1.85	48.10	88	4.23	1.19	150	127	207 ± 12
Ardennes	(08)	4.16	49.60	76	4.16	1.17	133	123	66 ± 13
Indre et Loir	(37)	0.58	47.66	73	3.88	1.20	133	107	151 ± 35
Nièvre	(58)	3.13	47.45	49	4.69	1.23	132	152	72 ± 8
Oise	(60)	3.06	49.68	71	4.54	1.23	132	144	207 ± 50
Vendée	(85)	-1.04	46.40	62	3.28	1.12	129	74	124 ± 0
Maine et Loire	(49)	0.16	47.51	18	2.97	0.93	122	57	72 ± 35
Meurthe et Moselle	(54)	5.90	49.20	66	5.15	1.14	121	177	72 ± 45
Indre	(36)	1.13	46.95	70	3.98	1.10	111	113	77 ± 28
Moselle	(57)	6.23	49.19	35	5.29	1.15	110	185	162 ± 25
Haute Marne	(52)	4.78	48.65	37	3.73	1.05	104	99	179 ± 37
Deux Sèvres	(79)	0.01	46.14	76	3.12	1.01	100	66	68 ± 13
Haute Saone	(70)	5.47	47.49	34	4.20	1.05	99	125	151 ± 9
Vienne	(86)	0.72	46.58	66	3.68	1.03	99	96	72 ± 32
Aude	(11)	2.09	43.21	49	2.76	0.92	98	46	164 ± 25
Charente Maritimes	(17)	-0.92	46.04	63	3.03	1.02	97	61	66 ± 24
Charente	(16)	0.11	46.07	60	3.07	0.96	89	63	66 ± 24
Cote d'Or	(21)	5.14	47.21	68	4.15	0.99	78	122	151 ± 9
Allier	(03)	3.22	46.09	45	3.69	1.17	77	97	84 ± 7
Dordogne	(24)	0.57	44.71	14	2.86	0.88	66	51	84 ± 27
Puy de Dôme	(63)	3.21	45.94	65	3.81	1.07	66	104	122 ± 4
Haute Garonne	(31)	1.79	43.57	92	2.46	0.76	55	29	84 ± 27
Jura	(39)	5.34	46.99	46	3.22	0.84	55	71	151 ± 9
Saône et Loire	(71)	5.02	46.92	35	3.38	0.87	55	80	151 ± 9
Tarn	(81)	1.79	43.64	70	2.39	0.74	55	25	84 ± 27
Ariège	(09)	1.30	43.28	26	3.23	0.91	44	72	84 ± 27
Gers	(32)	1.00	43.71	76	2.65	0.78	44	40	84 ± 43
Tarn et Garonne	(82)	1.00	43.85	47	2.52	0.76	44	33	140 ± 26

Impact of the optimization

Table S3. Impact of the optimization (either inverse modelling or LDAS tuning) on parameter values (spatial median values \pm standard deviation) of the ISBA model (MaxAWC and N_L), on the median value of B_{agX} and LAI_{max} , on peak simulated B_{ag} , and on the models scores during the senescence period with respect to the disaggregated LAI observations. The results are given for the validated départements, i.e. those presenting a significant correlation (p -value < 0.01) of B_{agX} with Agreste straw cereal grain yield observations. Results for all 45 départements are given in brackets and in italics. The * symbol indicates results obtained using raw LAI observations (undisaggregated). Results for 15 validated départements for both inverse modelling or LDAS tuning are in square brackets. Parameter values resulting from the optimization are in bold. Because simulated LAI_{max} and B_{agX} vary from one year to another, spatial median values are based on median temporal values across the considered 15 year period.

	Basic ISBA	Inverse modelling	Original LDAS	LDAS tuning
Number of départements presenting significant positive correlations (p -value < 0.01)	18 9*	16 10*	21 18*	24 18*
MaxAWC (mm)	132 \pm 2 (132 \pm 2)	153 \pm 40 (111 \pm 44) 113 \pm 40* (83 \pm 30)* [154 \pm 40]	132 \pm 2 (132 \pm 2)	133 \pm 46 (129 \pm 44) 106 \pm 42* (110 \pm 38)* [156 \pm 40]
N_L (%)	1.30 (constant value)	1.05 \pm 0.20 (1.05 \pm 0.20) (1.05 \pm 0.17)* [1.05 \pm 0.20]	1.30 (constant value)	1.30 (constant value)
B_{agX} (kg m ⁻²)	0.99 \pm 0.05 (1.01 \pm 0.07) 0.99 \pm 0.03* (1.01 \pm 0.07)*	0.96 \pm 0.16 (0.89 \pm 0.16) 0.74 \pm 0.15* (0.75 \pm 0.11)* [0.98 \pm 0.16]	0.96 \pm 0.07 (0.93 \pm 0.11) 0.88 \pm 0.10* (0.88 \pm 0.13)*	0.98 \pm 0.17 (0.97 \pm 0.17) 0.74 \pm 0.17* (0.84 \pm 0.17)* [1.04 \pm 0.14]
Peak B_{ag} (kg m ⁻²)	1.20 \pm 0.05 (1.22 \pm 0.07) 1.22 \pm 0.05* (1.22 \pm 0.07)*	1.18 \pm 0.09 (1.14 \pm 0.13) 1.01 \pm 0.13* (1.01 \pm 0.11)* [1.23 \pm 0.08]	1.20 \pm 0.10 (1.17 \pm 0.14) 1.12 \pm 0.12* (1.12 \pm 0.16)*	1.19 \pm 0.18 (1.17 \pm 0.18) 1.01 \pm 0.22* (1.08 \pm 0.19)* [1.26 \pm 0.12]
LAI_{max} (m ² m ⁻²)	3.84 \pm 0.29 (3.84 \pm 0.30) 3.52 \pm 0.45* (3.73 \pm 0.38)*	3.83 \pm 0.47 (3.59 \pm 0.46) 3.67 \pm 0.37* (3.42 \pm 0.40)* [3.85 \pm 0.45]	4.17 \pm 0.26 (3.98 \pm 0.3) 3.91 \pm 0.35* (3.99 \pm 0.39)*	4.15 \pm 0.53 (3.95 \pm 0.52) 3.51 \pm 0.61* (3.81 \pm 0.55)* [4.35 \pm 0.40]
LAI RMSE (m ² m ⁻²)	1.6 \pm 0.1 (1.6 \pm 0.2) 1.8 \pm 0.3* (1.7 \pm 0.3)*	1.4 \pm 0.2 (1.2 \pm 0.2) 1.2 \pm 0.2* (1.2 \pm 0.2)* [1.4 \pm 0.2]	1.2 \pm 0.1 (1.3 \pm 0.1) 1.2 \pm 0.1* (1.2 \pm 0.1)*	1.1 \pm 0.2 (1.1 \pm 0.1) 1.0 \pm 0.1* (1.1 \pm 0.1)* [1.2 \pm 0.1]
Median LAI increments (m ² m ⁻²)			0.06 \pm 0.28 (-0.03 \pm 0.33) -0.21 \pm 0.33* (-0.21 \pm 0.33)*	-0.01 \pm 0.03 (-0.01 \pm 0.03) -0.01 \pm 0.12* (-0.01 \pm 0.08)* [-0.01 \pm 0.03]

Impact of LAI assimilation on GPP

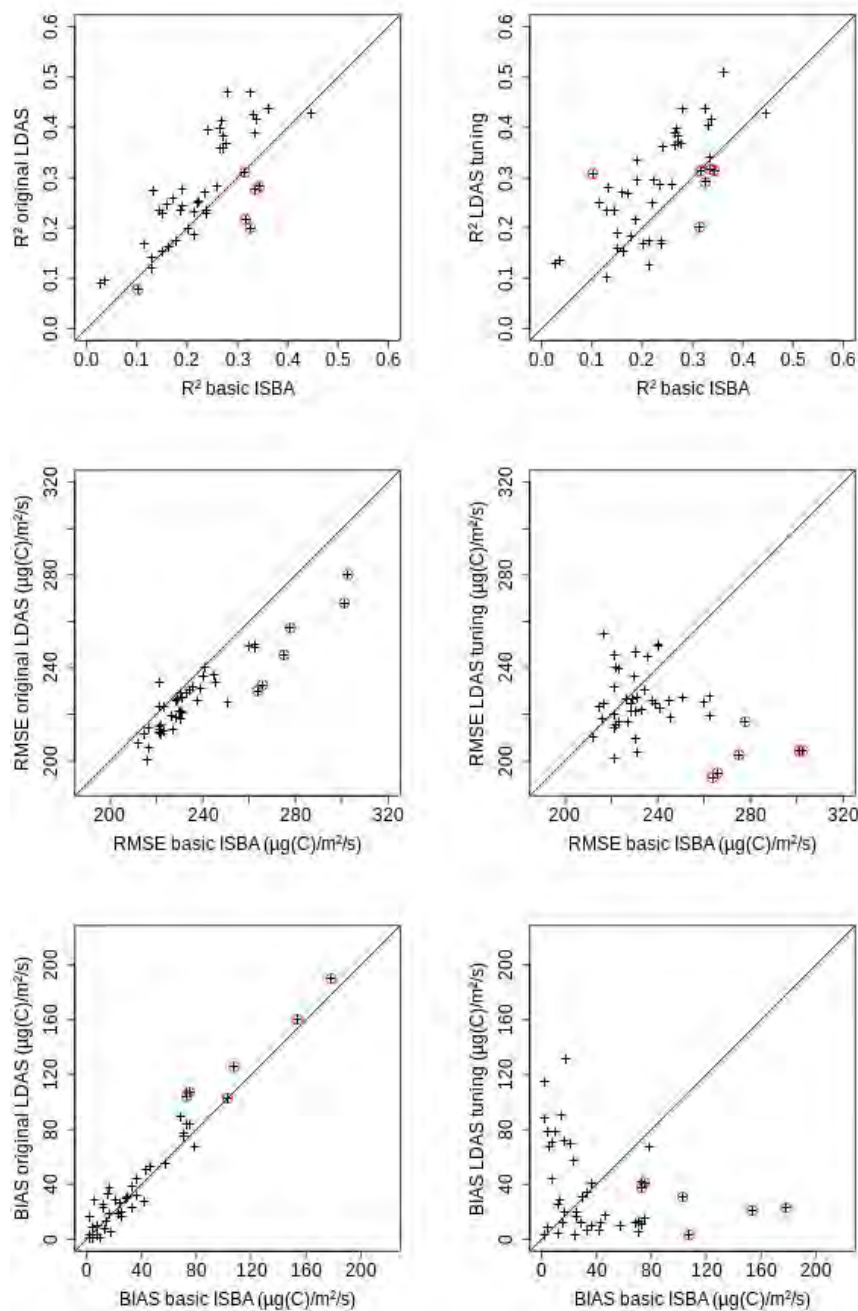


Figure S2. GPP scores based on the FLUXNET-MTE product (Jung et al., 2009) calculated from 1 May to 31 July over the 1999-2013 period for all 45 départements: (left) original LDAS and (right) tuned LDAS vs. basic ISBA simulations; (top) R², (middle) RMSE and (bottom) mean bias. Red circles are for 6 départements in southwestern France, markedly impacted by LDAS tuning: Ariège, Dordogne, Gers, Haute-Garonne, Tarn, and Tarn-et-Garonne.

Reference:

Jung, M., Reichstein, M., and Bondeau, A.: Towards global empirical upscaling of FLUXNET eddy covariance observations: validation of a model tree ensemble approach using a biosphere model, *Biogeosciences*, 6, 2001–2013, doi:10.5194/bg-6-2001-2009, 2009.

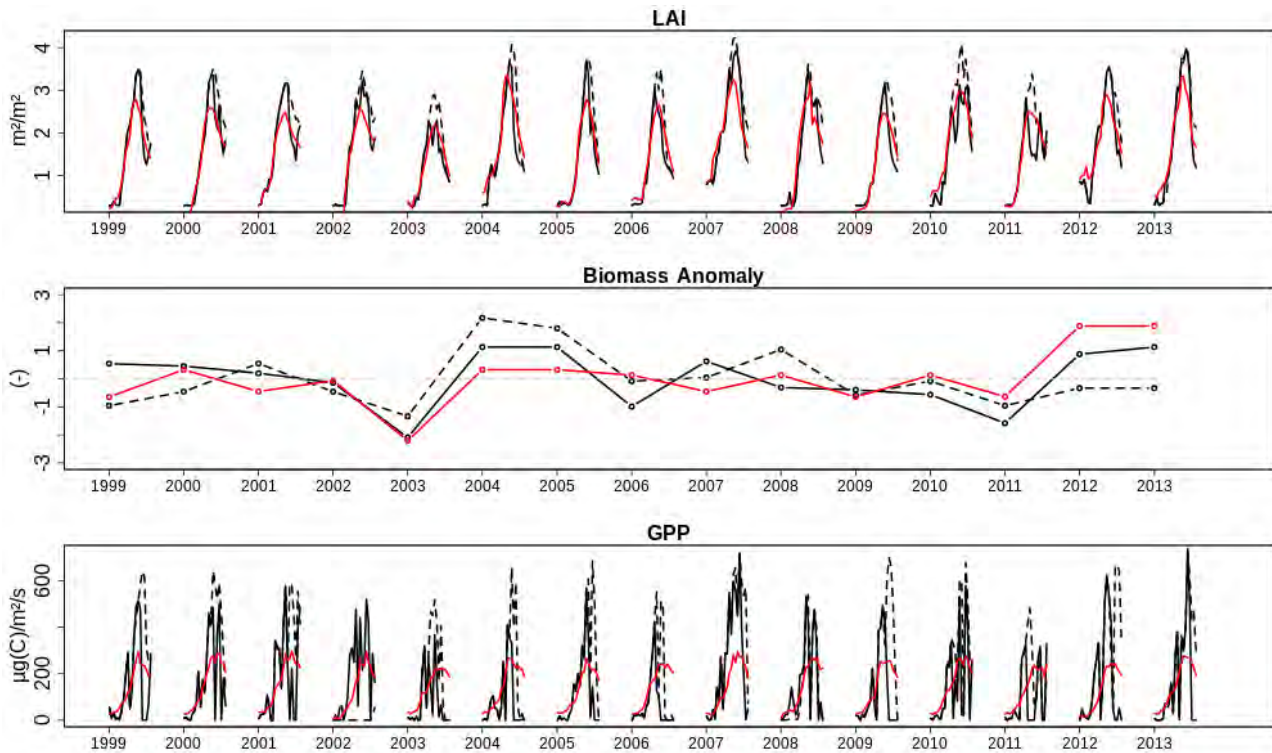


Figure S3. Impact of LAI assimilation at the Gers département straw cereal spot on (top) 10-day LAI values, (middle) scaled yearly maximum above-ground biomass anomalies, (bottom) daily GPP values, from 1999 to 2013; (red line) observations, (black dashed line) original LDAS, (black solid line) LDAS tuning.

For original LDAS and LDAS tuning at the Gers département straw cereal spot:

LAI RMSE values are 0.66 and $0.59 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$, respectively,

Maximum above-ground biomass R^2 values are 0.09 and 0.47, respectively,

GPP RMSE values are 245 and $202 \text{ } \mu\text{g m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, respectively.

4.3 Relation entre précipitations et réserve utile

La réserve utile dépend de paramètres du sol mais aussi de la capacité de la végétation à développer un système racinaire dans le sol. Cette propriété de la végétation est probablement liée au climat (Gao et al., 2014). Développer un système racinaire profond n'est « nécessaire » que s'il existe un déficit de précipitations durant la phase de croissance.

Afin d'examiner cette hypothèse, j'ai comparé, pour les 45 sites, la moyenne de la somme des précipitations au printemps (mois de mars, avril et mai) issues des forçages ERA-Interim utilisés, pour la période 1999-2013 avec les réserves utiles issues de la méthode de modélisation inverse, de la méthode LDAS et enfin du modèle linéaire basé sur les observations de valeurs maximales de LAI, appelé « modèle LAI » et décrit dans la section 5. Les trois diagrammes de dispersion sont présentés dans la Figure IV.8.

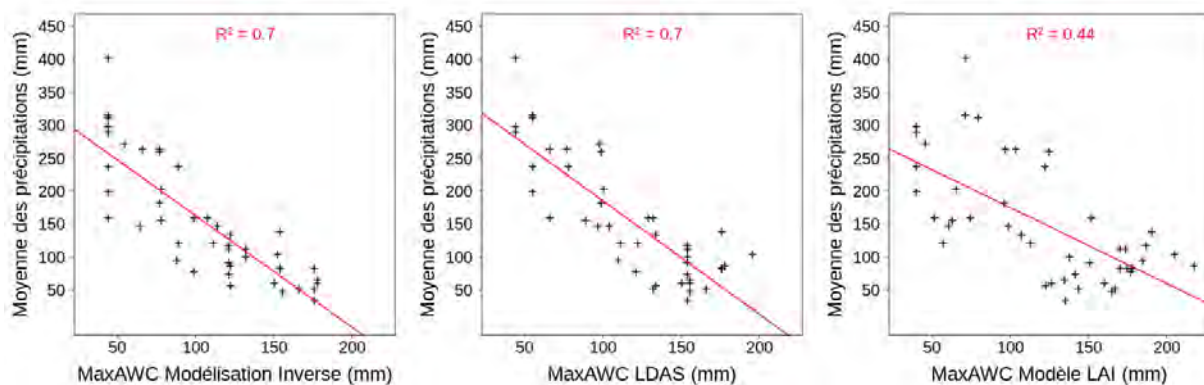


Figure IV.8 Comparaison de la moyenne des sommes des précipitations des mois de mars, avril et mai pour la période 1999-2013, avec les valeurs de MaxAWC issues de la méthode de modélisation inverse, du LDAS et du modèle LAI.

On observe une nette influence des précipitations sur la valeur de la réserve utile optimisée. Les corrélations sont toutes significatives (à une p-value < 0.01) : la valeur de R^2 est de 0.70 pour les MaxAWC issus de la modélisation inverse et du LDAS, et de 0.44 pour les MaxAWC « modèle LAI ». On remarque que pour les sites présentant des valeurs estimées de MaxAWC élevées, des faibles valeurs de moyenne des précipitations au printemps y sont observées, et inversement.

Dans les régions où les précipitations au printemps sont faibles, la plante va développer un système racinaire plus profond afin de pouvoir aller puiser l'eau présente en profondeur. Ce mécanisme d'adaptation de la végétation a été mis en évidence dans plusieurs études. Par exemple, Bastos et al. (2014) ont montré que la végétation des régions semi arides, s'est adaptée au manque d'eau en développant un système racinaire profond.

Inversement, les faibles réserves utiles associées aux fortes valeurs de moyenne des précipitations montreraient que la plante, dans des conditions en eau non limitées, n'a pas besoin de développer un système racinaire profond, l'eau étant disponible dans les horizons proches de la surface du sol.

Le calage de la réserve utile dans le modèle ISBA permet de rendre compte de la capacité des plantes à s'adapter selon les conditions en eau limitée ou non limitée.

4.4 Validation complémentaire de la méthode utilisée : la « Gross Primary Production »

Des produits indépendants ont été utilisés afin d'évaluer l'impact du calage de la réserve utile sur d'autres variables. De bonnes corrélations ont été mises en évidence entre les

Optimisation de paramètres pour une meilleure représentation des sècheresses :
modélisation inverse vs. assimilation séquentielle de données

produits journaliers de FLUXNET-MTE de production primaire brute de la végétation (ou « Gross Primary Production » (GPP) en anglais) décrit par Jung et al. (2009), et le modèle ISBA et LDAS (Figure IV.9). La GPP correspond à la photosynthèse. Le produit FLUXNET-MTE résulte de la combinaison de simulations et de mesures in situ des flux turbulents de CO₂ des stations du réseau FLUXNET. Différents scores, le R², le RMSE ainsi que le Biais, obtenus sur la période de mai à juillet pour la GPP simulée par le LDAS standard et par le LDAS optimisé, ont été comparés à ceux obtenus pour la GPP simulée par ISBA standard. Le RMSE est systématiquement amélioré par les simulations standard du LDAS comparé aux simulations standard du modèle ISBA.

Le calage de la réserve utile au sein du LDAS ne permet pas de réduire systématiquement le RMSE. Cependant, il permet de réduire considérablement les plus fortes erreurs (points cerclés de rouge dans la Figure IV.9). Ceci permet de confirmer la nécessité de caler la réserve utile et son impact positif sur d'autres variables clefs de la végétation.

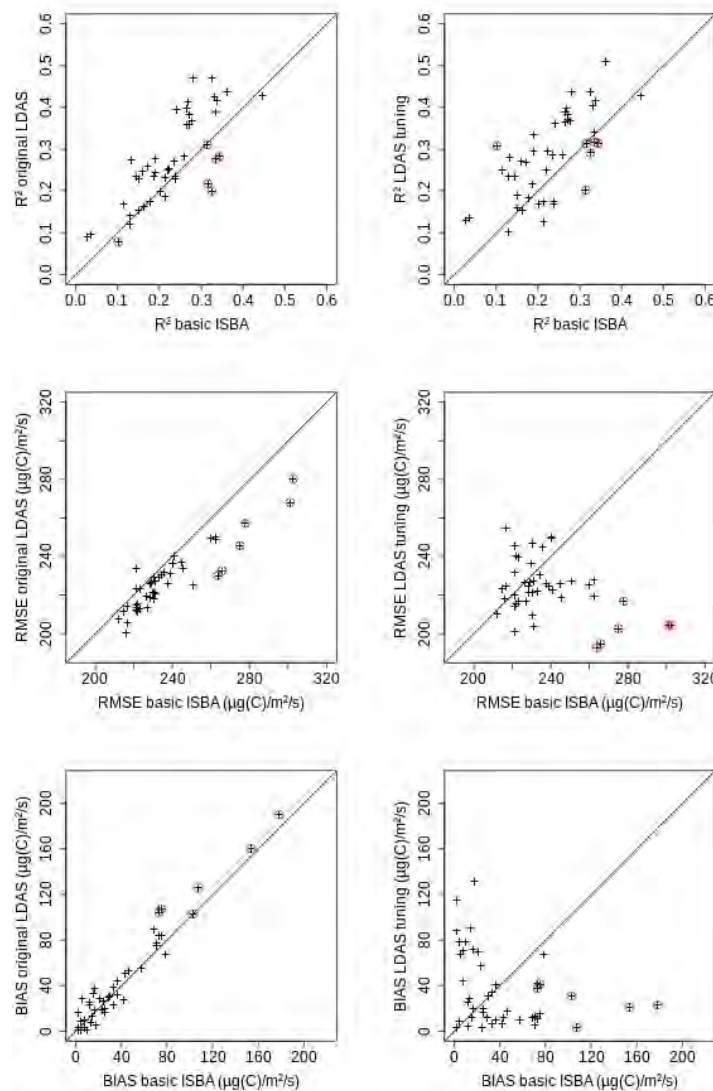


Figure IV.9 Validation fondée sur la photosynthèse journalière du produit FLUXNET. R², RMSE et BIAIS du LDAS standard et du LDAS optimisé vs. R², RMSE et BIAIS de ISBA standard. Les points cerclés de rouge représentent les points pour lesquels le RMSE a été particulièrement réduit par le calage de la réserve utile du LDAS comparés aux RMSE LDAS standard (Ariège, Dordogne, Gers, Tarn et Tarn-et-Garonne).

4.5 Conclusion

Deux méthodes intégrant des données satellitaires de LAI désagrégé dans le modèle ISBA-A-gs ont été utilisées afin d'estimer un paramètre clef de la végétation, le contenu maximum en eau du sol disponible pour la végétation (MaxAWC). 45 sites correspondant à 45 départements de cultures pluviales de céréales à paille en France sont considérés. Un autre objectif est de déterminer dans quelle mesure les données satellitaires peuvent être utilisées de manière à simuler la variabilité interannuelle de la production de céréales à paille avec un modèle qui n'est pas un modèle de culture.

La première méthode dite de modélisation inverse consiste à minimiser une fonction coût, dans ce cas : le RMSE. Les travaux de Canal et al. (2014) et Sreelash et al. (2017) ont confirmé l'efficacité de cette méthode pour l'estimation de paramètres tels que MaxAWC, améliorant ainsi les valeurs par défaut des modèles utilisés. La seconde méthode dite LDAS utilise l'assimilation séquentielle de données dans ISBA-A-gs (Albergel et al., 2010 et Barbu et al., 2011, 2014). La minimisation de la médiane des incréments du LAI analysé est utilisée afin de déterminer la valeur optimale de MaxAWC. J'ai montré que la période d'optimisation du cycle de la végétation la plus appropriée est la période de sénescence. En effet, c'est durant cette période que MaxAWC a le plus d'impact sur la manifestation des effets du stress hydrique sur la végétation. La valeur ajoutée de l'optimisation de MaxAWC est ensuite évaluée en comparant la biomasse simulée avec les rendements agricoles observés.

Dans un premier temps, j'ai mis en évidence la bonne corrélation entre la variabilité interannuelle des rendements et celle du LAI satellitaire non-désagrégé et désagrégé. Cela montre que les valeurs maximales de LAI satellitaires peuvent être considérées comme un proxy des rendements agricoles de céréales à paille avec une corrélation significative pour 31 départements sur 45.

Dans un second temps, j'ai utilisé les rendements pour évaluer les simulations, et pour évaluer l'impact de la désagrégation du LAI sur les résultats (voir le Tableau S3 de l'article).

L'utilisation des séries temporelles de LAI désagrégé (plutôt que le LAI brut) permet d'améliorer considérablement les résultats. En effet, le nombre de départements significativement corrélés avec les rendements agricoles est augmenté, et ceci pour les deux méthodes. La méthode de désagrégation développée par Carrer et al. (2014) permet d'obtenir le LAI spécifique d'une culture de céréales à paille par l'application d'un filtre de Kalman. Une meilleure représentation des valeurs maximales de LAI est apportée par la désagrégation et cela conduit à une amélioration des valeurs de MaxAWC optimisées, qui sont plus réalistes.

Les meilleurs résultats sont obtenus avec la méthode LDAS qui permet de corrélérer significativement la biomasse maximale simulée avec les rendements pour 53% des 45 départements contre 36% pour la méthode de modélisation inverse même si ce résultat est amélioré par rapport à l'étude précédente (Canal et al., 2014). De plus, les valeurs de MaxAWC et les valeurs maximales de biomasse simulées par la méthode LDAS sont plus réalistes. La représentation des années présentant des anomalies négatives de la production végétale causées par des sécheresses ou par un excès d'eau est aussi améliorée par la méthode LDAS, notamment lors de l'année 2007 où l'impact négatif sur la biomasse des conditions climatiques particulièrement pluvieuses n'est pas simulé spontanément par le modèle même après optimisation par la méthode de modélisation inverse. En effet, le modèle représente difficilement l'impact négatif des excès d'eau sur la production de biomasse, souvent lié au suivi de la parcelle par l'agriculteur (problème d'accessibilité aux parcelles, de maladies, etc., Tmka et al.(2015)). L'assimilation au fil de l'eau d'observations de LAI permet de corriger ce défaut intrinsèque du modèle.

Finalement, cette étude a permis de montrer une forte corrélation entre les valeurs de MaxAWC optimisées, avec la méthode LDAS notamment, et les valeurs maximales de LAI

Evaluation du modèle empirique sur la France : comparaison avec les réserves utiles obtenues par des fonctions de pédotransfert

satellites désagrégés avec $R^2 = 0.70$ pour les 45 départements. Ainsi, un simple modèle de régression linéaire basé uniquement sur des données satellitaires de LAI permettrait de cartographier directement MaxAWC. L'application de ce modèle empirique doit être évaluée pour des régions présentant une proportion importante de cultures de céréales à paille en dehors de la France telles que les Etats Unis et l'Ukraine, mais aussi pour d'autres types de végétation.

Une évaluation des méthodes utilisées et des réserves utiles optimisées par les produits GPP de FLUXNET-MTE (Jung et al., 2009), a été effectuée. Elle a permis de montrer l'impact positif des méthodes développées par, d'une part, l'amélioration systématique du RMSE des simulations standard du LDAS par rapport aux simulations standard du modèle ISBA et puis d'autre part, par la réduction drastique des plus fortes erreurs grâce au calage de la réserve utile au sein du LDAS.

5. Evaluation du modèle empirique sur la France : comparaison avec les réserves utiles obtenues par des fonctions de pédotransfert

Il existe des cartes de référence de la réserve utile en France, produite par l'INRA (Institut National de la Recherche Agronomique). Je les ai utilisées pour évaluer le « modèle LAI ».

5.1 Estimation de la réserve utile pour des couverts de céréales à paille à partir de données satellitaires de LAI

L'utilisation du LDAS pour l'estimation de la réserve utile pour les couverts de céréales à paille en France a permis de mettre en évidence une forte relation linéaire entre la valeur médiane des valeurs maximales annuelles de LAI observés désagrégés, et la réserve utile (Figure IV.10).

Evaluation du modèle empirique sur la France : comparaison avec les réserves utiles obtenues par des fonctions de pédotransfert

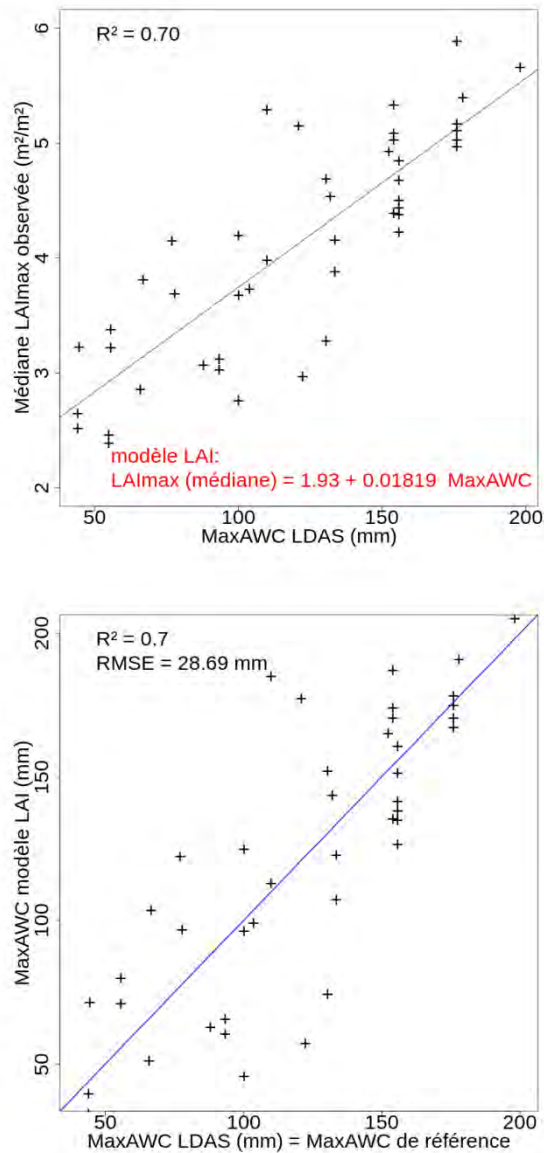


Figure IV.10 Lien entre la médiane des valeurs maximales de LAI et la RU optimisée par la méthode LDAS pour les 45 départements producteurs de céréales à paille

Cette relation mène au modèle de régression linéaire, que j'appelle « modèle LAI », qui permet d'estimer directement la réserve utile, MaxAWC, à partir des données satellitaires :

$$MaxAWC = 1.93 + 0.01819 \times Médiane[LAI_{max} observés] \quad (8)$$

De cette façon, une carte des réserves utiles des cultures de céréales à paille en France, peut être facilement obtenue (Figure IV.11). La médiane des maximums annuels de LAI pour la période 1999-2013 est extraite pour en déduire ensuite la réserve utile selon l'équation 8.

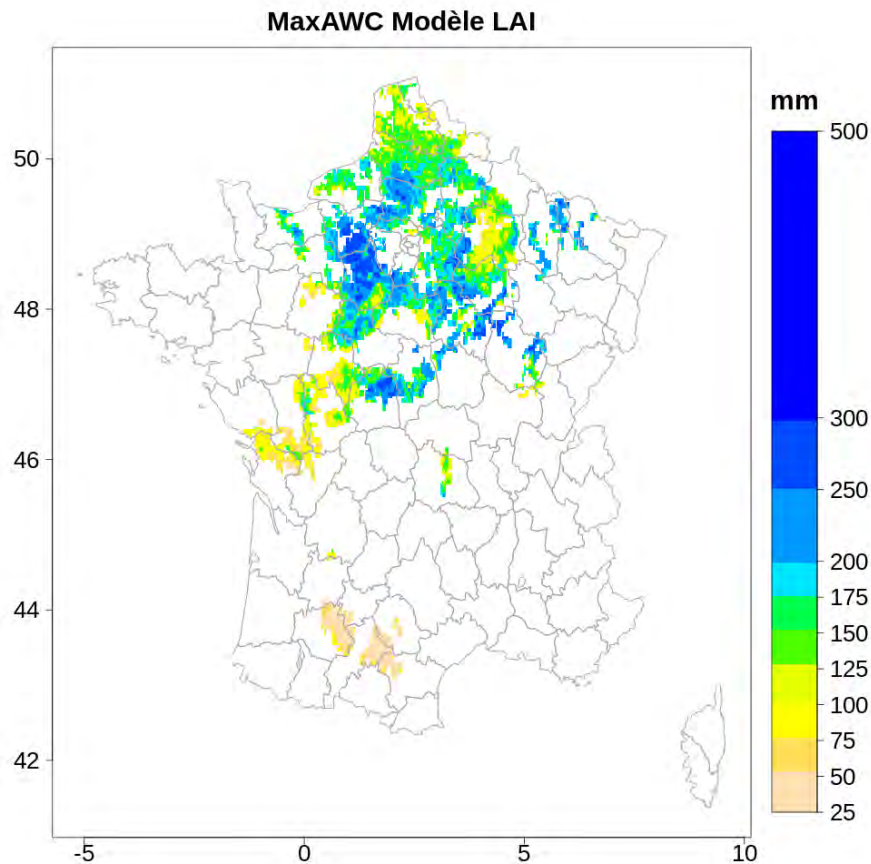


Figure IV.11 Réserve utile des céréales à paille en France obtenue à partir de données satellitaires de LAI

Afin de faire une évaluation de ces réserves utiles pour les céréales à paille estimée à partir de données satellitaires, une carte des réserves utiles obtenues à partir des classes de pédotransfert (Wosten et al., 1999 ; Al Majou et al., 2008) de l'INRA a été utilisée. J'ai confronté ces deux cartes issues d'approches différentes : l'une issue d'un modèle basé sur des données satellitaire représentant la végétation (dit « modèle LAI ») et l'autre issue d'une approche pédologique.

Cette carte a été réalisée à partir de la Base de Données Géographique des Sols d'Europe au 1/1 000 000 (CEC pour « Commission of European Communities » en anglais, 1985). Des unités cartographiques de sol (UCS) ou « Soil Mapping Unit » (SMU) en anglais, sont constituées d'unités typologiques de sol (UTS) ou « Soil Typological Unit » (STU) en anglais. Chaque UTS, déterminé selon la terminologie de la FAO, est décrit selon des paramètres pédologiques et physiques telles que la composition du sol en argile et en sable, la texture du sol, la densité apparente, la concentration en matière organique ou la profondeur. Les UCS peuvent regrouper plusieurs UTS auquel une fraction est affectée. L'application de fonctions de pédotransfert (Bouma et van Lanen, 1987 ; Al Majou et al., 2007 ; Bruand et al., 2003 et 2004 ; Wösten et al., 1999) permet d'estimer des paramètres difficilement mesurables comme les propriétés de rétention du sol à partir de paramètres observables. Les réserves utiles sont estimées par les classes de fonctions de pédotransfert de Wosten et al. (1999) et des classes de fonctions de pédotransfert de Al Majou et al. (2008) qui prennent en compte la texture, la densité apparente ainsi que les types d'horizons de chaque UTS.

Différentes corrections ont été apportées selon la prise en compte de cailloux dans l'horizon du sol participant ou non à la réserve utile (Tétégan et al., 2011), et de remontées capillaires.

Afin d'évaluer les réserves utiles issue du modèle LAI, les erreurs relatives sont calculées en prenant comme valeurs de référence celles, dans un premier temps, calculées à partir des classes de fonctions de pédotransfert de Wösten et al. (1999) et dans un deuxième temps celles obtenues par les classes de fonctions pédotransfert de Al Majou et al. (2008) selon l'équation suivante:

$$\text{Erreur Relative (\%)} = \frac{\text{MaxAWC (modèle LAI)} - \text{MaxAWC (INRA)}}{\text{MaxAWC (INRA)}} \times 100 \quad (9)$$

Avec MaxAWC (INRA) qui représente la médiane des réserves utiles auxquelles différentes corrections (cailloux et remontée capillaires) ont été appliquées. Quatre types de corrections ont été apportés :

- Calcul de la réserve utile sans cailloux et sans prise en compte des remontées capillaires (noté « RUPRS »)
- Calcul de la réserve utile sans cailloux et prise en compte des remontées capillaires (noté « RUPR ») ;
- Calcul de la réserve utile sur la profondeur de sol avec cailloux, cailloux sans réserve d'eau et prise en compte des remontées capillaires (noté « RUPRCX ») ;
- Calcul de la réserve utile sur la profondeur de sol avec cailloux, cailloux avec réserve d'eau et prise en compte des remontée capillaires (noté « RUPRCXH »).

La Figure IV.12 présente ces résultats sous forme de boîtes à moustache. La médiane des erreurs relatives avec pour référence Wösten et al. (1999) est de - 22 % et la médiane des erreurs relatives avec pour référence Al Majou est de 12 %. On observe une nette sous-estimation des réserves utiles par le modèle LAI par rapport aux réserves utiles Wösten avec 67 % des valeurs d'erreurs relatives négatives. Au contraire, les réserves utiles du modèle LAI sont souvent plus grandes que les réserves utiles Al Majou avec 59 % des valeurs des erreurs relatives positives.

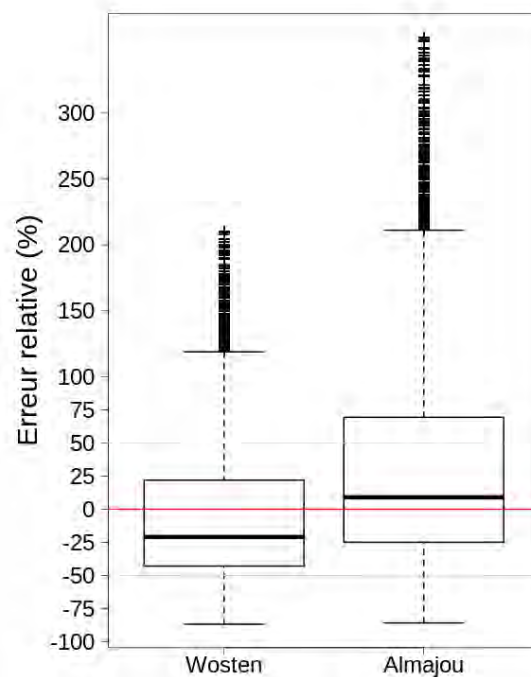


Figure IV.12 Boxplot des erreurs relatives en % entre les MaxAWC « modèle » et les MaxAWC « Wosten », et les «MaxAWC « Al Majou »

Les deux cartes des erreurs relatives sont présentées dans la Figure IV.13 et sont associées à la Tableau IV-1 qui présente la surface, exprimée en pourcentage, de chaque type d'erreur. Ceci permet d'avoir une évaluation spatiale de la performance du modèle LAI par rapport à l'utilisation de fonctions de pédotransfert : 36 % de la surface des cultures de céréales à paille en France présentent une incertitude estimée à $\pm 25\%$ des réserves utiles modèle LAI avec pour valeur de référence les réserves utiles Al Majou (29 % de la surface des cultures pour une même valeur d'incertitude avec les réserves Wosten pour référence) (Tableau IV-1). Ces faibles erreurs relatives se situent majoritairement dans le bassin parisien. On observe cependant davantage de très fortes erreurs relatives avec Al Majou (18% de la surface avec une erreur relative absolue supérieure à 100 %), qu'avec Wosten (seulement 4 % de la surface). Ces fortes erreurs se situent principalement au sud du bassin parisien où les réserves utiles modèle LAI sont surestimées et à l'est du bassin parisien où l'on observe une zone homogène où le modèle LAI semble sous-estimer la réserve utile.

Evaluation du modèle empirique sur la France : comparaison avec les réserves utiles
obtenues par des fonctions de pédotransfert

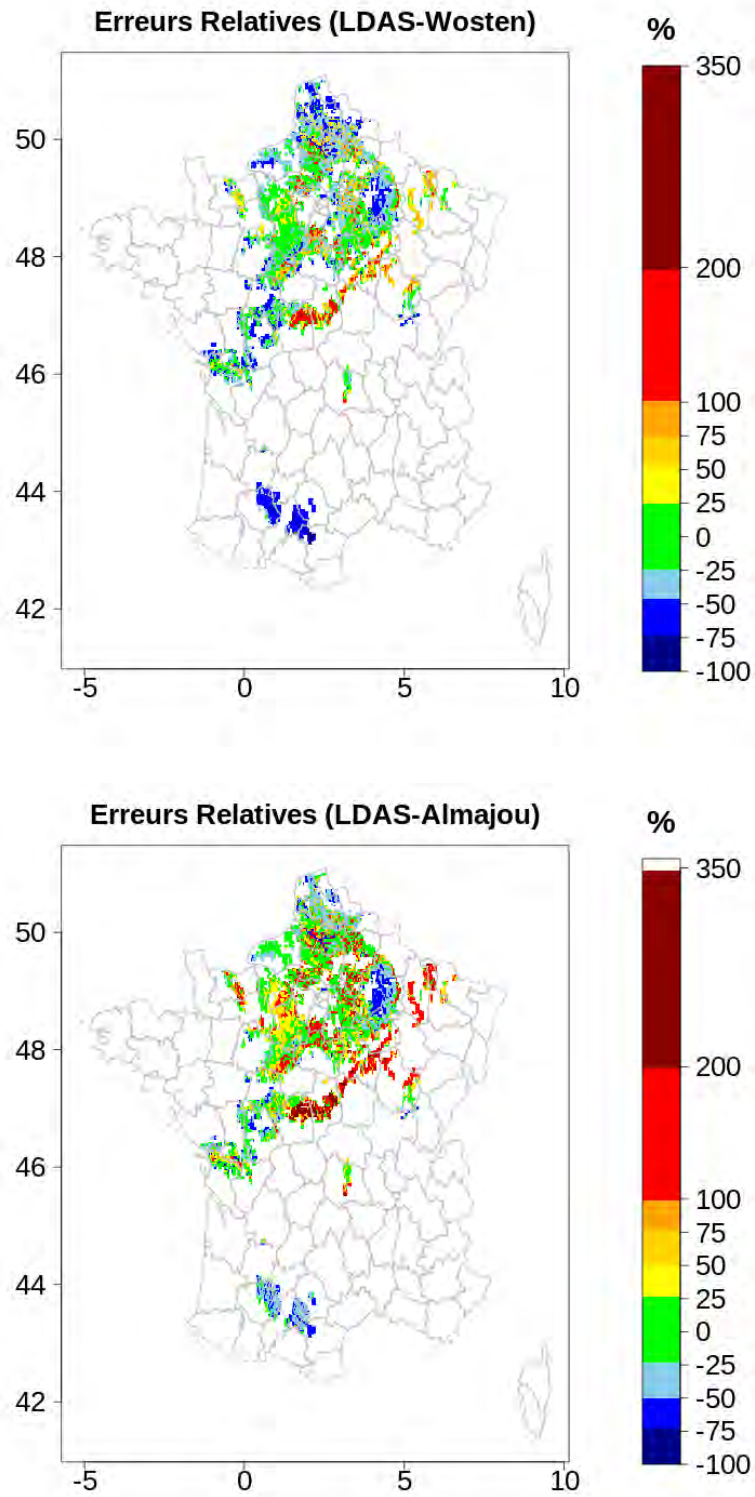


Figure IV.13 Carte des erreurs relatives (%) entre MaxAWC Wosten à gauche, et MaxAWC Al Majou à droite, et MaxAWC modèle. Zone bleue : le modèle sous-estime MaxAWC, zone rouge : le modèle surestime MaxAWC, zone verte : erreur située entre -25 % et 25 %.

Erreurs relatives absolues (%)	Pourcentage surfacique des erreurs relatives absolues Wösten (%)	Pourcentage surfacique des erreurs relatives absolues Al Majou (%)
< 5 %	5	7
< 25 %	29	36
< 50 %	66	64
< 75 %	90	76
< 100 %	96	82
> 100 %	4	18

Tableau IV-1 Pourcentage surfacique des erreurs relatives pour les cultures de céréales à paille en France avec pour référence les réserves utiles Wösten et al. Majou

5.2 Zoom sur les trois départements : l'Eure et Loir, la Marne et l'Indre

Trois départements, la Marne, l'Eure-et-Loir et l'Indre présentent une variabilité des valeurs de MaxAWC « modèle LAI » remarquables (Figure IV.14). Cette variabilité est tout à fait comparable à celle des valeurs de MaxAWC de l'INRA.

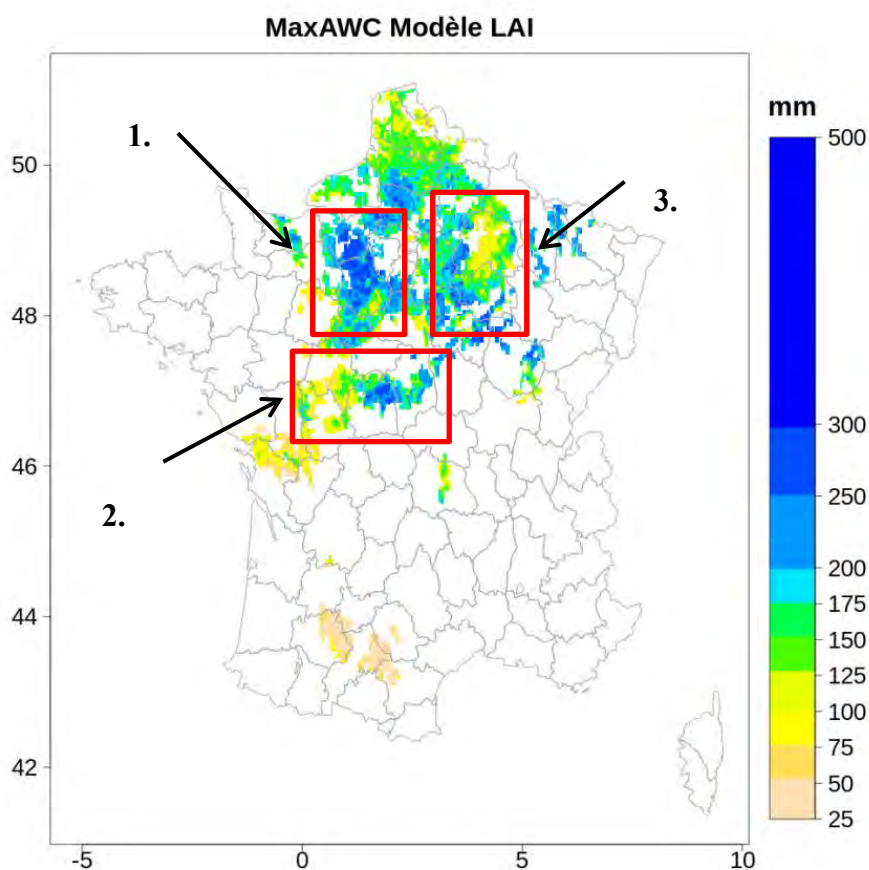


Figure IV.14 Réserves utiles modèle LAI. Régions présentant une variabilité des réserves utiles estimées remarquables : 1. Eure ; 2. Indre ; 3. Marne et 4. Sud-Ouest

Une étude de comparaison plus détaillée est réalisée pour chacune de ces trois départements agricoles. Ainsi, les réserves utiles calculées à l'aide des classes de fonctions de pédotransfert d'Al Majou et al. (2008) qui présentent la plus grande proportion de faibles erreurs relatives et une médiane des erreurs relatives faible (+ 9 %), sont utilisées uniquement. Les cartes des MaxAWC « Al Majou » issues de ces quatre corrections sont présentées en Annexe A. Les sections suivantes présentent les résultats de la comparaison entre la carte des

MaxAWC « modèle LAI » et la carte de la moyenne des quatre types de corrections appliquées aux valeurs de MaxAWC « AI Majou » et ce pour chaque point.

5.2.1 Départements de l'Eure et Loir

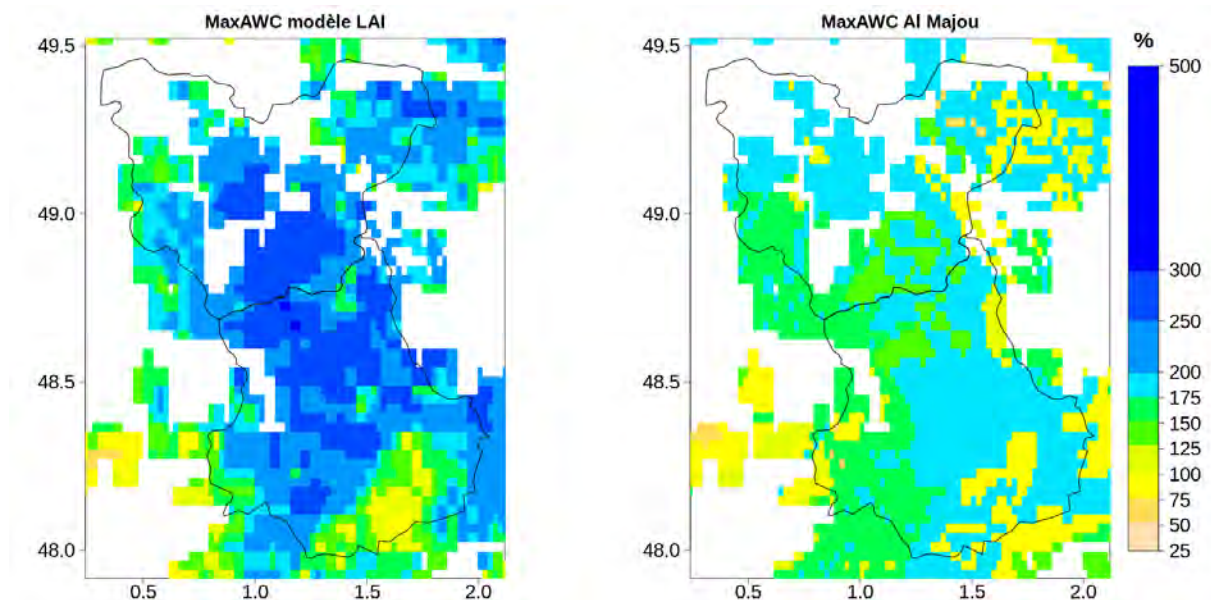
La réserve utile a été estimée pour 1200 points de 5 km de résolution considérés comme des cultures de céréales à paille (soit environ 6000 km², chiffre cohérent avec la base de données Agreste qui estime la surface agricole totale dans la région Centre à environ 10 000 km², Agreste Centre, 2011).

La carte des MaxAWC « modèle LAI » montre des valeurs élevées, supérieures à 225 mm, au centre du département de l'Eure et Loir et une zone avec des MaxAWC plus faibles, inférieurs à 125 mm, au sud de ce même département. Ces deux zones clairement identifiables sont comparables à celles observées sur la carte de MaxAWC « AI Majou » (Figure IV.15). Le RMSE entre ces deux cartes est de 73 mm, la corrélation de 0.27 et le coefficient de détermination 0.073. La médiane des valeurs de MaxAWC « modèle LAI » égale à 213 mm, est supérieure à la médiane des MaxAWC « AI Majou » corrigées, égale à 163 mm.

D'un point de vue pédologique, l'Eure et l'Eure-et-Loir sont des départements dont le sol est majoritairement composé de Luvisols au centre et au nord du département, et de Cambisols, au sud de celui-ci (Figure IV.16).

Selon la détermination de la FAO, les luvisols sont des sols fertiles, profonds et constitués de plusieurs horizons. Ceci est cohérent avec les fortes valeurs de réserve utile observées sur ce type de sol. Ne présentant pas d'obstacle particulier à l'enracinement des plantes, celles-ci peuvent développer un système racinaire dans les horizons plus profonds.

Les Cambisols, ou sols bruns, sont des sols très répandus en Europe. Plutôt jeunes et donc peu développés (c'est-à-dire qu'ils présentent peu d'horizons issus de l'altération de la roche mère), ils sont considérés comme étant favorables à l'agriculture. Ces sols présentent souvent de faibles réserves utiles comprises entre 50 et 70 mm (Bétard, 2011) similaires à celles observées dans le sud de l'Eure et Loir.



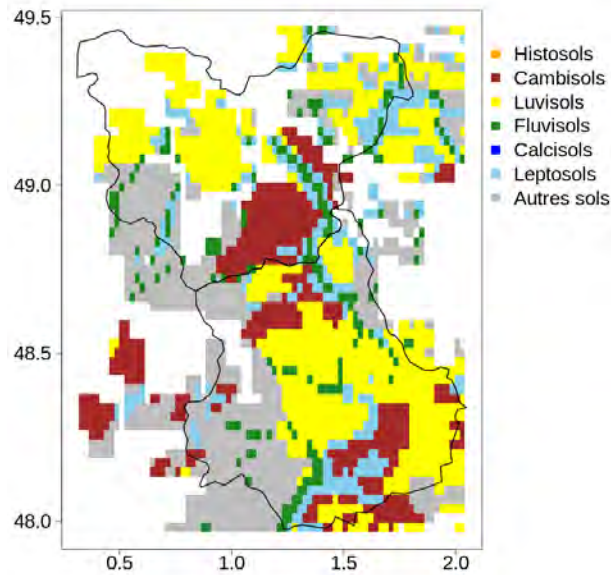


Figure IV.16 Carte de la pédologie de la région Normandie, HSWD

5.2.2 Département de l'Indre

Les surfaces agricoles du département de l'Indre, de l'Indre et Loire et du Cher de la région Centre sont étudiées. Ces surfaces représentent environ 2500 points de 5 km de résolution (soit 12 500 km² environ).

Les médianes des MaxAWC « Modèle LAI » et « AI Majou » pour cette région sont de 145 mm et 118 mm respectivement. Une zone au nord du département de l'Indre, la Champagne Berrichonne, présente des valeurs de MaxAWC « modèle LAI » particulièrement élevées, supérieures à 225 mm, alors que les valeurs de MaxAWC « AI Majou » n'excèdent pas 100 mm (Figure IV.17). Le RMSE entre ces deux cartes est de 96 mm, la corrélation spatiale est négative (- 0.362) et le R² est égal à 0.131. Ces cartes sont donc anti corrélées.

D'un point de vue pédologique, l'Indre et le Cher sont des départements dont beaucoup de sols sont riches en calcaire. Selon HSWD (Figure IV.18), ces sols correspondent à la classe « Leptosols ». Selon la détermination de la FAO (Figure IV.18), les Leptosols sont des sols peu profonds présentant des éléments grossiers et dont la roche mère est calcaire (rendzine). Favorable à l'agriculture, ils présentent de bonnes capacités bien connues de rétention d'eau, malgré leur faible profondeur, et favorisent les remontées capillaires permettant d'alimenter en eau la végétation s'y trouvant. Ils sont bien drainants, ce qui évite les excès d'eau. C'est une région à fort potentiel agronomique (http://www.indre.chambagri.fr/fileadmin/cda36/documents/La_chambre_%C3%A0_votre_service/Information_g%C3%A9ographique/carte_potentiel_agronomique.pdf). Ceci est cohérent avec les fortes valeurs de MaxAWC « modèle LAI ».

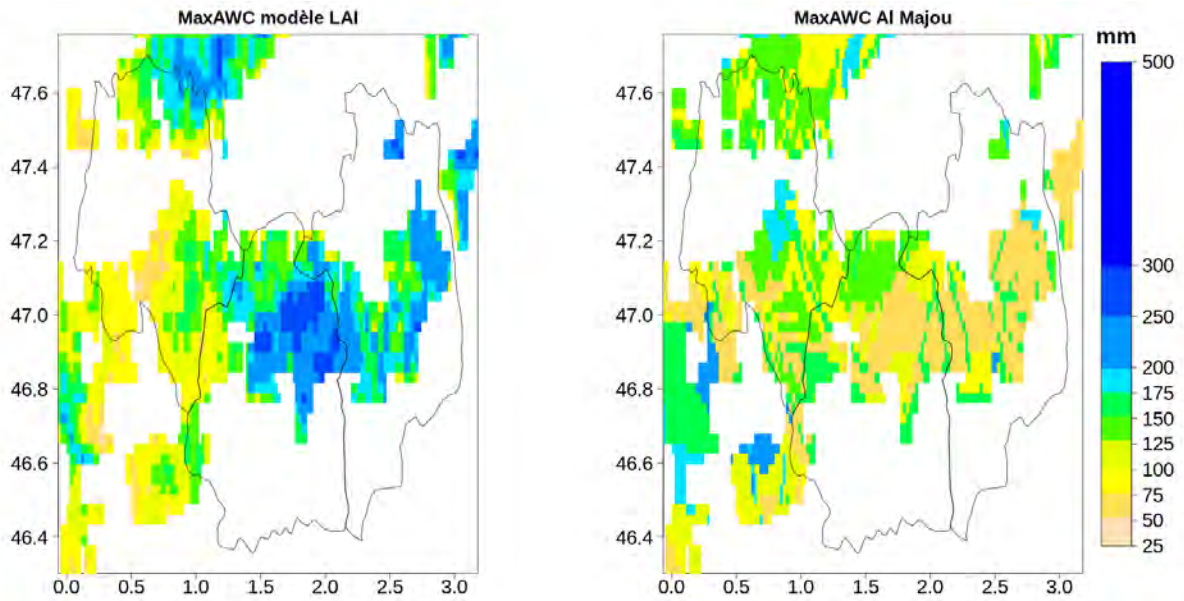


Figure IV.17 Région Centre : MaxAWC « modèle LAI » vs MaxAWC « AI Majou »

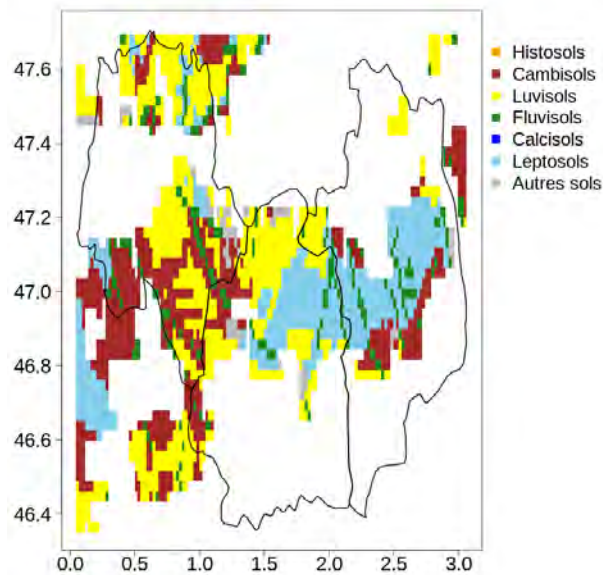


Figure IV.18 Carte de la pédologie de la région Centre, HSWD

5.2.3 Département de la Marne

Le département de la Marne ainsi que le département de l'Aube, présentent une forte activité agricole (environ 4400 points à 5 km de résolution soit environ 22 000 km² de surface de cultures de céréales à paille).

Une zone bien définie dans le département de la Marne présente des valeurs de MaxAWC relativement homogènes, visibles sur les deux cartes (Figure IV.19). Cependant, les réserves utiles estimées dans cette région par les deux approches divergent à nouveau. Le RMSE entre ces deux cartes est de 88 mm, la corrélation de - 0.322 et le R² est égal à 0.104.

Les valeurs de MaxAWC estimées par le modèle LAI sont plutôt faibles, n'excédant pas 100 mm, alors que celles estimées par des fonctions de pédotransfert AI Majou sont supérieures à 200 mm. Cette région, appelée la « Champagne crayeuse », correspond à un type de sol particulier du bassin parisien : les rendzines (Leptosols) (Figure IV.20). Ce sol est perméable, peu profond, riche en carbonate de calcium (calcaire actif) et présente aussi de nombreux éléments grossiers (Duchaufour, Revue Forestière Française, « L'équilibre agro-

sylvo-pastoral en Champagne Crayeuse »). Il est pauvre chimiquement. Ceci est dû à la présence du calcaire actif empêchant des éléments minéraux d'être solubles (fer et phosphore), au lessivage important de ce type de sol qui entraîne des éléments minéraux qui ne peuvent être alors absorbés par la végétation mais aussi à la faible concentration en matière organique car très vite décomposée. Constituée de grains très fins, cette roche présente une capacité bien connue de rétention d'eau et favorise le processus de remontées capillaires vers les horizons au-dessus de celle-ci si aucun obstacle n'est présent. Ceci permet d'alimenter en eau les plantes lorsque les précipitations viennent à manquer, faisant de ces sols un atout pour l'agriculture. La présence de cailloux de craies dans les horizons de surfaces participe aussi à la réserve utile (Tetegan et al., 2011). Ces processus impactant la réserve utile, que sont les remontées capillaires et les cailloux de craie, sont difficilement mesurables mais ont été pris en compte dans les calculs des valeurs de MaxAWC « AI Majou ». En effet, les valeurs sans correction de MaxAWC « AI Majou » sont comparables à celles estimées par le modèle LAI, entre 75 et 125 mm (voir Annexe A).

La méthode d'optimisation, qui a permis de mettre en évidence le modèle LAI pour estimer la réserve utile, est basée sur la profondeur racinaire. Ainsi, de faibles valeurs de MaxAWC correspondent à un enracinement peu profond de la végétation, ce qui est cohérent avec la description des rendzines.

D'autre part, cette région a subi beaucoup de transformations afin de devenir une région agricole productive. En effet, la pauvreté chimique de ce sol ne permettait pas de cultiver quoi que ce soit, faisant de cette région une des régions les plus pauvres comme en témoigne son ancienne appellation : la « Champagne pouilleuse ». Des mécanismes de fertilisation ont dû être mis en place comme la rotation des cultures (<http://agreste.agriculture.gouv.fr/IMG/pdf/R2113A04.pdf>). Ainsi une grande variété de cultures différentes (blé, orge, betterave, luzerne...) caractérise cette région. Ceci expliquerait les faibles valeurs de LAI_{max} observées amenant à une estimation de faibles valeurs de réserve utile par le modèle LAI.

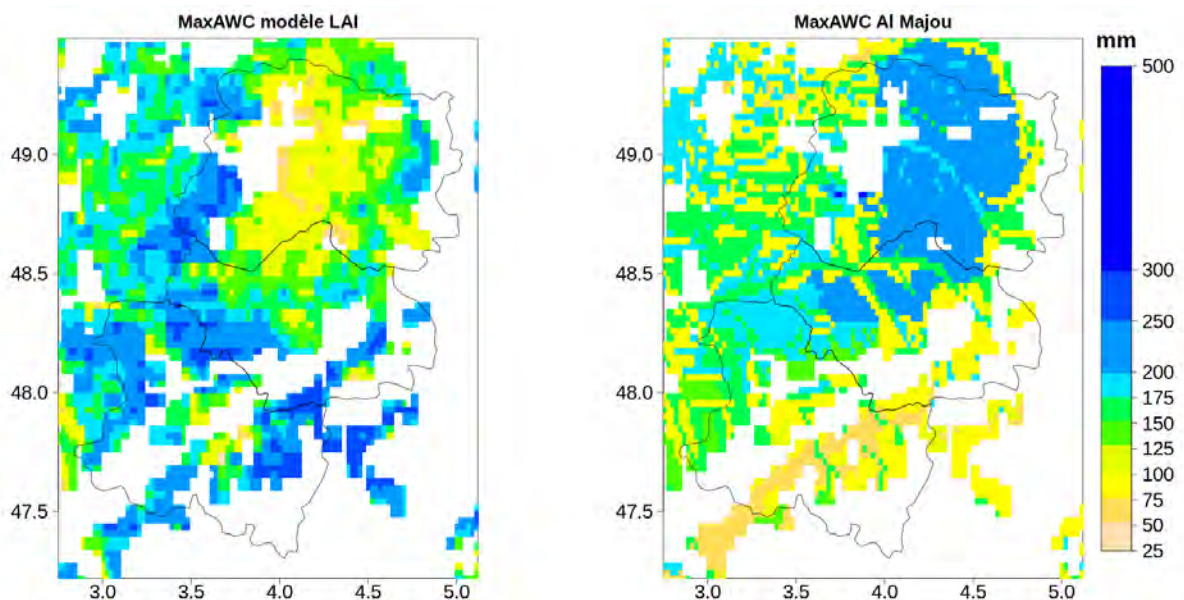


Figure IV.19 Région Champagne-Ardenne : MaxAWC « modèle LAI » vs MaxAWC « AI Majou »

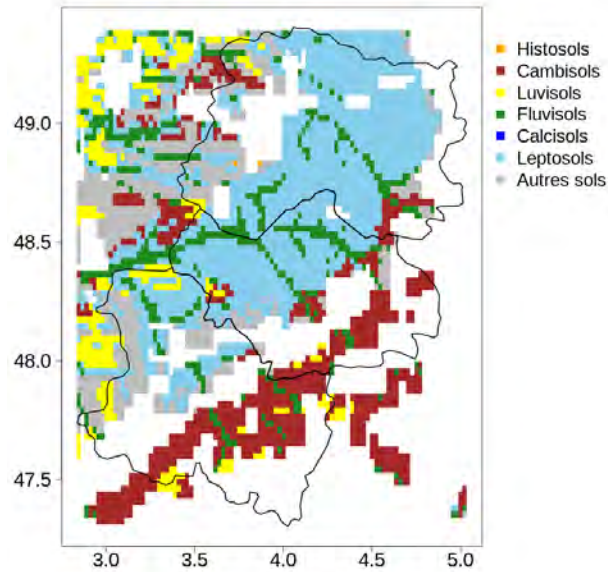


Figure IV.20 Carte de la pédologie de la région Champagne Ardennes, HSWD

5.2.4 Conclusion

A l'échelle de la France, la carte de réserve utile issue d'un modèle linéaire basé sur des observations satellitaires est comparable à une carte de réserve utile estimée par des fonctions de pédotransfert. Plus de 60 % de la surface des réserves utiles estimées présentent une erreur relative située entre -50% et $+50\%$.

L'étude des différentes régions remarquables a permis de mettre en évidence :

- Pour des régions présentant des sols fertiles, favorables à l'agriculture et permettant à la végétation de développer leur système racinaire, les deux cartes sont très similaires démontrant la capacité des deux différentes approches d'estimations de la réserve utile à détecter les mêmes « patterns » remarquables ;
- Des résultats contradictoires des deux approches sont observés notamment pour la Champagne Berrichonne et la Champagne Crayeuse. Ces régions présentent toutes deux des sols calcaires. Peu favorables à l'agriculture, elles ont subi des transformations par la mécanisation, le travail du sol et par l'apport de mécanisme de fertilisation. Dans ces conditions de sols calcaires et d'une agriculture intensive, les fonctions de pédotransfert atteignent leurs limites. Il est possible qu'un modèle empirique fondé sur le LAI satellitaire soit plus pertinent.

6. Bilan du chapitre IV

Le potentiel d'utilisation des données satellitaires d'un indice foliaire (LAI) et d'un modèle de surface (ISBA) pour la modélisation de la variabilité interannuelle de la biomasse des cultures de céréales à paille et pour le suivi des sécheresses en France, est exploré dans ce chapitre. Deux méthodes, une méthode de modélisation inverse simple et une méthode

d'assimilation de données (LDAS), ont été utilisées afin de caler un paramètre clef de la végétation : la réserve utile. Ce travail a permis de mettre en évidence les éléments suivants:

- La représentation de la variabilité interannuelle des cultures de céréales à paille par calage de la réserve utile est significativement améliorée par la méthode LDAS. L'impact positif de cette méthode a été démontré par une évaluation avec des produits de GPP FLUXNET-MTE. Le calage de la réserve utile avec la méthode du « LDAS tuning » permet une réduction drastique des plus fortes erreurs sur la GPP ;
- L'impact de la qualité des observations de LAI sur les résultats est important. Les meilleurs résultats sont obtenus grâce à l'utilisation de produits désagrégés de LAI, permettant une meilleure prise en compte du type de végétation étudié ;
- Une forte corrélation est observée entre les valeurs de réserve utile optimisées avec la méthode LDAS tuning et les valeurs maximales de LAI satellitaires désagrégés. Un simple modèle de régression linéaire basé uniquement sur des données satellitaires de LAI pourrait permettre de cartographier directement la réserve utile. La carte obtenue pour les couverts de céréales à paille en France par ce modèle linéaire, appelé « modèle LAI », a été confronté à une autre carte de réserve utile estimée à partir de fonctions de pédotransfert pour la France par l'INRA (Al Majou et al., 2008). Cette étude a montré que des « patterns » similaires sont clairement identifiés par les deux cartes, démontrant une bonne cohérence du modèle LAI pour restituer la réserve utile :
 - Pour des régions qui présentent un sol particulièrement fertile comme pour le cas du département de l'Eure et Loir, la variabilité spatiale de la réserve utile est similaire
 - Pour des régions qui présentent un sol calcaire, des estimations contradictoires sont observées. Ce sont des régions particulières, devenues favorables à l'agriculture suite à de nombreux aménagements (mécanisation, travail important du sol, mécanisme de fertilisation). Pour ces zones, le modèle LAI, basé sur des observations directes de la végétation, ne peut restituer une réserve utile comparable à celle de l'INRA.

Dans le chapitre suivant, l'application conjointe du modèle LAI pour estimer indirectement la réserve utile par des données satellitaires désagrégées, et la méthode LDAS est évaluée pour des régions présentant une proportion importante de cultures de céréales à paille en dehors de la France telles que les Etats Unis et l'Ukraine.

CHAPITRE V. Evaluation d'un modèle d'estimation de la réserve utile sur d'autres zones agricoles : Ukraine et États-Unis

1. Introduction

Une évaluation de l'estimation de la réserve utile à partir de données satellitaires de LAI, pour des régions présentant une proportion importante de céréales à paille en dehors de la France, est réalisée dans ce chapitre. Pour ce faire, je me suis basée sur deux résultats importants du Chapitre 4:

- La possibilité d'estimer indirectement la réserve utile à partir de séries temporelles de maximums annuels de LAI satellitaire désagrégé, à l'aide d'un modèle empirique appelé « modèle LAI » :

$$LAI_{max} = 1.93 + MaxAWC \times 0.01819 ;$$
- L'utilisation d'un système d'assimilation de données (LDAS) permet d'obtenir une meilleure représentation de la variabilité inter annuelle de la végétation au sein du modèle ISBA-A-gs.

Dans ce chapitre, l'objectif est d'évaluer dans quelle mesure le « modèle LAI » obtenu sur la France est utilisable sur d'autres régions du monde. En particulier des régions où l'agriculture est moins intensive.

Pour cela, des simulations issues du LDAS, utilisant le forçage atmosphérique ERA-Interim et le LAI satellitaire désagrégé (voir chapitre 4) ont été considérées. Le LDAS est utilisé ici pour évaluer la généralité du « modèle LAI » établi sur la France, et non pour construire de nouveaux modèles LAI. La cohérence entre « modèle LAI » et incréments d'analyse est étudiée pour diverses gammes de réserve utile.

J'ai considéré deux régions du monde produisant des céréales et pour lesquelles l'agriculture est un secteur clé de l'économie : les Etats-Unis et l'Ukraine. Les Etats-Unis sont au 4^{ème} rang mondial des pays producteur de blé en 2014, après la Chine, l'Inde et la Russie (source FAO). L'Ukraine est au 10^{ème} rang mondial et au 4^{ème} rang européen en 2014, après la Russie, la France et l'Allemagne (source FAO). Etats-Unis et Ukraine présentent une surface de culture de céréales à paille importante et représentent de bons candidats pour ce travail d'évaluation.

Tout d'abord, une estimation de la réserve utile pour chacun des pixels représentant des cultures de céréales à paille est donnée grâce au « modèle LAI » défini dans le Chapitre 4 pour la France. Nous avons montré que l'utilisation de séries temporelles de LAI satellitaires désagrégés et moyennés sur une zone de 35 km × 35 km permettait :

- D'améliorer la corrélation des valeurs maximales de LAI avec les rendements agricoles (grâce à la moyenne sur une zone de 35 km × 35 km) ;
- D'estimer des valeurs de réserve utile plus réalistes pour des cultures de céréales à paille (grâce à la désagrégation).

Ensuite, j'ai sélectionné des points présentant des valeurs de MaxAWC « modèle LAI » estimées proche de valeurs de réserve utile espacées de 20 mm : 60±5 mm, 80±5 mm, 100±5 mm, 120±5 mm et 140±5 mm pour les Etats-Unis et 30±5 mm, 50±5 mm et 70±5 mm pour l'Ukraine. Ces valeurs de réserve utile ont été choisies afin de balayer la gamme de valeurs issues du « modèle LAI ». Puis, la variabilité interannuelle de la végétation est

simulée par le LDAS en chacun de ces points avec la valeur de MaxAWC « modèle LAI » et avec la valeur de MaxAWC standard, utilisée par défaut dans le modèle, égale à 132 mm. Enfin, j'ai évalué l'impact de l'intégration directe des valeurs MaxAWC « modèle LAI » dans le LDAS selon :

- La comparaison de la médiane des incréments d'analyse pendant la phase de sénescence obtenue par rapport à la version standard ;
- La comparaison de la biomasse maximale simulée par le LDAS (avec MaxAWC « modèle LAI » et avec MaxAWC standard) avec les rendements selon la méthode exposée dans le Chapitre 4.
- L'impact sur une variable indépendante : la GPP (FLUXNET-MTE), en comparant le RMSE calculé sur une période de trois mois précédant le pic du LAI satellitaire entre la GPP observée et la GPP simulée par le LDAS (toujours avec MaxAWC « modèle LAI » et MaxAWC standard) ;

Ces résultats sont présentés selon trois parties : une première (2) partie concerne l'analyse des données disponibles pour les Etats Unis et l'Ukraine : les données de LAI satellitaire désagrégés et les rendements agricoles. Puis, une seconde partie (3) présente la cartographie de la réserve utile issue du « modèle LAI ». Pour le cas des Etats-Unis, une carte de la réserve utile obtenue à partir des caractéristiques pédologiques est fournie par le « United States Department of Agriculture ». Celle-ci permet une première évaluation de la carte de MaxAWC « modèle LAI ». Enfin, une troisième partie (4) évalue l'impact de la représentation de la réserve utile « modèle LAI » dans le modèle ISBA en utilisant le LDAS.

2. Rendements agricoles et LAI satellitaire : Etats-Unis et Ukraine

2.1 Etats-Unis

L'agriculture occupe une place primordiale dans l'économie des Etats-Unis, appelé le « grenier du monde », occupant souvent les premiers rangs mondiaux des pays producteurs de céréales tel que le maïs, le soja ou le blé. C'est une agriculture moderne extensive ou partiellement intensive, c'est-à-dire que le rendement de la parcelle n'est pas autant maximisé par l'utilisation d'intrants que dans le Bassin Parisien par exemple mais une mécanisation importante facilitée par la grande surface des parcelles permet une production importante.

Afin d'améliorer la cohérence entre les observations de LAI et les statistiques agricoles disponibles à l'échelle du département les séries temporelles de LAI sont moyennées sur un carré autour des 45 sites dont la dimension a été optimisée à 35 km x 35 km

La Figure V.1 présente les points de cultures de blé pluviales aux Etats-Unis. Ces données sont fournies par le « National Agricultural Statistics Services » du « United States Department of Agriculture » (USDA) pour chaque Etat et chaque type de culture (https://www.nass.usda.gov/Charts_and_Maps/Crops_County/). Quatre Etats se distinguent : la Caroline du nord, le Dakota du nord, l'Ohio et l'Etat de Washington. Les surfaces de cultures de blé, d'après la Figure V.1, représentent environ 25 000 km², 90 000 km², 50 000 km², et 8 000 km² pour la Caroline du nord, le Dakota du nord, l'Ohio et l'Etat de Washington respectivement.

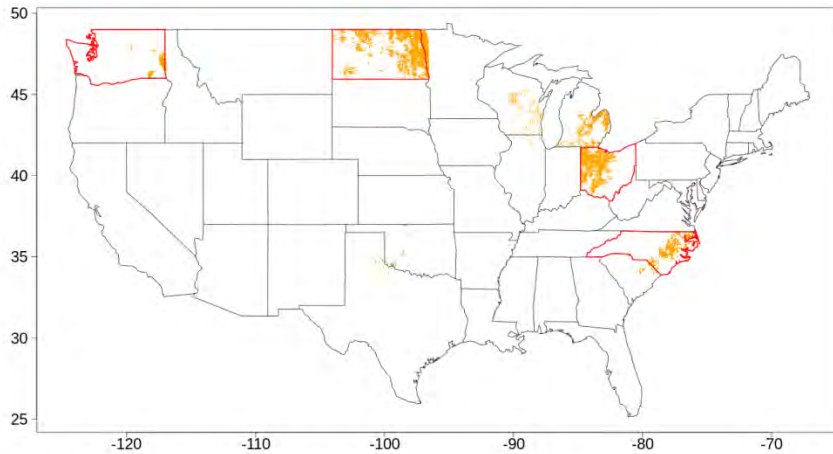


Figure V.1 Etats au sein des USA présentant des zones homogènes de cultures de blé : Etat de la Caroline du nord, du Dakota du nord, de l'Ohio et de Washington

Des données de rendement annuel du blé à l'échelle de chaque Etat sont disponibles dans la base de données de l'USDA. J'ai donc pu comparer ces rendements avec la médiane des valeurs maximales annuelles de LAI des pixels présents au sein de ces quatre Etats (les valeurs inférieures à 90 % de la valeur maximale annuelle de LAI ne sont pas prises en compte dans le calcul de la médiane, conformément à la méthode expliquée dans le Chapitre 4). Les résultats sont présentés dans la Figure V.2 pour la Caroline du nord, la Figure V.3 pour le Dakota du nord, la Figure V.4 pour l'Ohio et la Figure V.5 pour l'Etat de Washington. Pour deux Etats, le LAI présente une corrélation significative (p -value < 0.01) avec les rendements : la Caroline du Nord avec une valeur de R^2 de 0.46 et l'Etat de Washington avec une valeur de R^2 de 0.78.

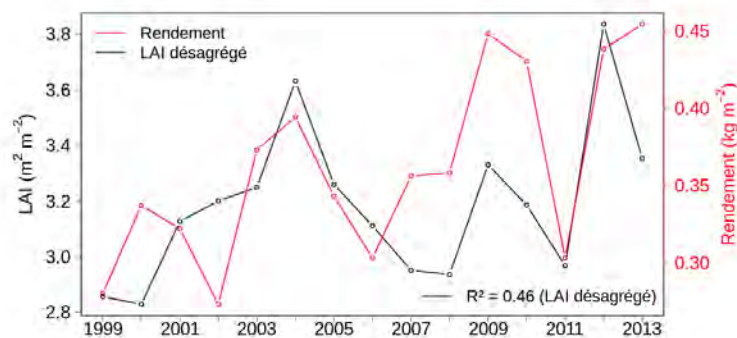


Figure V.2 Rendement de blé et LAI max satellitaire désagrégé pour l'Etat de la Caroline du nord

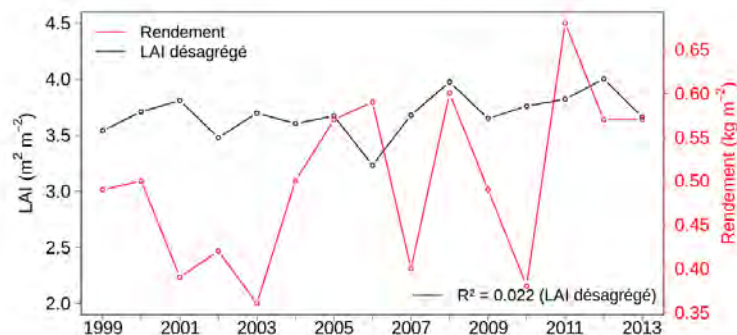


Figure V.3 Rendement de blé et LAI max satellitaire désagrégé pour l'Etat du Dakota du nord

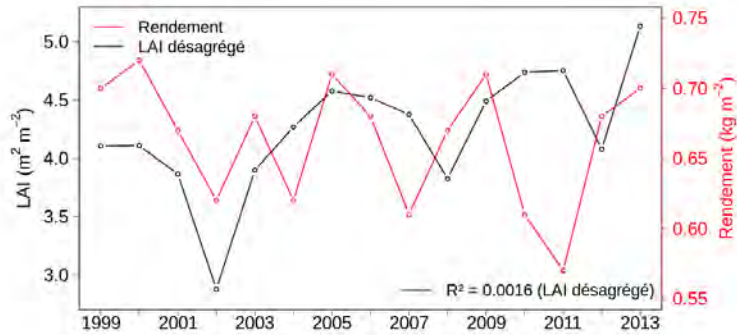


Figure V.4 Rendement de blé et LAI max satellitaire désagrégé pour l'Etat de l'Ohio

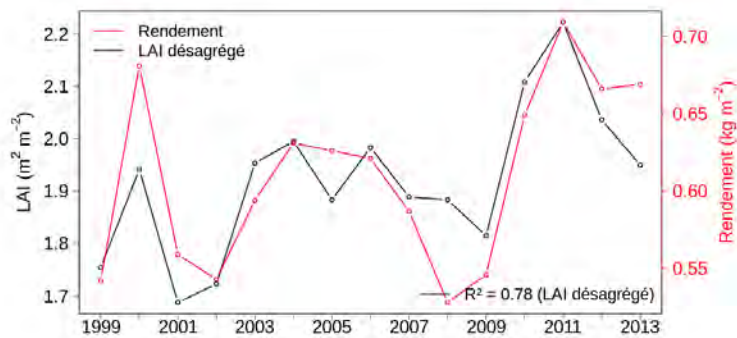


Figure V.5 Rendement de blé et LAI max satellitaire désagrégé pour l'Etat de Washington

2.2 Ukraine

Parmi les pays européens qui produisent le plus de céréales à paille dont l'avoine, le blé, l'orge et le seigle, l'Ukraine occupe le 3^{ème} rang, après la France (1^{er} rang) et l'Allemagne (2^{ème} rang) pour ces quatre céréales. Une partie des sols ukrainiens est constituée d'un type de sols très particulier, le Chernozem. Les chernozems sont aussi appelés « terres noires ». Connues pour leur grande fertilité, ces « terres noires » présentent une forte concentration en matière organique qui améliore les capacités de rétention de l'eau par le sol (Hudson, 1994). On les trouve dans différentes régions du monde comme dans les grandes steppes eurasiatiques, aux Etats-Unis. L'Ukraine concentre à elle seule 40% de la superficie mondiale de ces terres considérées comme les plus fertiles du monde (Figure V.6).

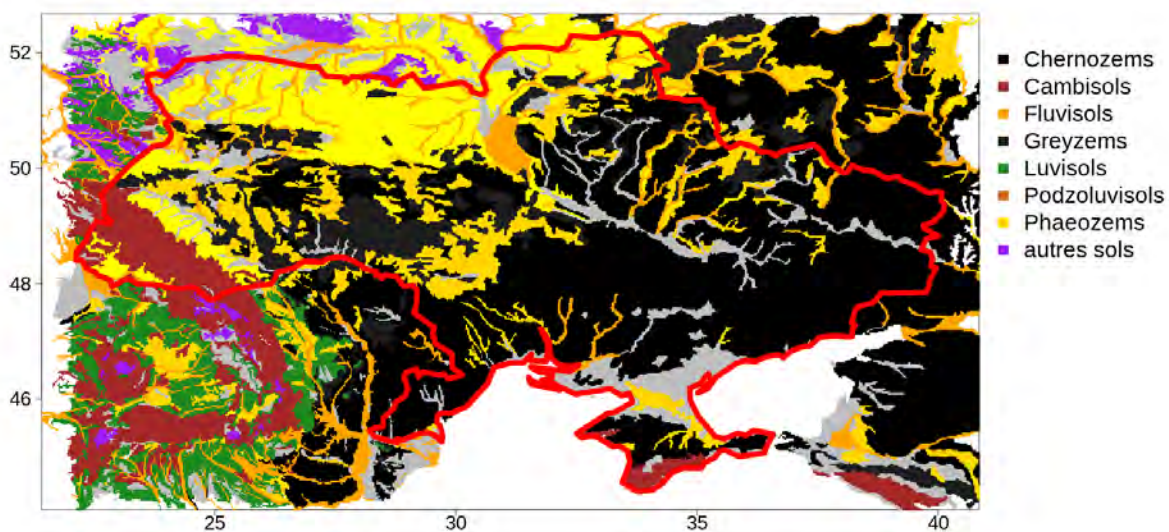


Figure V.6 Carte pédologique de l'Ukraine présentant les fameuses « terres noires » (source HSWD)

Considérée comme un pays à fort potentiel agricole, l'Ukraine comporte une surface agricole qui représente plus des deux tiers de la surface du pays. Cela représente environ 40 millions d'hectares de terres cultivables. La Figure V.7 présente les surfaces de cultures de céréales à paille déterminées grâce au croisement des deux cartes d'occupations des sols ESA-CCI-LC et ECOCLIMAP dont la méthodologie est décrite dans le Chapitre 3. Celle-ci est cohérente puisqu'elle montre une superficie cultivée d'environ 37.5 millions d'hectares.

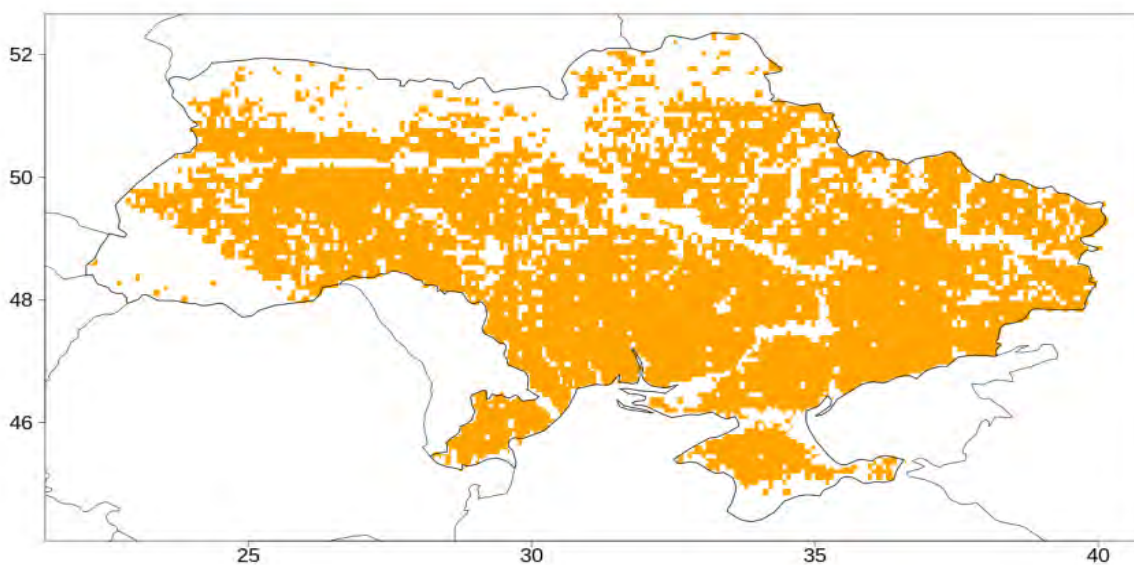


Figure V.7 Carte des zones homogènes de culture de céréales à paille en Ukraine.

Les sols ukrainiens particulièrement riches sont favorables à la mise en pratique d'une agriculture extensive. Ce type d'agriculture utilise peu d'intrants. C'est une agriculture qui ne favorise pas la maximisation de la production à l'hectare de la culture contrairement à l'agriculture intensive. L'Ukraine est un pays dont l'indépendance est récente. Celle-ci a été proclamée en 1991, suite à la dissolution de l'Union Soviétique. Suite à cela, la productivité agricole de l'Ukraine n'a cessé de baisser jusque dans les années 2010. Après cette période, la production a augmenté permettant à l'Ukraine de faire partie des dix premiers pays

producteurs de céréales européens et mondiaux. Malgré son ambition de devenir le « grenier à blé » de l'Europe, les rendements en grain des cultures de céréales sont plutôt faibles, n'excédant pas 0.35 kg m^{-2} (c'est-à-dire 35 q ha^{-1}) par an comme ce fût le cas pour le blé en 2008 (une année favorable) (Figure V.8), alors qu'en France, la moyenne des rendements de blé peut atteindre 0.8 kg m^{-2} .

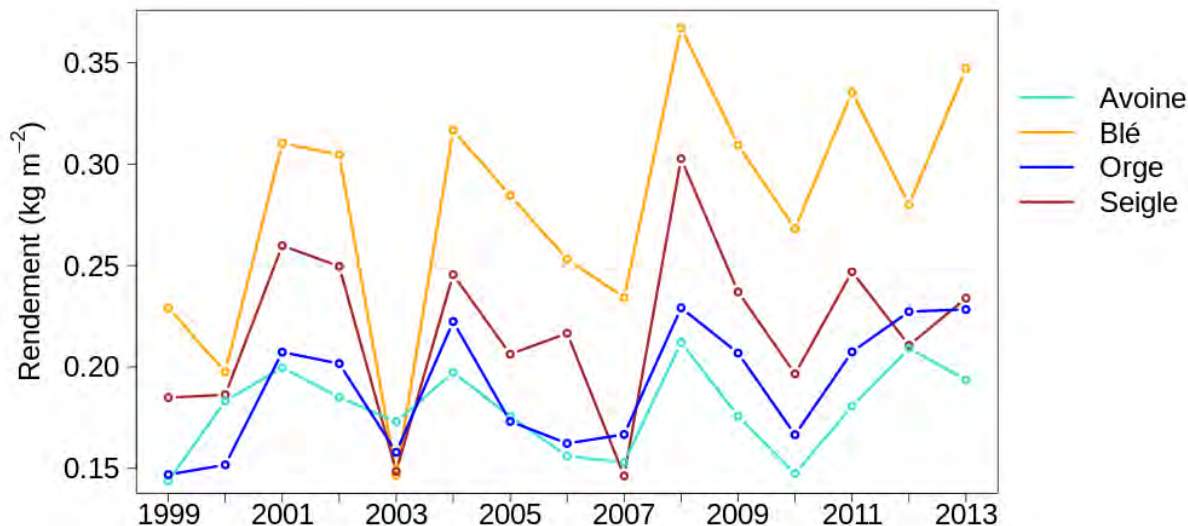


Figure V.8 Rendements annuels de quatre céréales en Ukraine (FAOSTAT) : le blé, l'avoine, l'orge et le seigle sur la période 1999-2013

En effet, le système agricole ukrainien reposait sur des petites coopératives agricoles appelées « kolkhozes » rassemblant une centaine d'agriculteurs et de petites exploitations autour d'habitations. Pour protéger ses agriculteurs et notamment ceux qui ne possédaient que quelques hectares, l'Ukraine a privatisé en 1996 ces anciens kolkhozes, interdisant de cette façon la vente de ses terres agricoles pour résister à la création de grands domaines agricoles (Agreste.agriculture.gouv.fr/IMG/pdf_nese101234A2.pdf).

Les rendements en Ukraine sont considérés comme étant bien en dessous du potentiel de production qu'offrent les terres noires (Ministère de l'Agriculture, de l'Agroalimentaire et de la Forêt, FranceAgriMer et Intercéréales, rapport final, 2016 « Étude de l'effet du changement climatique sur le potentiel de développement des productions végétales en Russie, Ukraine et Kazakhstan à moyen terme »). Le secteur agricole étant en train d'évoluer de manière à accroître ses rendements depuis ces vingt dernières années, rendant difficile l'interprétation des séries temporelles de LAI, j'ai réalisé un test de tendance ainsi qu'un test de rupture de pente sur les valeurs maximales de LAI satellitaire désagrégé. Ceci permet d'éviter des zones potentielles de changement récent de type d'agriculture. Les résultats sont présentés sous forme de carte dans la Figure V.9.

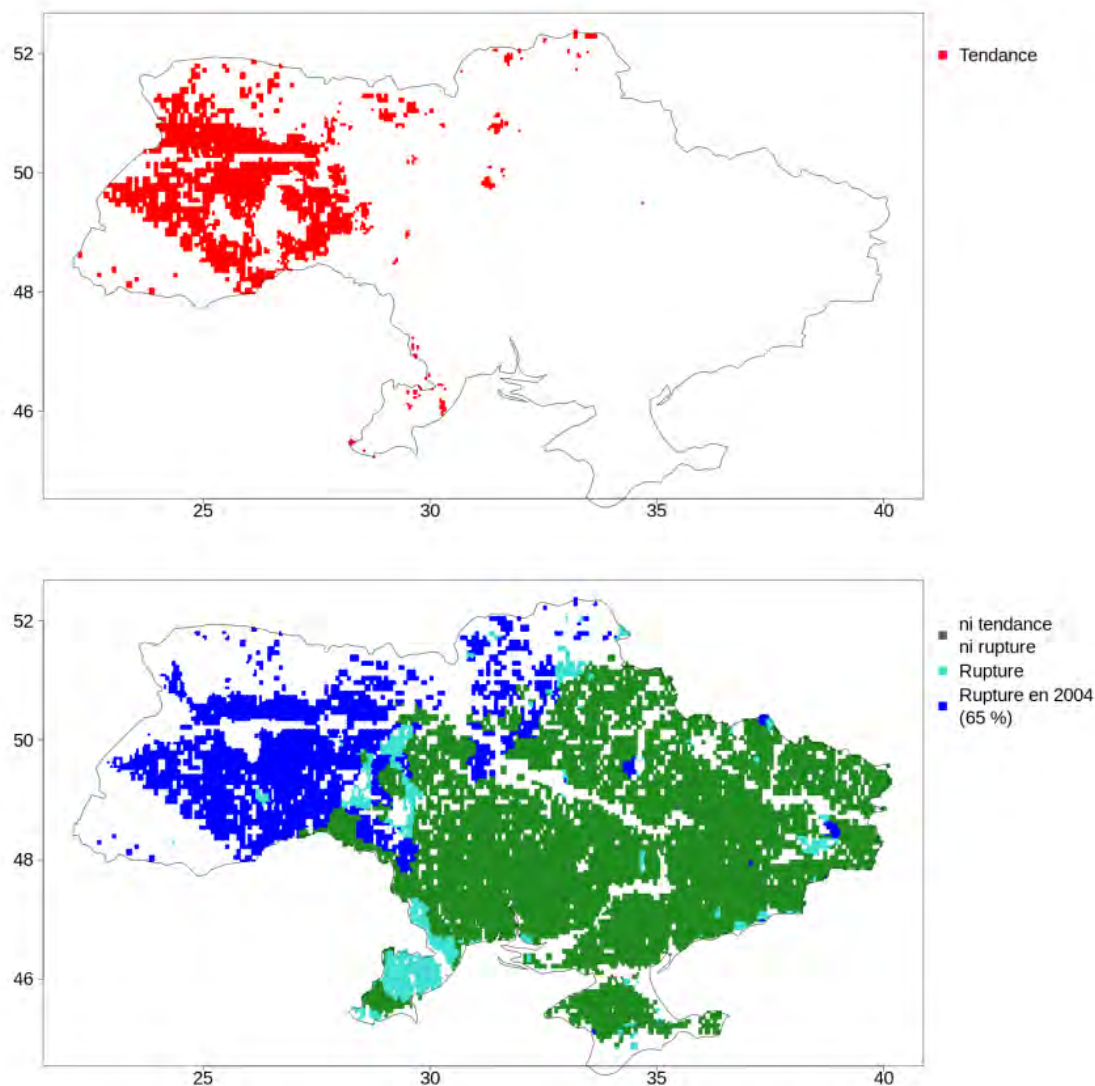


Figure V.9 Cartographie de l'étude de tendance sur les séries temporelles de valeurs maximales de LAI satellitaires désagrégés (moyenne 35 km x 35 km glissante tous les 5 km) en Ukraine. 65% des points présentent une rupture en 2004.

Environ 85% de la superficie des cultures ne présentent pas de tendance dans les valeurs maximales de LAI sur la période 1999-2013 (points verts). La majeure partie de ces points est située dans la moitié sud du pays qui concentre les principales grandes cultures céréalières et les terres noires. Les autres 15 % présentent une tendance dans les valeurs de LAI_{max}. La Figure V.10 montre la tendance observée pour ces points. La médiane des valeurs annuelles de LAI_{max} pour ces points est de 1.5 m² m⁻² en 1999. En 2013, cette valeur a presque doublé atteignant environ 3 m² m⁻².

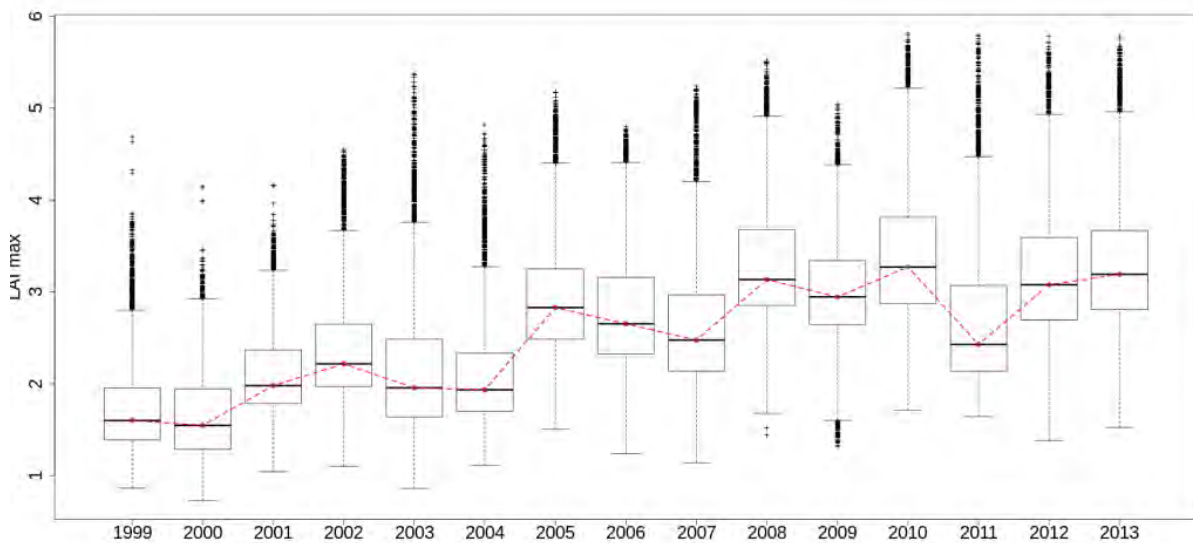


Figure V.10 Boxplot des valeurs annuelles maximales pour les points présentant une tendance

La Figure V.11 présente la répartition des valeurs de LAI maximales annuelles pour les points présentant une rupture de tendance. Cette répartition est très similaire à celle observée dans la Figure V.10 qui présente, cependant, des valeurs à partir de l'année 2008 plus élevées. 65 % de ces points présentent une rupture entre 2004 et 2005. Ces années ne sont pas répertoriées comme étant des années particulières d'un point de vue climatique. On peut donc supposer que ces régions ont subi un changement de pratiques agricoles.

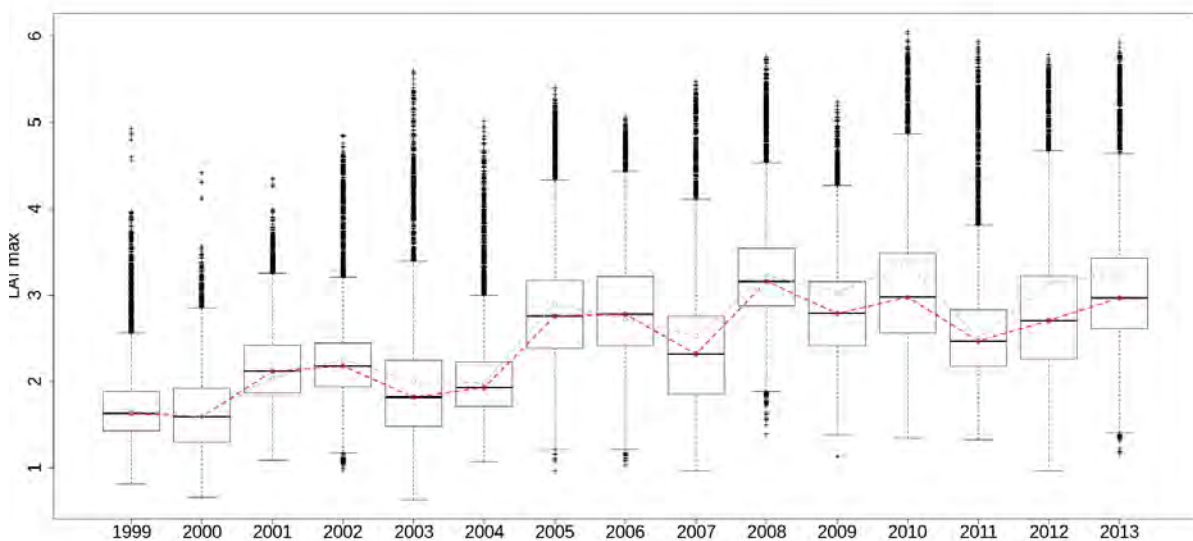


Figure V.11 Boxplot des valeurs annuelles maximales pour les points présentant une rupture. La courbe grise représente la médiane des valeurs annuelles maximales présentant une rupture

Lopez-Lozano et al. (2015) ont étudié les corrélations entre la variabilité interannuelle des données satellitaires fAPAR et la variabilité interannuelle des rendements agricoles à l'échelle régionale des pays européens et des pays voisins comme l'Ukraine, qui occupent une place importante dans les pays producteurs de céréales. Les régions présentant des conditions en eau limitées présentent les meilleures corrélations entre les deux types d'observations, la variabilité interannuelle étant très sensible aux variations climatiques. Au contraire, dans les régions où les conditions en eau ne sont pas limitées, les corrélations restent faibles. La

variabilité des rendements de ces régions ne peut donc pas être seulement expliquée par la variabilité climatique mais aussi par des facteurs externes tels que les problèmes d'accessibilité des machines aux parcelles lors d'un excès d'eau. Pour l'Ukraine, une bonne corrélation est observée entre les valeurs de fAPAR et les rendements de blé et de seigle après la période d'anthèse.

L'étude des valeurs de LAI satellitaire désagrégé et des rendements est cohérente avec l'étude citée ci-dessus. Les différentes corrélations sont exposées dans le Tableau V-1. La variabilité interannuelle des rendements de blé et de seigle est significativement corrélée avec le LAI satellitaire avec une valeur de R^2 de 0.44 et 0.50 respectivement en prenant en compte tous les points, et de 0.37 et 0.51 respectivement en ne considérant que les points sans tendance.

R^2	Total des points	Points sans tendance (85 %)	Points avec tendance (15 %)
Avoine	0.10	0.10	0.02
Blé	0.44	0.37	0.27
Orge	0.21	0.16	0.20
Seigle	0.50	0.51	0.08

Tableau V-1 Résumé des corrélations entre LAI satellitaires désagrégés médians et rendements à l'échelle nationale sur l'Ukraine sur une période de 15 ans (1999-2013) pour quatre céréales considérant la totalité des points, les points sans tendance et les points avec tendance. Les corrélations significatives (p -value < 0.01) sont indiquées par des valeurs de R^2 en gras.

La Figure V.12 présente les rendements annuels de seigle ainsi que les valeurs maximales annuelles du LAI satellitaires pour la période 1999-2013.

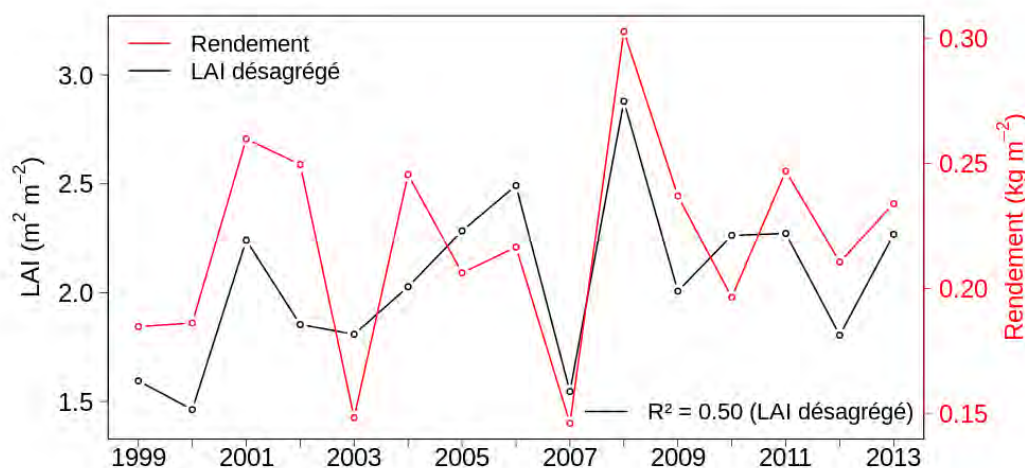


Figure V.12 Variabilité interannuelle des rendements de seigle en rouge, et des valeurs de LAI maximales en noir pour l'Ukraine.

Le faible rendement observé pendant l'année 2007 correspond à l'impact d'une sécheresse particulièrement sévère. L'année 2003 a été caractérisée par des températures inhabituellement froides au printemps, endommageant les cultures et affectant négativement les rendements. L'année 2008 a été particulièrement favorable au bon développement des cultures donnant ainsi le meilleur rendement de la période 1999-2013 pour le seigle mais aussi pour le blé (cf. Figure V.8). Les importantes précipitations pendant la période de

croissance des cultures a permis d'atteindre des rendements équivalents à la période précédant la dissolution de l'Union soviétique.

2.3 Bilan de la comparaison des statistiques agricoles et les données satellitaires pour les Etats-Unis et l'Ukraine.

- Parmi les quatre Etats sélectionnés aux Etats Unis, présentant des surfaces de cultures de blé importantes, seuls la Caroline du Nord et l'Etat de Washington présentent des corrélations significatives entre les valeurs de LAI maximales et les rendements de blé ;
- L'Ukraine, où une bonne corrélation entre données satellitaires de fAPAR et les rendements a été montrée dans l'étude de Lopez-Lozano et al. (2005), montre des corrélations significatives entre le LAI satellitaire et les rendements de blé et de seigle particulièrement. C'est un pays récemment indépendant, dont l'évolution des rendements agricoles est intimement liée à son Histoire (dissolution de l'Union soviétique, potentiel sous-exploité de sols extrêmement fertiles par la mise en place de moratoires protégeant les petits exploitants, ambition de devenir le grenier à blé de l'Europe, etc.)

3. Réserves utiles « modèle LAI »

3.1 Etats Unis

La Figure V.13 présente la carte de la réserve utile pour les quatre Etats qui ont été déterminés précédemment. Les valeurs sont globalement faibles et les valeurs maximales n'excédant pas 200 mm, sont présentes dans l'Etat de l'Ohio.

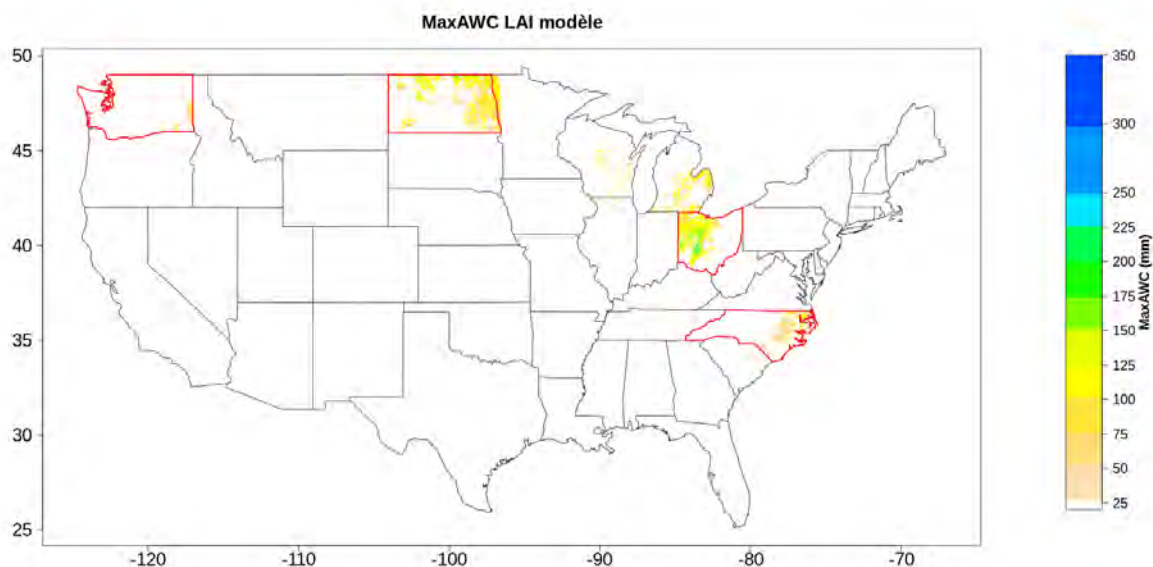


Figure V.13 Carte de la réserve utile « modèle LAI » pour les couverts de cultures de blé aux Etats unis : Etat de la Caroline du Nord, du Dakota du Nord, de l'Ohio et de Washington

L'USDA propose une cartographie de paramètres pédologiques clefs tels que la concentration en matière organique, la composition en argile du sol, la texture du sol, la profondeur du sol ainsi que la réserve utile. Ces données sont disponibles à une échelle de 1 :250 000, dans la base de données STATSGO (« State Soil Geographic Database »)

développée par le « Natural Resources Conservation Service » de l'USDA pour l'amélioration de la paramétrisation des modèles « SVATS » (Miller et al., 1998) (<https://websoilsurvey.nrcs.usda.gov/>).

La Figure V.14 présente la carte de la réserve utile établie par l'USDA. Ces valeurs sont nettement supérieures à celles obtenues avec le « modèle LAI ».

Les cartes détaillées de la réserve utile « modèle LAI » pour les Etats de la Caroline du nord, du Dakota du nord, de l'Ohio et de Washington sont présentées dans la Figure V.16, la Figure V.18, la Figure V.20 et la Figure V.22 respectivement. De la même façon, les cartes détaillées de la réserve utile USDA de ces quatre Etats sont présentées dans la Figure V.17, la Figure V.19, la Figure V.21 et la Figure V.23.

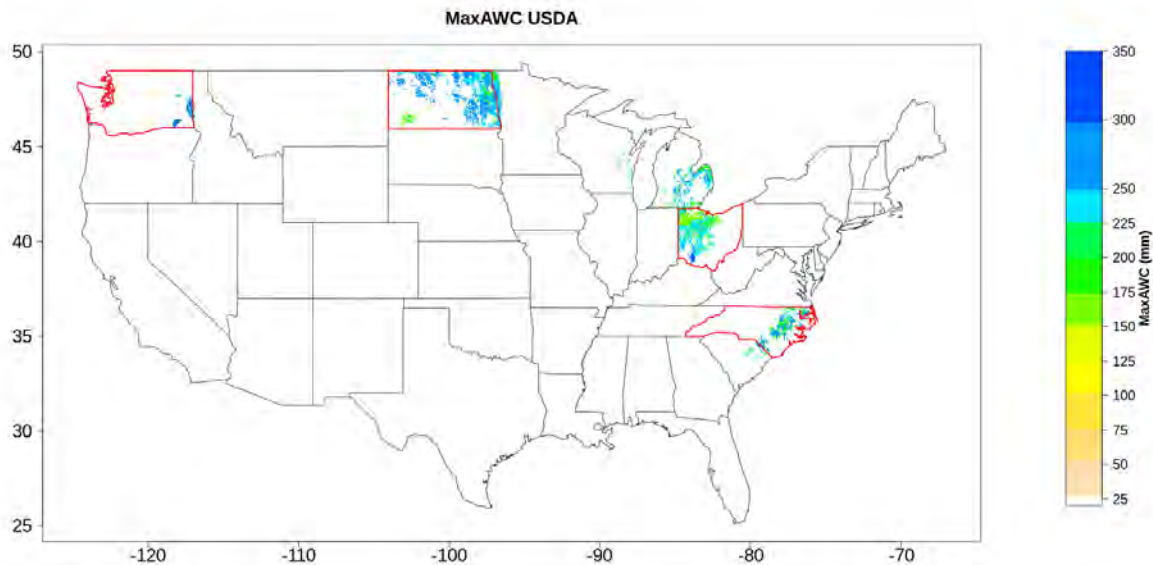


Figure V.14 Carte de la réserve utile estimée par l'USDA pour les Etats Unis : Etat de la Caroline du nord, du Dakota du nord, de l'Ohio et de Washington.

Pour l'ensemble des points représentant des cultures de blé sélectionnés, la médiane des réserves utiles issues du « modèle LAI » est de 92 mm, et la médiane des réserves utiles issues de l'USDA est de 244 mm. La distribution des valeurs de MaxAWC est présentée dans la Figure V.15.

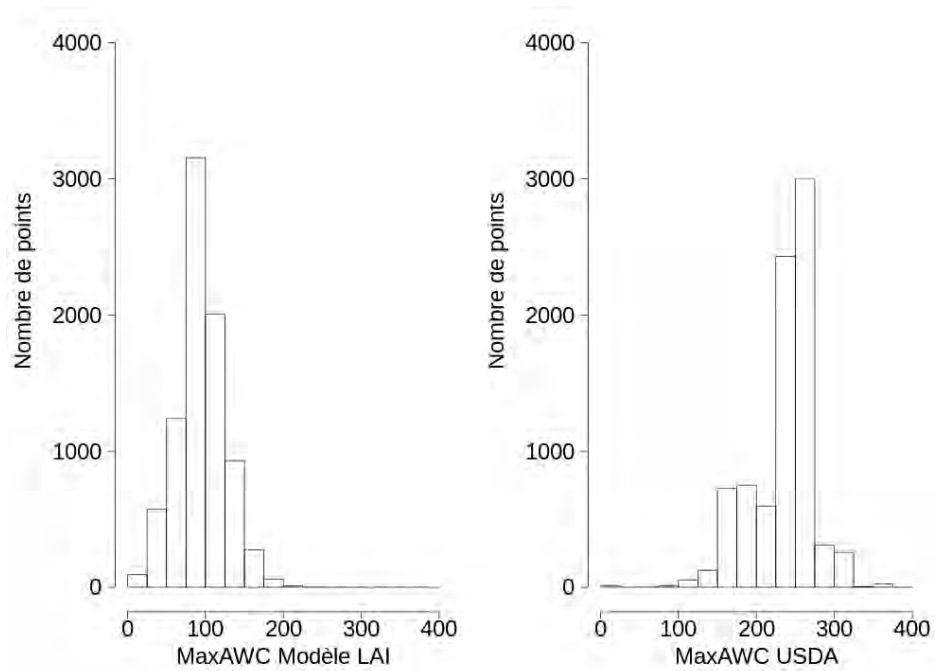


Figure V.15 Histogramme des valeurs de MaxAWC « modèle LAI » et USDA pour les couverts de blé des Etats Unis en considérant les quatre Etats : Caroline du nord, Dakota du nord, Ohio et Washington.

Le Tableau V-2 résume pour chaque Etats la médiane des valeurs de MaxAWC obtenues par les deux méthodes. Les valeurs de MaxAWC « modèle LAI » sont nettement sous estimées par rapport aux valeurs de MaxAWC USDA.

	Médiane MaxAWC « modèle LAI » (mm)	Médiane MaxAWC USDA (mm)
Caroline du nord	63	253
Dakota du nord	90	260
Ohio	122	227
Washington	60	290

Tableau V-2 Médiane des cartes de MaxAWC « modèle LAI » et USDA pour les quatre Etats.

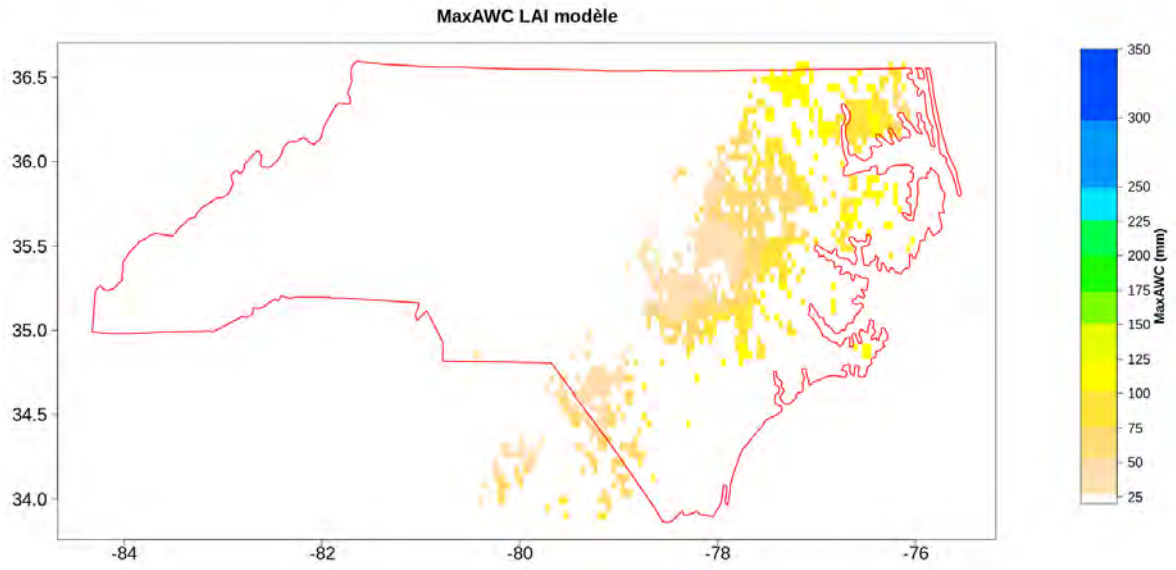


Figure V.16 Réserve utile LAI modèle, Caroline du nord

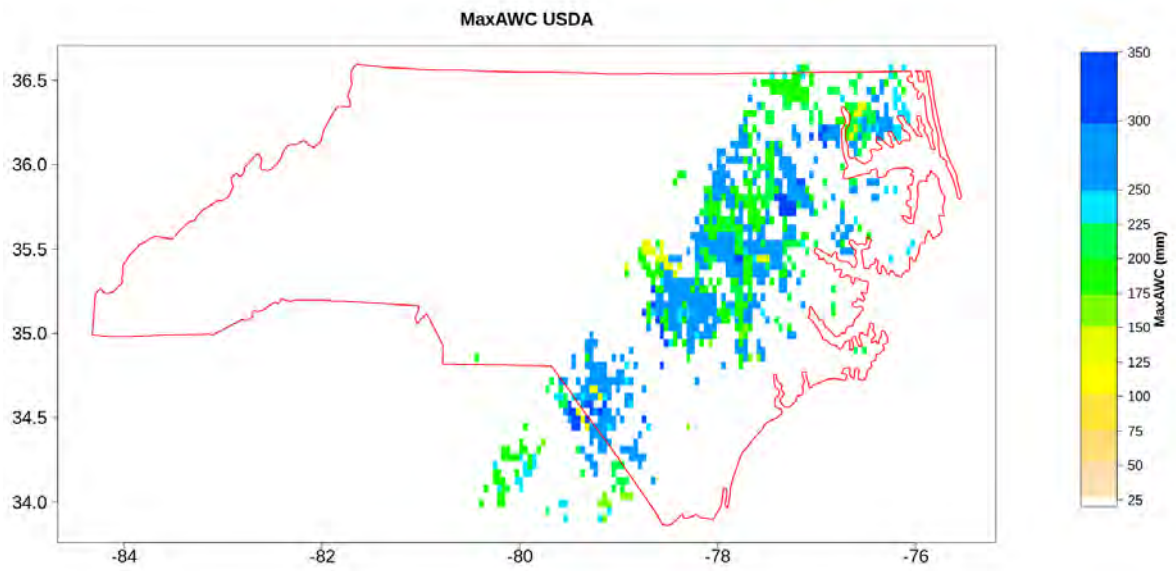


Figure V.17 Carte de la réserve utile USDA Caroline du nord

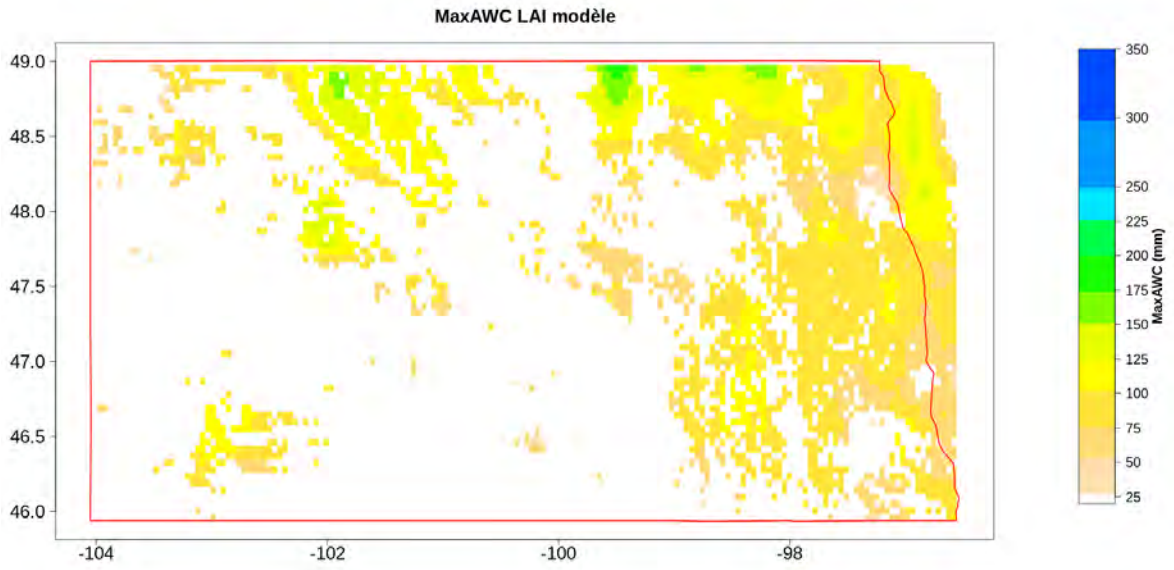


Figure V.18 Carte de la réserve utile de l'Etat du Dakota du nord

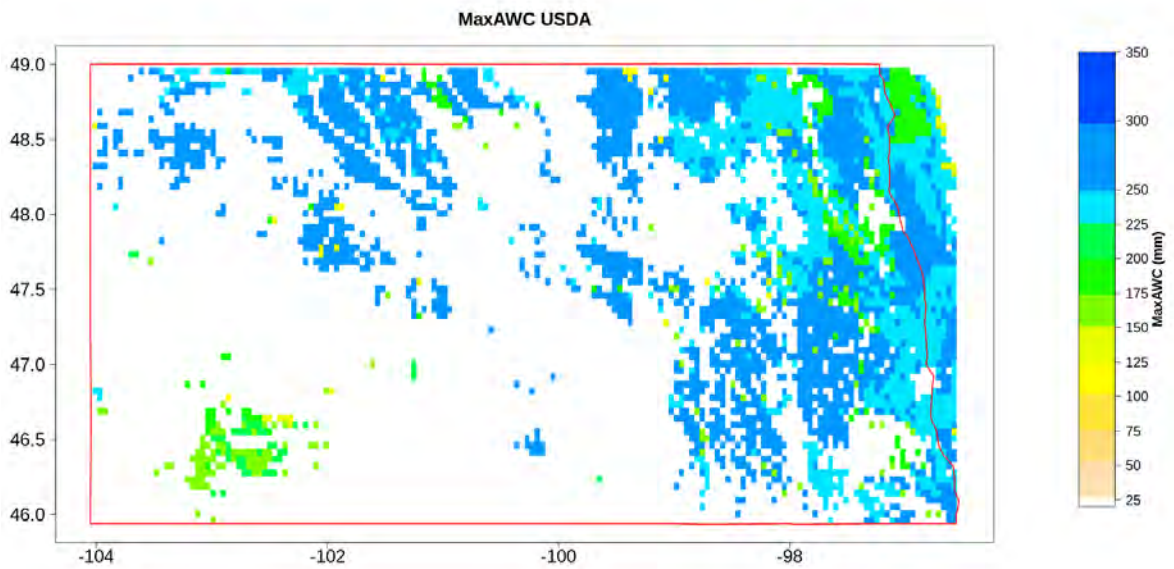


Figure V.19 Carte de la réserve utile USDA de l'Etat du Dakota du nord

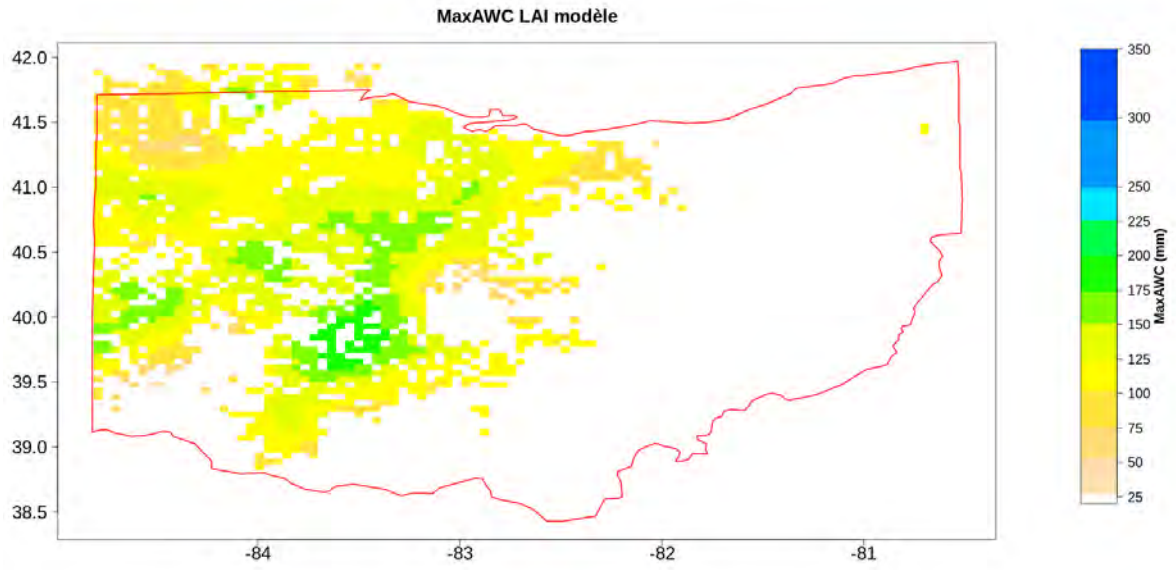


Figure V.20 Carte de la réserve utile modèle LAI de l'Etat de l'Ohio

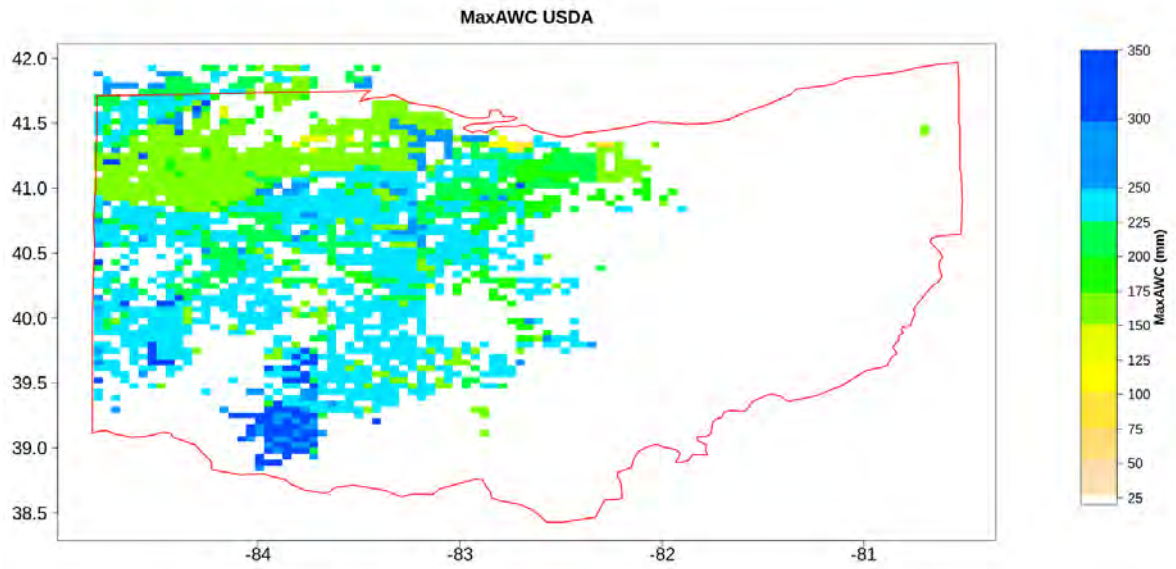


Figure V.21 Carte de la réserve utile USDA de l'Etat de l'Ohio

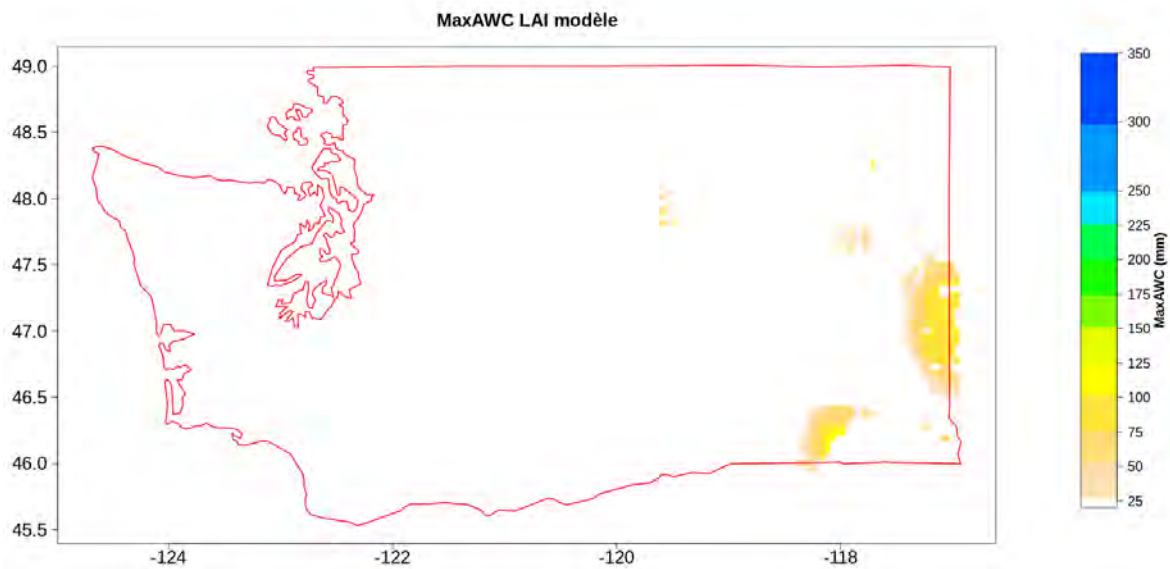


Figure V.22 Carte de la réserve utile modèle LAI de l'Etat de Washington

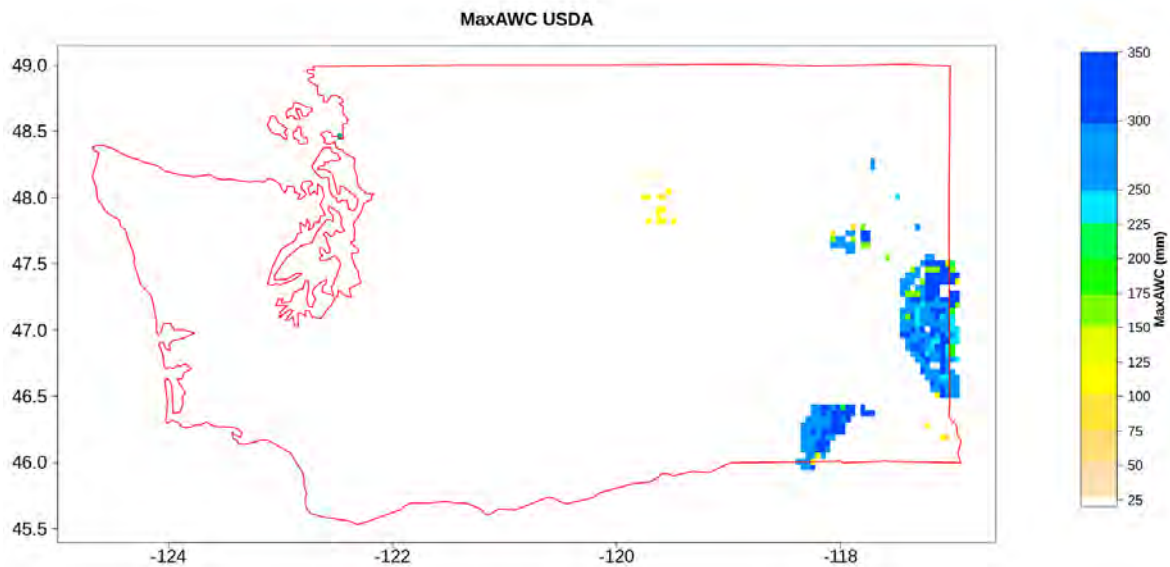


Figure V.23 Carte de la réserve utile USDA de l'Etat de Washington

3.2 Ukraine

La Figure V.24 présente la cartographie des valeurs de MaxAWC « modèle LAI » ainsi que leur distribution. Le modèle empirique estime des valeurs extrêmement faibles de réserve utile en Ukraine. Celui-ci étant basé sur les valeurs maximales de LAI, des valeurs très faibles de LAI, c'est-à-dire une valeur inférieure à $1.93 \text{ m}^2 \cdot \text{m}^{-2}$ d'après le « modèle LAI », amène donc à des valeurs de réserves utiles nulles et aberrantes (valeurs négatives). La majorité de ces faibles valeurs de LAI, menant à une estimation aberrante de réserve utile, correspondent au sud du pays, là où se concentrent les terres noires et les cultures de céréales, présentant aussi des conditions en eau limitée (Lopez-Lozano et al., 2015). Elles sont liées aux faibles rendements observés comme expliqué dans la section 2.2.

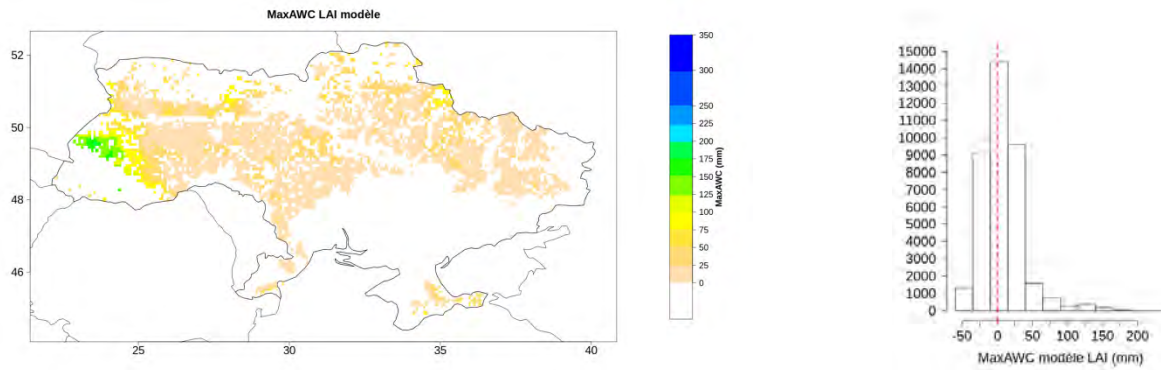


Figure V.24 Carte de MaxAWC « modèle LAI » pour les couverts de cultures de céréales à paille en Ukraine et distribution des valeurs de MaxAWC

Ainsi se pose la question de l'applicabilité du « modèle LAI » en Ukraine. La faible variabilité spatiale des valeurs de MaxAWC « modèle LAI » montre une médiane à 30 mm et un écart type de 14 mm (lorsque l'on considère uniquement les valeurs de MaxAWC supérieures à 20 mm, les autres étant considérées comme aberrantes). La Figure V.25 présente la carte de la réserve utile et la distribution de ces valeurs pour les points ne présentant pas de tendance dans les séries temporelles de valeurs maximales de LAI. L'impact de l'intégration de MaxAWC « modèle LAI » au sein du modèle est évalué dans la section 4.2 pour des points proches des valeurs 30 mm, 50 mm et 70 mm.

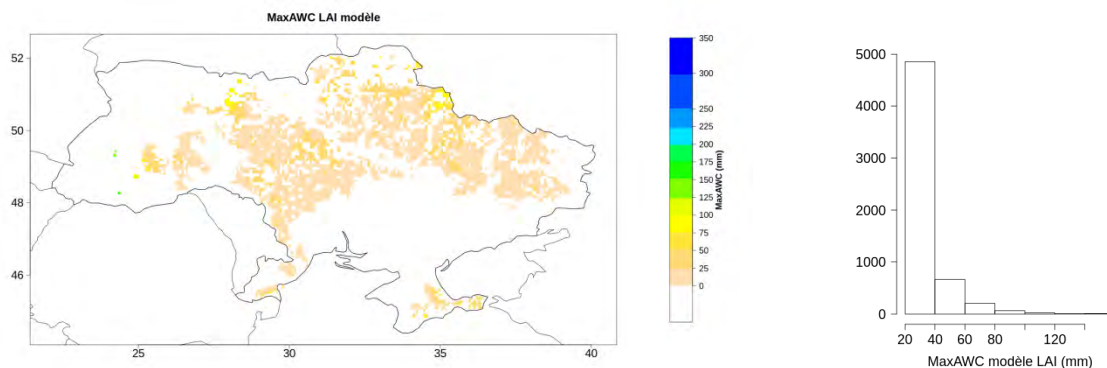


Figure V.25 Carte des MaxAWC pour les points ne présentant pas de tendance dans les valeurs de LAI satellitaire

3.3 Bilan de la cartographie de MaxAWC « modèle LAI » pour les Etats Unis et l'Ukraine

- On observe une grande variabilité spatiale des valeurs de MaxAWC « modèle LAI » aux Etats-Unis et ces valeurs sont nettement plus faibles que celles données par l'USDA ;
- Une très faible variabilité spatiale des valeurs de MaxAWC « modèle LAI » est observée en Ukraine. Des valeurs très faibles sont estimées. Ceci est dû aux très faibles valeurs maximales de LAI observées, malgré la désagrégation des produits satellitaires plus représentatifs des cultures de céréales à paille.
- Dans les deux cas, les faibles valeurs de réserve utile que j'obtiens peuvent être reliées au type d'agriculture appliquée dans ces pays : une agriculture extensive, ou partiellement intensive, qui ne maximise pas la production des

cultures à l'hectare par l'utilisation d'intrants (en cohérence avec les faibles rendements observés). La production n'étant pas maximisée, on peut faire l'hypothèse que la réserve utile, qui dépend en partie de la capacité de la végétation à développer un système racinaire, mais aussi de précipitations suffisantes, n'atteint pas elle non plus sa valeur maximale.

4. Impact sur la représentation de la réserve utile du « modèle LAI » dans le LDAS

4.1 Etats-Unis

J'ai évalué l'utilisation de la réserve utile « modèle LAI » au sein du LDAS en comparant les performances du modèle avec la version standard. Pour cela, des points dans chaque Etat présentant des valeurs de MaxAWC proches des valeurs 60 mm, 80 mm, 100 mm, 120 mm et 140 mm ont été choisis pour simuler le cycle d'une culture de blé en utilisant le LDAS. Le nombre de points sélectionnés par Etat et par valeur de MaxAWC « modèle LAI » est donné dans le Tableau V-3. L'Etat de Washington ne présente pas suffisamment de points présentant une réserve utile « modèle LAI » supérieure à une valeur de 100 mm. Le groupe correspondant à une réserve utile « modèle LAI » de 120 mm sera donc composé de 30 points. La Caroline du Nord ne présente pas suffisamment de points présentant une réserve utile supérieure à 120 mm. Le groupe de points correspondant à une valeur de réserve utile « modèle LAI » sera composé de 20 points. Le nombre de points présenté pour chaque figure correspondant aux différentes valeurs de réserves utiles est exposé dans la dernière ligne du Tableau V-3.

Nombre des points sélectionnés	MaxAWC 60 mm	MaxAWC 80 mm	MaxAWC 100 mm	MaxAWC 120 mm	MaxAWC 140 mm	Total des points
Caroline du Nord	10	10	10	10	-	40
Dakota du nord	10	10	10	10	10	50
Ohio	10	10	10	10	10	50
Washington	10	10	10	-	-	30
Total de points	40	40	40	30	20	170

Tableau V-3 Nombre de points par Etat et par gamme de MaxAWC « modèle LAI »

4.1.1 Impact sur les incréments d'analyse

Pour chaque point, il y a deux simulations : l'une effectuée avec MaxAWC « modèle LAI » et l'autre effectuée avec MaxAWC standard. Les médianes des incréments d'analyse calculés sur la période de sénescence (période lors de laquelle MaxAWC a un impact important sur la manifestation des effets du stress hydrique sur la végétation) pour les deux types de simulations sont comparées. Les diagrammes de dispersion pour les cinq valeurs de réserves utiles sont présentés dans la Figure V.26. Chaque diagramme montre l'ensemble des points issus des quatre Etats lorsque cela est possible (cf. dernière ligne du Tableau V-3). Les points se situant dans les parties hachurées de chaque diagramme indiquent que la performance du modèle en version standard est meilleure, c'est-à-dire une médiane des incréments d'analyse plus faible, que celle avec MaxAWC « modèle LAI ». Au contraire, les points se situant dans les parties non hachurées montrent une amélioration de la performance du modèle avec les valeurs de MaxAWC « modèle LAI ». Pour les faibles valeurs de MaxAWC « modèle LAI », c'est-à-dire 60 mm, 80 mm et 100 mm, la médiane des incréments d'analyse est presque systématiquement réduite par rapport à la médiane des incréments

d'analyse standard. L'impact est moins important pour les valeurs de réserve utile supérieures à 100 mm du fait que ces valeurs sont plus proches de la valeur par défaut de 132 mm.

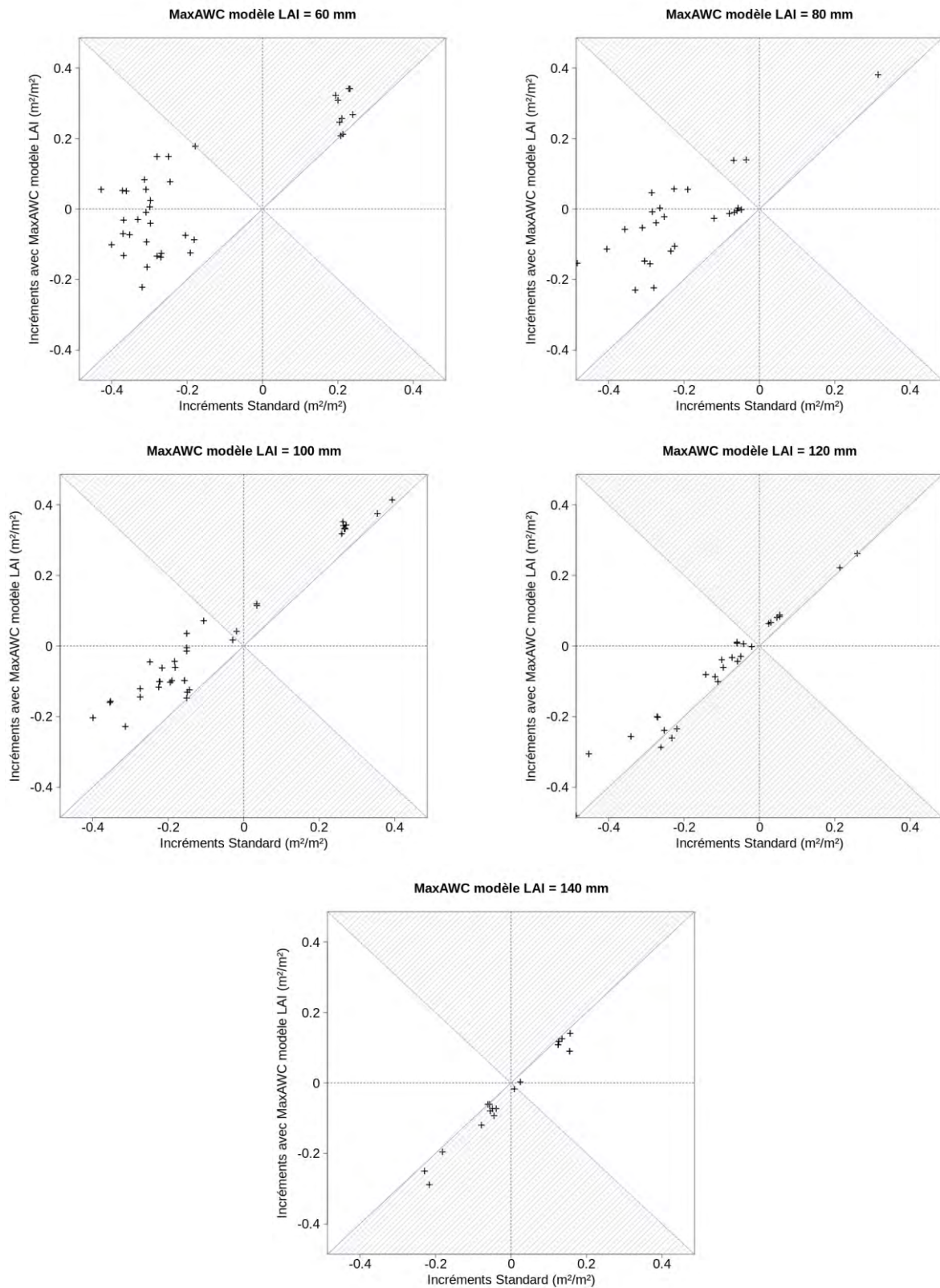


Figure V.26 Diagramme de dispersion des incréments d'analyse LDAS standard et LDAS avec MaxAWC « modèle LAI » pour chaque groupe de points pour chaque valeur de MaxAWC « modèle » (cf Tableau V-3)

4.1.2 Impact sur la biomasse

La variabilité interannuelle de la biomasse simulée est comparée à celle des rendements de blé pour chaque Etat (Tableau V-4). Seules les biomasses simulées par le LDAS avec MaxAWC « modèle LAI » de l'Etat de Washington montre des corrélations temporelles significatives avec les rendements pour environ la moitié des points.

	MaxAWC 60 mm	MaxAWC 80 mm	MaxAWC 100 mm	MaxAWC 120 mm	MaxAWC 140 mm
Caroline du Nord	0 / 10	0 / 10	1 / 10	0 / 10	-
Dakota du nord	0 / 10	0 / 10	0 / 10	0 / 10	0 / 10
Ohio	0 / 10	0 / 10	0 / 10	0 / 10	0 / 10
Washington	5 / 10	3/10	6 / 10	-	-

Tableau V-4 Nombre de sites dont la biomasse simulée par le LDAS MaxAWC « modèle LAI » est significativement corrélée aux rendements (p-value < 0.01)

En conditions standard, 90 % des points sélectionnés dans l'Etat de Washington montrent une corrélation significative entre biomasse simulée et rendement (Tableau V-5).

	MaxAWC 132 mm
Caroline du Nord	5 / 40
Dakota du nord	0 / 50
Ohio	0 / 50
Washington	27 / 30

Tableau V-5 Nombre de sites dont la biomasse simulée par le LDAS standard est significativement corrélée aux rendements (p-value < 0.01)

Les valeurs de la médiane des biomasses maximales annuelles simulées par le LDAS pour chaque Etat et pour chaque gamme de MaxAWC « modèle LAI » sont présentées dans le Tableau V-6.

Les valeurs médianes de rendements en grains pour les quatre états des Etats-Unis considérés vont de 0.35 kg m⁻² (Caroline du nord) pour le minimum, à 0.68 kg.m⁻² (Ohio) pour le maximum. Les valeurs médianes de biomasses maximales simulées par le LDAS MaxAWC « modèle LAI » vont de 0.42 kg.m⁻² (Washington) pour le minimum à 0.91 kg.m⁻² (Dakota du nord) pour le maximum. Enfin, les valeurs médianes de biomasses maximales simulées par le LDAS MaxAWC standard vont de 0.71 kg.m⁻² (Caroline du nord) à 0.85 kg.m⁻² (Dakota du nord).

Les valeurs de biomasses maximales simulées sur la France sont généralement au moins deux fois plus élevées que les valeurs de rendement en grains. Les valeurs simulées dans le cas des Etats-Unis, semblent sous-estimées en comparaison avec les valeurs de rendements en grains. De ce point de vue, seul l'Etat de Caroline du Nord présente des biomasses simulées par le LDAS cohérentes.

	(kg.m ⁻²)	MaxAWC 60 mm	MaxAWC 80 mm	MaxAWC 100 mm	MaxAWC 120 mm	MaxAWC 140 mm
C. N	BagX	0.65 ± 0.11	0.67 ± 0.12	0.72 ± 0.13	0.76 ± 0.13	-
	BagX std	0.71 ± 0.04				
	GY	0.35 ± 0.06				
D. N	BagX	0.58 ± 0.13	0.74 ± 0.14	0.82 ± 0.16	0.83 ± 0.19	0.91 ± 0.19
	BagX std	0.85 ± 0.16				
	GY	0.50 ± 0.09				
O	BagX	0.59 ± 0.11	0.65 ± 0.15	0.76 ± 0.17	0.77 ± 0.18	0.88 ± 15
	BagX std	0.82 ± 0.16				
	GY	0.68 ± 0.05				
W	BagX	0.42 ± 0.10	0.57 ± 0.11	0.61 ± 0.08	-	-
	BagX std	0.74 ± 0.10				
	GY	0.62 ± 0.06				

Tableau V-6 Médiane des biomasses simulées avec LDAS et MaxAWC « modèle LAI » (BagX), LDAS standard (BagX std) et médiane des rendements (GY) pour les quatre Etats : Caroline du nord (C. N), Dakota de nord (D. N), Ohio (O) et Washington (W).

La Figure V.27, la Figure V.28 et la Figure V.29 présentent la comparaison des anomalies standardisées moyennées pour chaque groupe de points de la biomasse simulée par le LDAS avec MaxAWC « modèle LAI » ou MaxAWC standard, avec les anomalies standardisées des rendements de l'Etat de Washington, qui est celui où les meilleures corrélations sont observées. La valeur du R² est égale à 0.54 (0.66), 0.51 (0.60) et 0.44 (0.47) pour les valeurs de MaxAWC « modèle LAI » égales à 60 mm (132 mm), 80 mm (132 mm) et 100 mm (132 mm), respectivement. Les meilleures corrélations sont obtenues avec le LDAS standard.

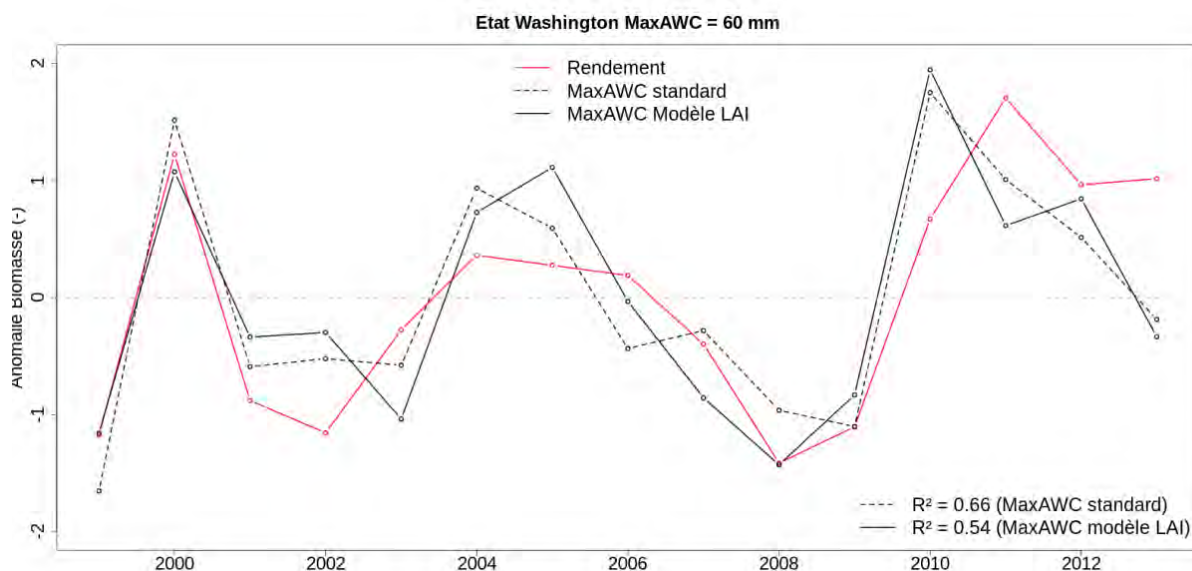


Figure V.27 Médiane des anomalies standardisées des biomasses LDAS avec MaxAWC « modèle LAI » égale à 60 mm, LDAS standard et des rendements de blé pour les 10 points sélectionnés de l'Etat de Washington

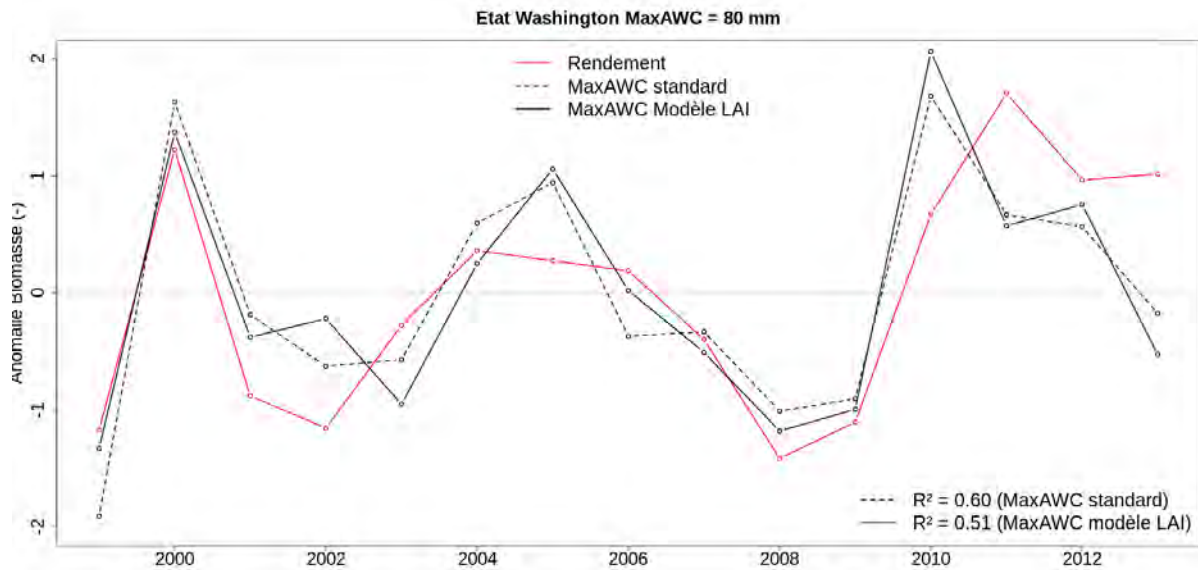


Figure V.28 Médiane des anomalies standardisées des biomasses LDAS avec MaxAWC « modèle LAI » égale à 80 mm, LDAS standard et des rendements de blé pour les 10 points sélectionnés de l'Etat de Washington

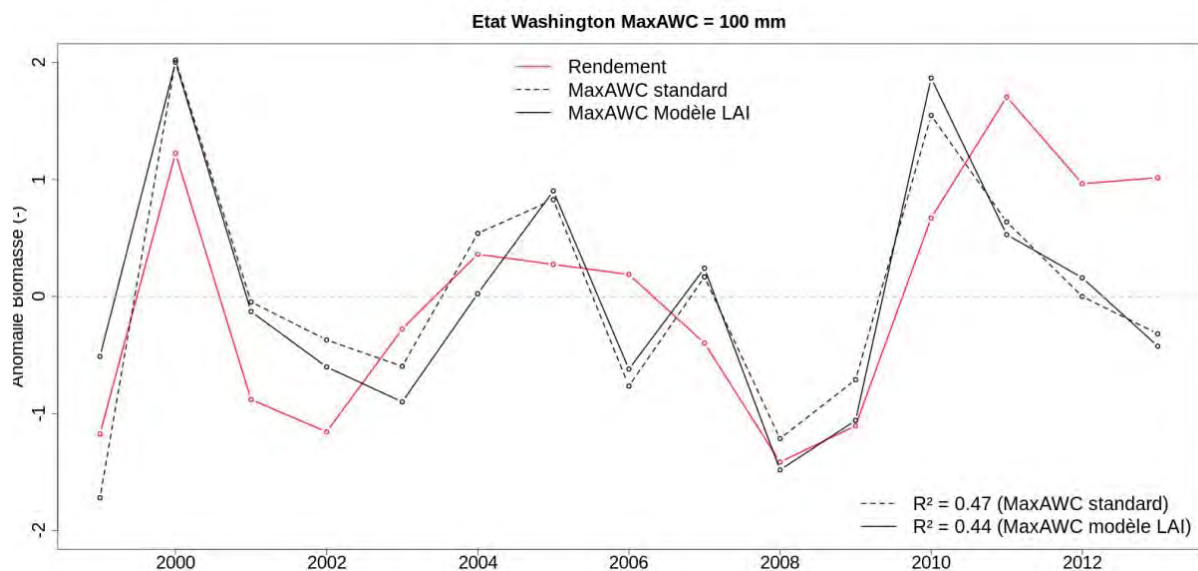


Figure V.29 Médiane des anomalies standardisées des biomasses LDAS avec MaxAWC « modèle LAI » égale à 100 mm, LDAS standard et des rendements de blé pour les 10 points sélectionnés de l'Etat de Washington

4.1.3 Impact sur la GPP

Une évaluation complémentaire de la méthode est basée sur la comparaison entre la GPP simulée et les produits de GPP FLUXNET-MTE. Les diagrammes de dispersion des RMSE calculés entre la GPP MaxAWC « modèle LAI » et la GPP MaxAWC standard sont présentés dans la Figure V.30. De la même façon, chaque diagramme présente la totalité des points issus des quatre Etats pour une valeur de réserve utile donnée. Le RMSE est systématiquement amélioré pour les faibles valeurs de MaxAWC « modèle LAI ». On observe donc une réduction drastique des plus fortes erreurs qui concernent les faibles valeurs de réserves utiles.

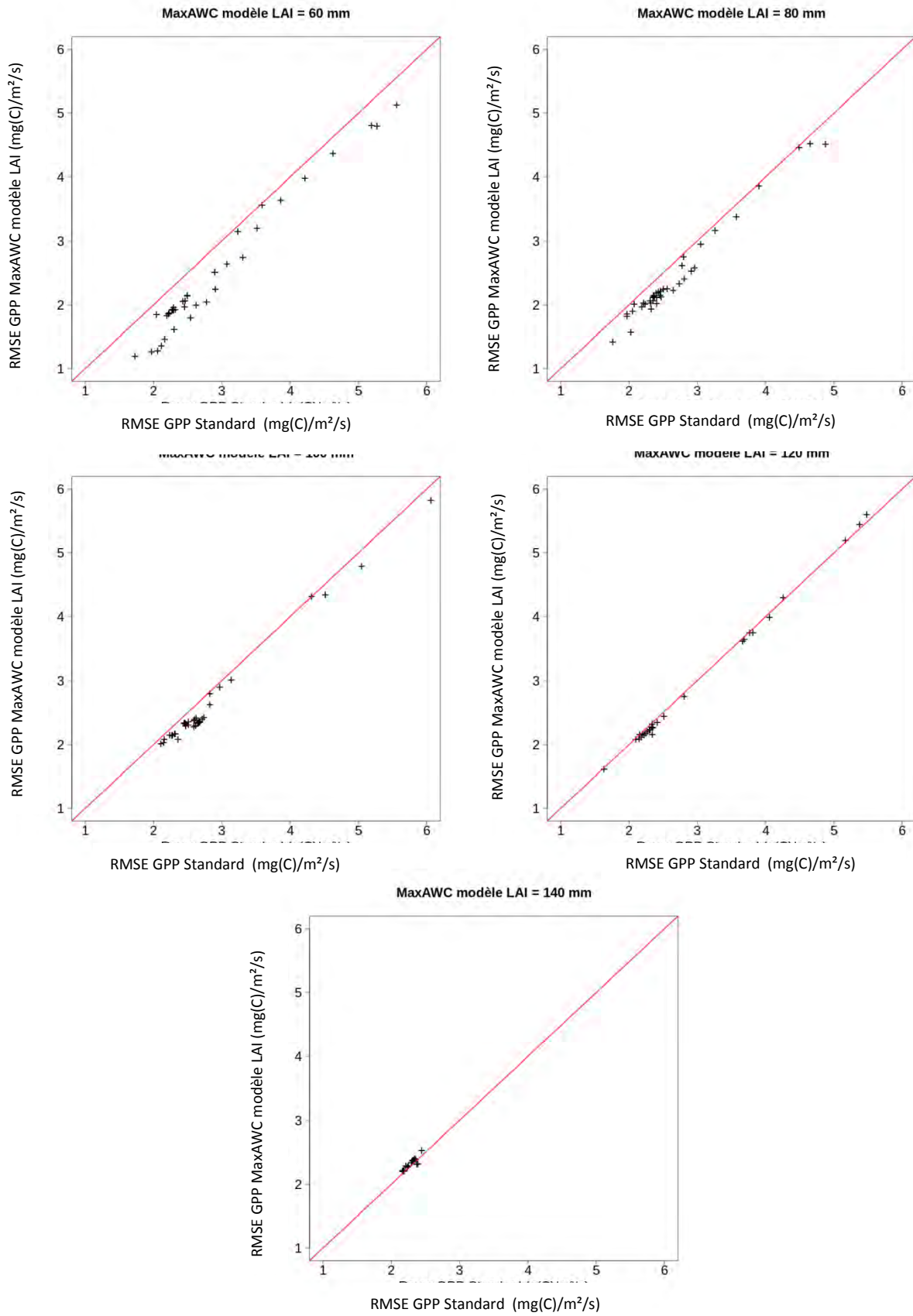


Figure V.30 Apport de la prise en compte de MAXAWC modèle LAI dans le modèle ISBA sur la GPP pour chaque groupe de valeurs de MaxAWC aux Etats Unis

4.2 Ukraine

L'impact de l'intégration de MaxAWC « modèle LAI » dans le modèle est évalué pour des points proches des valeurs 30 mm, 50 mm et 70 mm dont la répartition est résumée dans le Tableau V-7. Des valeurs supérieures à 70 mm ne permettent pas d'obtenir un groupe de 10 points présentant une valeur de réserve utile proche. En effet, 70 mm correspond au quantile pour lequel 90 % des points présentent une valeur de MaxAWC « modèle LAI » inférieure.

Nombre des points sélectionnés	MaxAWC 30 mm	MaxAWC 50 mm	MaxAWC 70 mm	Total des points
Ukraine	10	10	10	30

Tableau V-7 Nombre de points par gamme de MaxAWC « modèle LAI »

4.2.1 Impact sur les incréments d'analyse

De la même manière que pour les Etats-Unis dans la section précédente, j'ai comparé la médiane des incréments d'analyse lors de la période de sénescence du LAI simulé avec le LDAS standard et le LDAS intégrant les valeurs de MaxAWC « modèle LAI » (Figure V.26). De nouveau, on observe une amélioration du modèle, la médiane des incréments d'analyse étant systématiquement diminuée après prise en compte des valeurs de MaxAWC estimées à partir du LAI satellitaire.

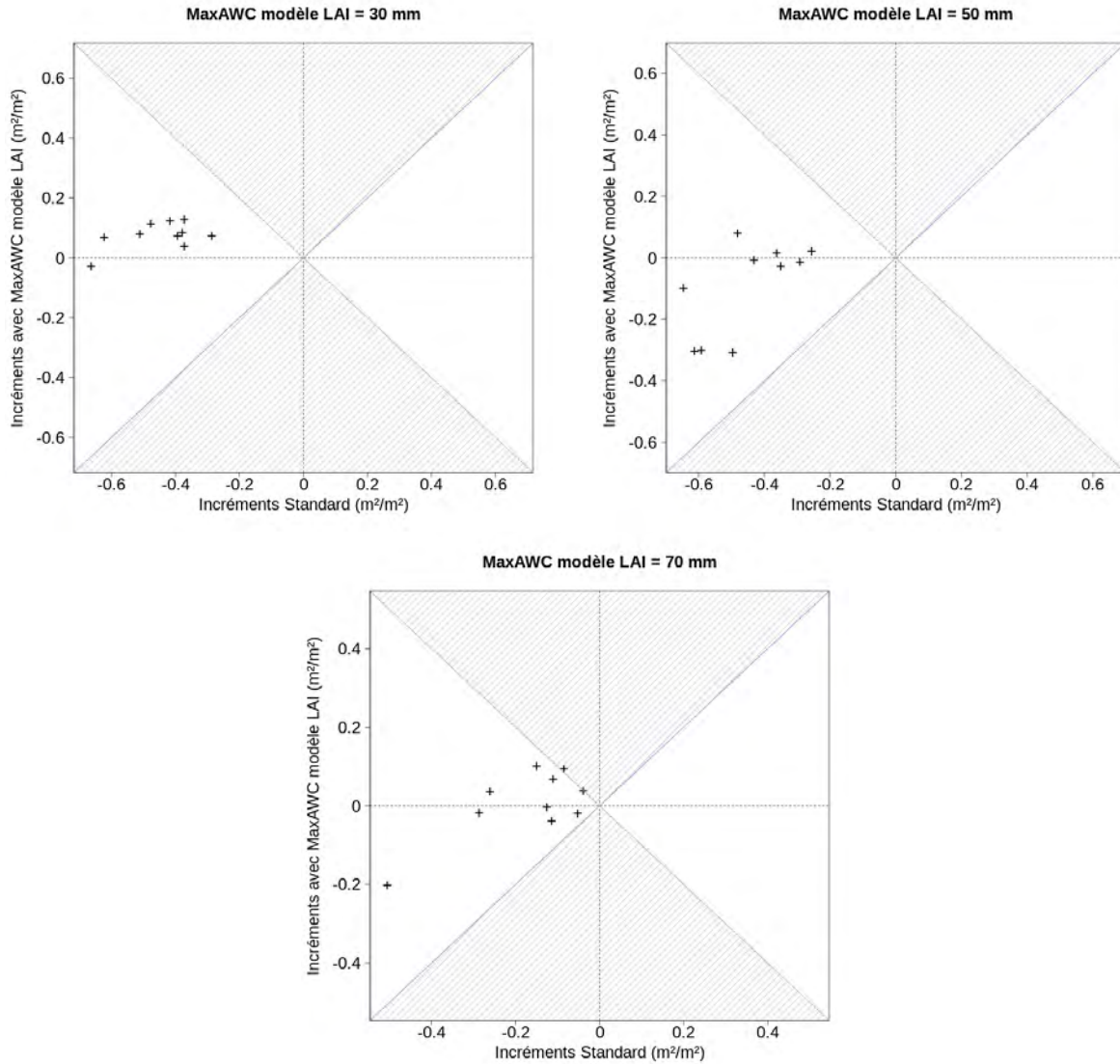


Figure V.31 Diagramme de dispersion des incréments d'analyse LDAS standard et LDAS avec MaxAWC « modèle LAI » pour l'Ukraine

4.2.2 Impact sur la biomasse

La biomasse simulée par le LDAS standard et par le LDAS intégrant les valeurs de MaxAWC « modèle LAI » sont comparées aux rendements de blé et de seigle. Les résultats sont présentés dans le Tableau V-8. Parmi les 30 points sélectionnés, aucun ne présente de corrélation temporelle significative entre la biomasse simulée avec le LDAS intégrant MaxAWC « modèle LAI » et les rendements de céréales.

Nombre de points significativement corrélés avec les rendements (p value < 0.01)	MaxAWC = 30 mm	MaxAWC = 50 mm	MaxAWC = 70 mm
Seigle	0 / 10	0 / 10	0 / 10
Blé	0 / 10	0 / 10	0 / 10

Tableau V-8 Nombre de sites dont la biomasse simulée avec le LDAS MaxAWC « modèle LAI » est significativement corrélée avec les rendements de blé et de seigle

En revanche, plus de 65 % de ces mêmes points présentent une corrélation significative entre la biomasse simulée avec le LDAS et MaxAWC standard et les rendements (Tableau V-9).

Nombre de points significativement corrélés avec les rendements (p value < 0.01)	MaxAWC = 132 mm
Seigle	21 / 30
Blé	22 / 30

Tableau V-9 Nombre de sites dont la biomasse simulée avec le LDAS MaxAWC standard est significativement corrélée avec les rendements de blé et de seigle

Les valeurs médianes des biomasses simulées et observées sont présentées dans le Tableau V-10. Les rendements observés sont très faibles. Le LDAS permet de simuler des biomasses maximales cohérentes c'est-à-dire qu'elles représentent au moins le double de la valeur des rendements en grains.

	MaxAWC = 30 mm	MaxAWC = 50 mm	MaxAWC = 70 mm
Médiane BagX simulée MaxAWC « modèle LAI » ± écart-type (kg.m ⁻²)	0.36 ± 0.07	0.41 ± 0.09	0.53 ± 0.10
Médiane BagX simulée MaxAWC standard ± écart-type (kg.m ⁻²)	0.61 ± 0.12		
Médiane GY seigle ± écart-type (kg.m ⁻²)	0.28 ± 0.06		
Médiane GY blé ± écart-type (kg.m ⁻²)	0.22 ± 0.04		

Tableau V-10 Médianes et écart-types des biomasses simulées et observées pour les trois valeurs de MaxAWC « modèle LAI » 30 mm, 50 mm et 70 mm

Les biomasses simulées par le modèle avec ces valeurs de réserves utiles, ne permettent pas de reproduire la variabilité interannuelle des rendements : aucun site n'est significativement corrélé avec les rendements (cf. Tableau V-8). Seule la version standard du LDAS permet de simuler correctement la variabilité interannuelle des rendements avec plus de 65 % des sites significativement corrélés. La comparaison de la médiane des anomalies standardisées, des rendements, de la biomasse LDAS MaxAWC « modèle LAI » et de la biomasse LDAS standard sont présentées dans la Figure V.32, la Figure V.33 et la Figure V.34 pour les trois groupes de dix points avec MaxAWC « modèle LAI » égale à 30 mm, 50 mm et 70 mm respectivement. Les valeurs de R² sont de 0.26, 0.34 et 0.28, respectivement. Pour ces mêmes trois groupes de 10 points, la valeur de R² obtenue avec le LDAS standard est de 0.54, 0.58 et 0.47, respectivement.

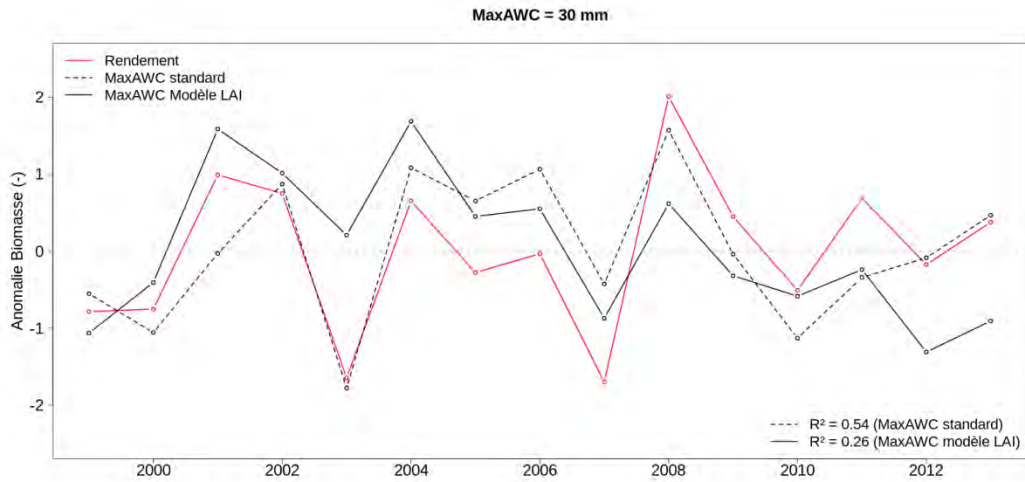


Figure V.32 Médiane des anomalies standardisées des biomasses LDAS avec MaxAWC « modèle LAI » égale à 30 mm, LDAS standard et des rendements de seigle pour les 10 points sélectionnés

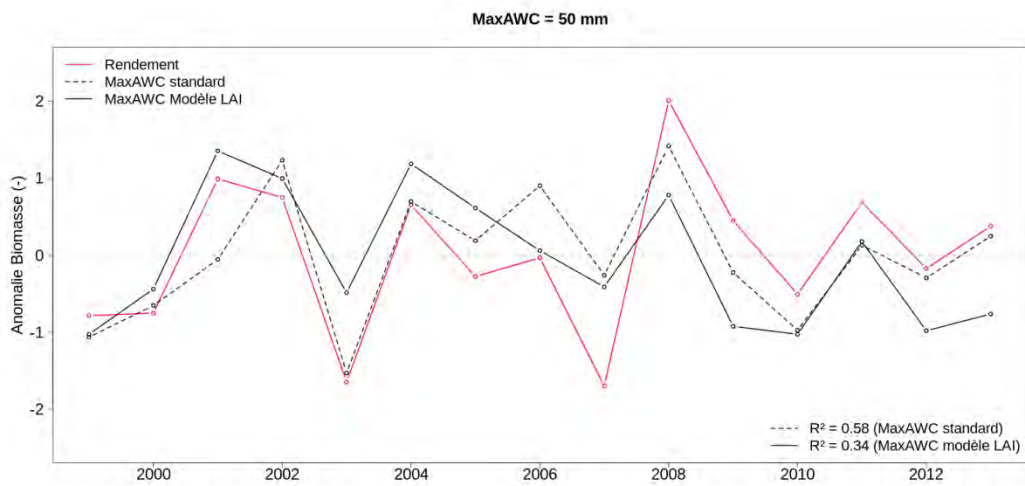


Figure V.33 Médiane des anomalies standardisées des biomasses LDAS avec MaxAWC « modèle LAI » égale à 50 mm, LDAS standard et des rendements de seigle pour les 10 points sélectionnés

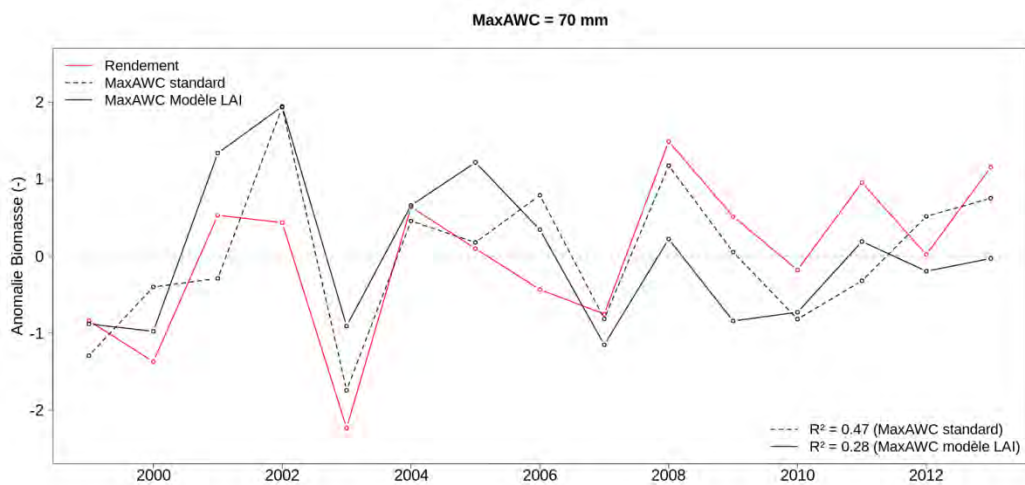


Figure V.34 Médiane des anomalies standardisées des biomasses LDAS avec MaxAWC « modèle LAI » égale à 70 mm, LDAS standard et des rendements de seigle pour les 10 points sélectionnés.

Les évènements ayant limité la croissance des cultures comme ce fut le cas pour la sécheresse de 2007 et les températures particulièrement basses observées au printemps 2003 sont bien reproduits. Le LDAS reproduit aussi l'anomalie particulièrement positive de 2008.

4.2.3 Impact sur la GPP

L'évaluation complémentaire basée sur la comparaison de la GPP simulée avec les produits de GPP FLUXNET-MTE est présentée ici. On observe à nouveau une amélioration systématique de la valeur du RMSE après intégration des valeurs de MaxAWC « modèle LAI » au sein du LDAS (Figure V.35).

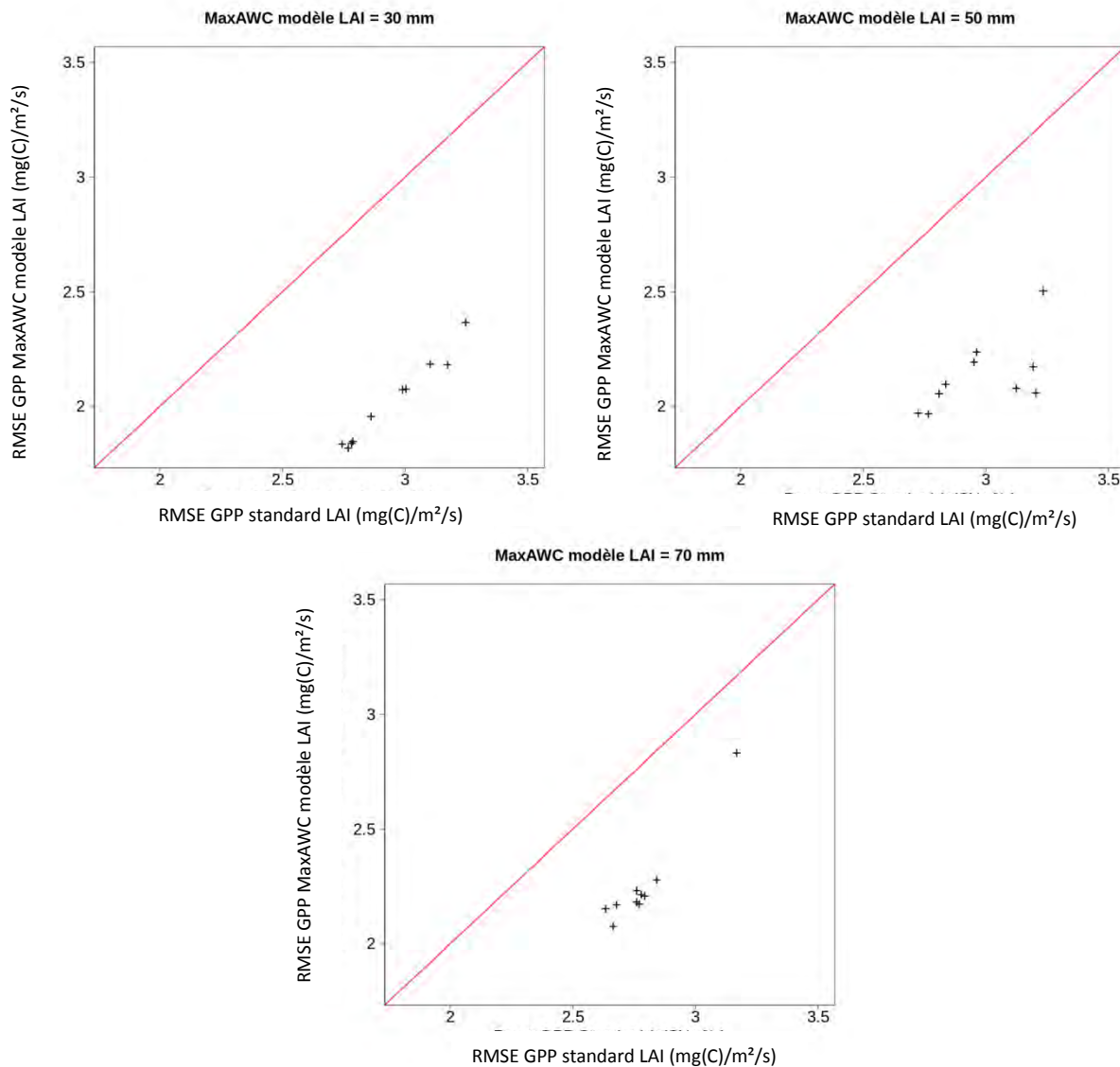


Figure V.35 Apport de la prise en compte de MaxAWC modèle LAI dans le modèle ISBA sur la GPP pour chaque groupe de valeurs de MaxAWC en Ukraine

4.3 Bilan de l'étude de l'intégration des valeurs de MaxAWC « modèle LAI » dans le LDAS

- Amélioration des incréments d'analyse (quasi systématique pour les valeurs faibles de MaxAWC) pour les Etats Unis et pour l'Ukraine, après intégration

des valeurs de MaxAWC « modèle LAI », c'est-à-dire estimées à partir des données satellitaires;

- La variabilité interannuelle des valeurs maximales de biomasses simulées (avec MaxAWC « modèle LAI » et avec MaxAWC standard) est comparée à celle des rendements de céréales observés. Pour les deux zones d'études, les meilleurs résultats, concernant la représentation de la biomasse dans le modèle, sont obtenus avec la valeur de MaxAWC standard. Pour les Etats-Unis, seul l'Etat de Washington montre des corrélations significatives entre les biomasses aériennes simulées et les rendements. Cependant, la biomasse aérienne semble être sous-estimée par le modèle pour cet Etat. Pour l'Ukraine, environ 65 % des points montrent des corrélations significatives entre les biomasses simulées et les rendements.

Une évaluation complémentaire consiste à comparer une autre variable simulée par le modèle et dont les observations disponibles sont indépendantes de celles utilisées dans la méthode : la GPP. On observe une amélioration systématique du RMSE suite à l'intégration des valeurs de MaxAWC « modèle LAI », aussi bien pour les Etats Unis (particulièrement pour les réserves utiles inférieures à 100 mm) que pour l'Ukraine dont les réserves utiles estimées sont extrêmement faibles ;

- De manière générale, les résultats obtenus sur les Etats-Unis et l'Ukraine sont moins cohérents que sur la France. Cela semble montrer que le « modèle LAI » obtenu sur la France pour MaxAWC n'est pas directement applicable à des régions d'agriculture extensive et/ou de climat différent.

5. Relation entre la moyenne des précipitations et MaxAWC « modèle LAI »

Le calage de la réserve utile effectuée sur la France, dans le Chapitre 4, a montré une forte anti-corrélation entre les valeurs de réserve utile optimisées et la moyenne des sommes de précipitations printanières. La capacité de la végétation à développer un système racinaire dépend non seulement des propriétés du sol (texture, obstacle à l'enracinement, etc.) mais aussi du climat (Gao et al., 2014). Ainsi, la végétation développerait un système racinaire profond lors d'un déficit de précipitation au printemps. Ceci correspond à une augmentation de la réserve utile en réponse au stress hydrique. Au contraire, lorsque les conditions en eau ne sont pas limitées, la végétation n'a pas besoin de développer un système racinaire profond, l'eau étant disponible facilement. Cela conduit à une réserve utile plus faible. J'ai évalué cette hypothèse, qui semble valide sur la France, à partir des réserves utiles « modèle LAI » et des forçages ERA-interim pour les Etats Unis et l'Ukraine.

5.1 Etats-Unis

Pour tous les points, parmi les quatre Etats, proches des valeurs de réserves utiles allant de 20 mm à 200 mm avec un intervalle de 15 mm, j'ai extrait des forçages Era-interim, les séries temporelles des précipitations sur la période 1999-2013. La période considérée sur laquelle la moyenne des précipitations est calculée correspond à une période de trois mois précédant le pic de LAI satellitaire. Dans ces régions, le pic est observé pendant le mois d'août. Ensuite, la moyenne ainsi que la répartition des valeurs moyennes de précipitations de

tous les points sont comparées aux valeurs de MaxAWC « modèle LAI » considérées (Figure V.36).

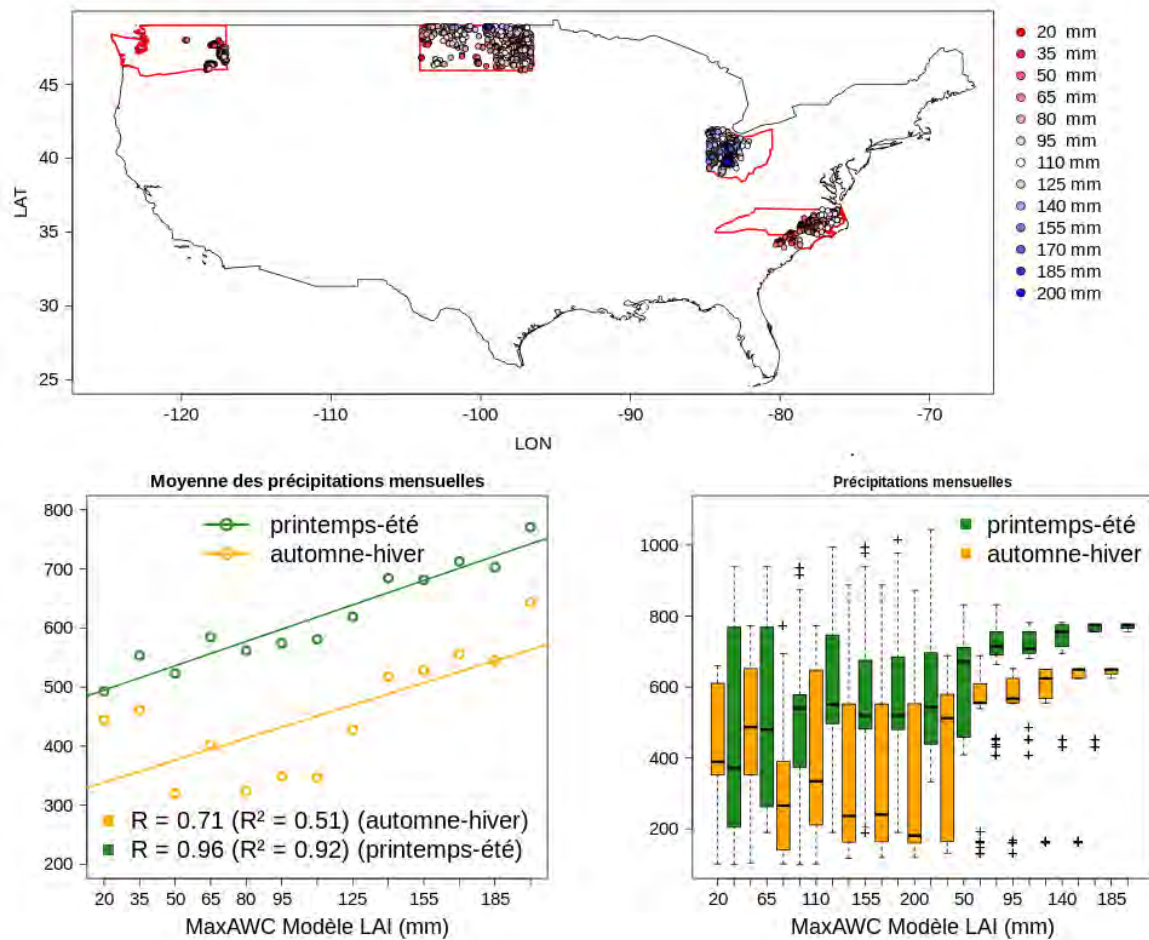


Figure V.36 Cartographie des points pour lesquels la moyenne des précipitations pour les mois de mai à juillet est calculée. Comparaison entre la moyenne de ces points et de la répartition des moyennes des précipitations avec MaxAWC "modèle LAI" pour les Etats Unis.

Une corrélation positive est observée entre la valeur moyenne des précipitations mensuelles au printemps et en été, et la valeur des réserves utiles MaxAWC « modèle LAI ». De même, une corrélation positive est observée entre la moyenne des précipitations mensuelles en automne et en hiver avec MaxAWC « modèle LAI ». De plus, les précipitations au printemps et en été sont plus élevées que celles se produisant en automne et en hiver. Ainsi, on peut faire l'hypothèse que la capacité au champ n'est pas atteinte en sortie d'hiver. La végétation va donc utiliser l'eau apportée par les précipitations survenant au printemps et en été qui vont donc constituer la réserve utile de la végétation plutôt que d'utiliser la réserve utile en eau du sol rechargée en hiver comme en France. Les régions présentant des précipitations faibles pendant la période de croissance amèneront à une valeur de réserve utile faible, accentuant la vulnérabilité de la végétation au stress hydrique. Au contraire, les régions présentant des précipitations plus importantes à partir du printemps, permettront de constituer une réserve utile importante qui permettra à la végétation de se développer et de faire face à un stress hydrique.

La Figure V.37 présente les anomalies standardisées des précipitations mensuelles issues des forçages ERA-interim ainsi que le cycle annuel moyen de LAI satellitaire sur la période 1999-2013 pour l'Etat de l'Ohio et la France. Pour l'Ohio, les mois les plus humides sont les mois d'avril à septembre qui correspondent à la période de croissance des cultures. En France, la période de l'année la plus humide s'étend de l'automne au début de l'hiver. Ce

constat suggère une influence importante du régime des précipitations sur la définition de la Réserve Utile. En France, les pluies qui surviennent à l'automne et au début de l'hiver permettent de recharger le sol en eau. Ainsi, au début de l'émergence de la culture, la plante dispose de toute l'eau nécessaire pour se développer. La définition de la réserve utile comme étant la quantité maximale contenue dans le sol pour l'alimentation hydrique de la plante serait ici adaptée. En revanche, pour le cas de l'Ohio, les pluies surviennent généralement au même moment que la période de développement de la culture. Ainsi, l'eau utilisée par la plante est issue directement des précipitations et non de la réserve en eau du sol comme c'est le cas en France, complexifiant la définition de la réserve utile.

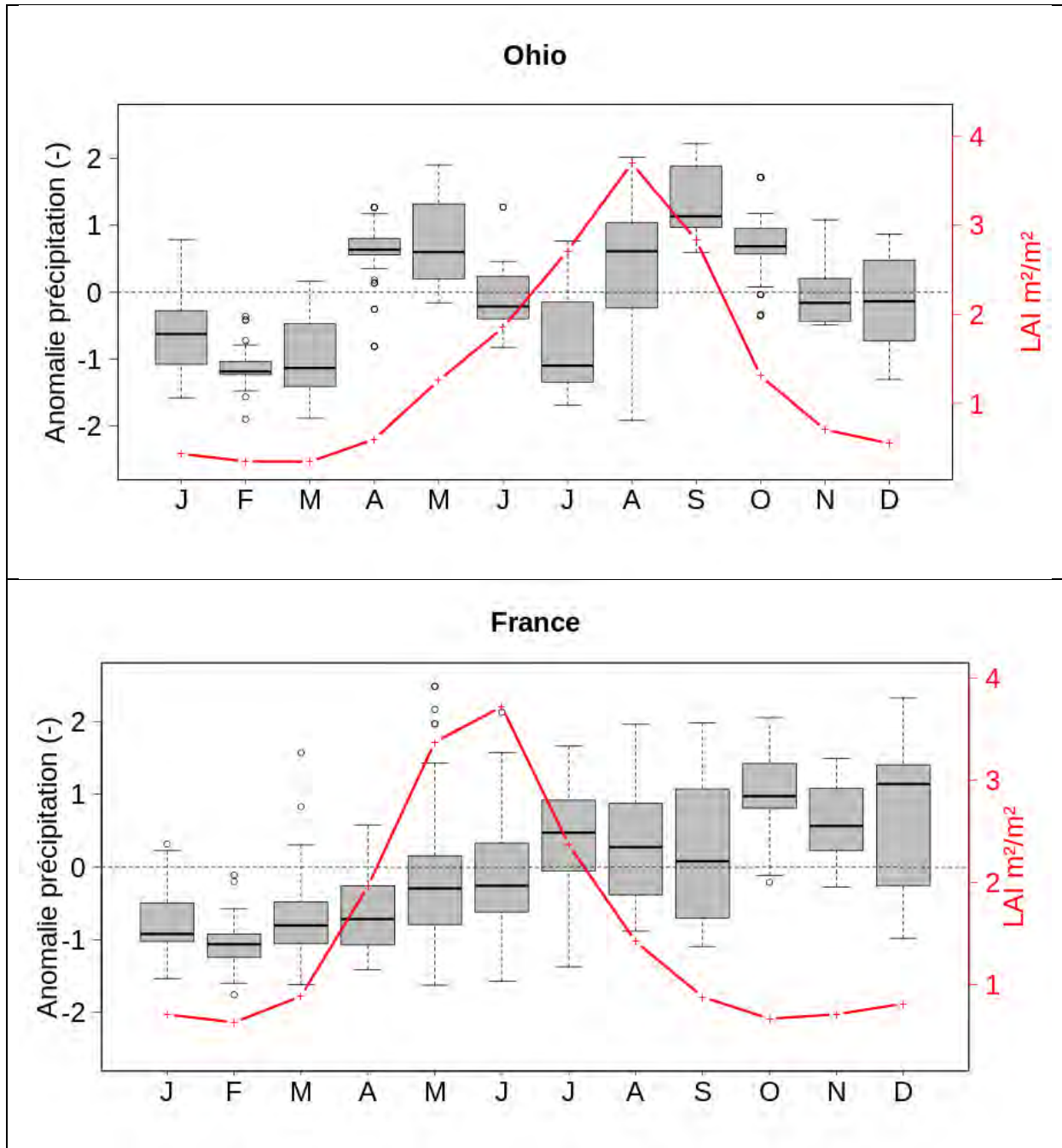


Figure V.37 Anomalie des précipitations mensuelles issues des forçages ERA-interim pour la période 1999-2013 pour l'Etat de l'Ohio et la France

5.2 Ukraine

Pour tous les points en Ukraine, proches des valeurs de réserves utiles allant de 20 mm à 90 mm avec un intervalle de 10 mm, j'ai extrait des forçages Era-interim, les séries temporelles des précipitations sur la période 1999-2013. La période considérée sur laquelle la moyenne des précipitations est calculée pour les mois de mars à mai. Ensuite, la moyenne ainsi que la répartition des valeurs moyennes de précipitations de tous les points sont comparées aux valeurs de MaxAWC « modèle LAI » considérées (Figure V.38).

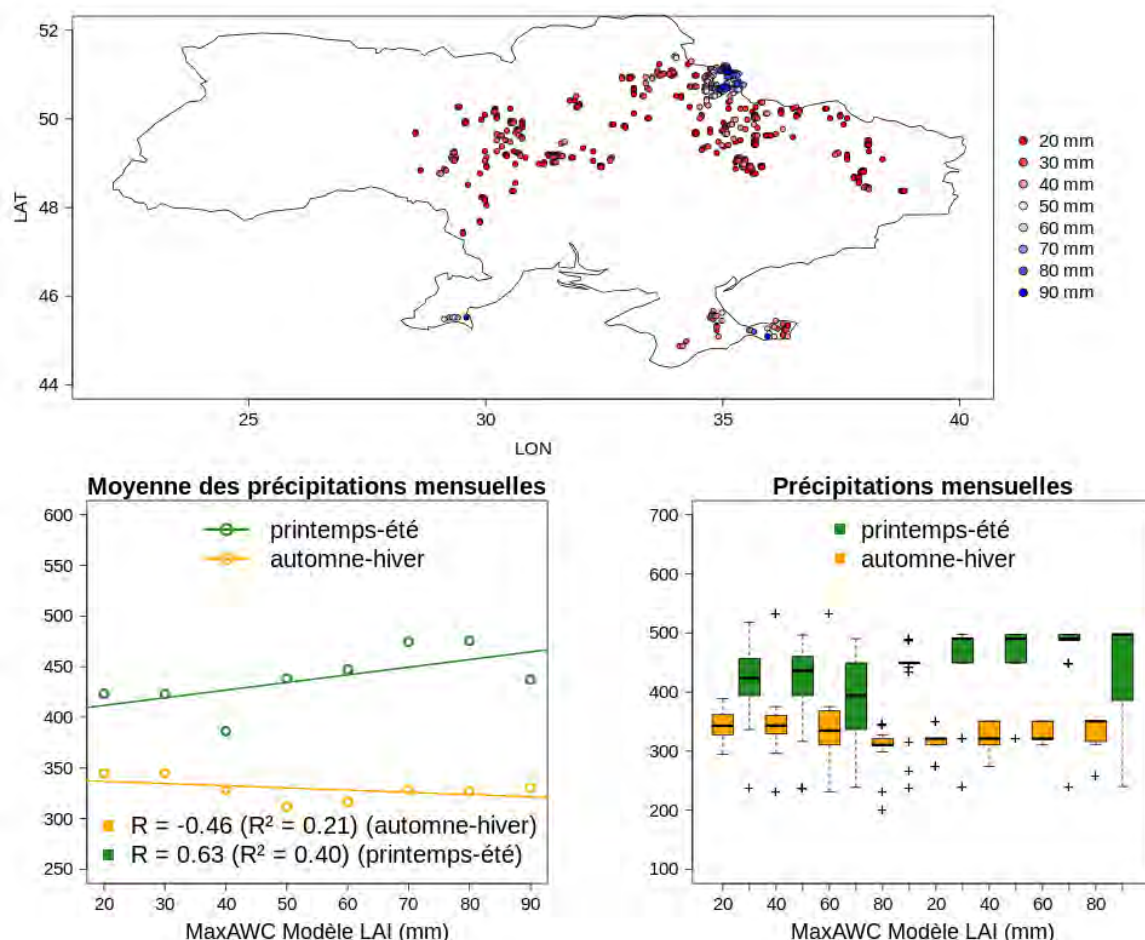


Figure V.38 Cartographie des points pour lesquels la moyenne des précipitations pour les mois de mars à mai est calculée. Comparaison entre la moyenne de ces points et de la répartition des moyennes des précipitations avec MaxAWC "modèle LAI" pour l'Ukraine.

Les précipitations en automne et en hiver sont faibles (la valeur de la médiane est de 320 mm) comparées aux précipitations au printemps en été (la valeur de la médiane est de 450 mm environ). La capacité au champ n'est donc pas toujours atteinte en sortie d'hiver. La végétation puise l'eau nécessaire à son développement en fonction des quantités de précipitations au printemps et en été (le pic de LAI étant généralement en août). Ceci expliquerait donc la corrélation positive entre la moyenne des précipitations mensuelles pendant les mois d'été avec la valeur de la réserve utile estimée (cette relation était négative pour les 45 sites en France).

5.3 SWI et période de croissance de la culture

Afin de vérifier l'hypothèse avancée précédemment, c'est-à-dire : la capacité au champ ne serait pas toujours atteinte en sortie d'hiver, j'ai analysé l'indice d'humidité du sol

(Wilhite et Glantz, 1985), le « Soil Wetness Index » (SWI), simulé par le LDAS. Celui-ci est défini selon l'équation 10, avec Wg , l'humidité du sol ; $Wwilt$, le point de flétrissement, Wfc , la capacité au champ :

$$SWI = \frac{Wg - Wwilt}{Wfc - Wwilt} \quad (10)$$

Lorsque celui-ci est égal à 1, cela signifie que la capacité au champ est atteinte. Lorsque celui-ci est égale à 0, le point de flétrissement est atteint, la plante n'est plus en capacité d'absorber l'eau du sol.

5.3.1 Etats-Unis

La Figure V.39 présente le cycle annuel moyen de LAI satellitaire désagrégé correspondant à chaque valeur de réserve utile « modèle LAI » utilisée. L'émergence de la culture se produit en moyenne au mois d'avril. La phase de croissance se poursuit généralement jusqu'au mois d'août où le pic de LAI est atteint. La phase de croissance est plutôt longue comparé à ce qui a été observé en France où le pic de LAI est généralement atteint au mois de juin.

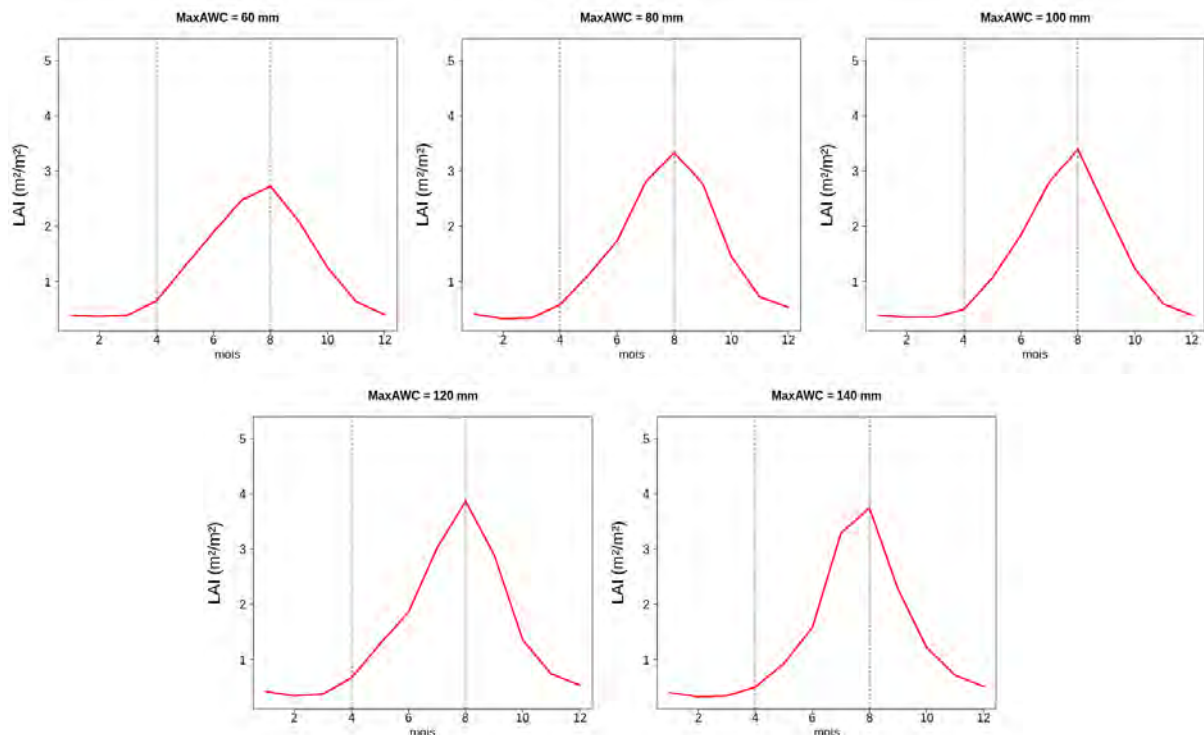


Figure V.39 Cycle annuel moyen du LAI satellitaire désagrégé pour chaque valeur de MaxAWC « modèle LAI » pour la période 1999-2013 aux Etats-Unis

La Figure V.40 montre les séries temporelles des valeurs médianes du SWI simulé par le LDAS pour les points correspondant à la plus faible (60 mm) et la plus forte valeur (140 mm) de MaxAWC « modèle LAI » pour les Etats-Unis.

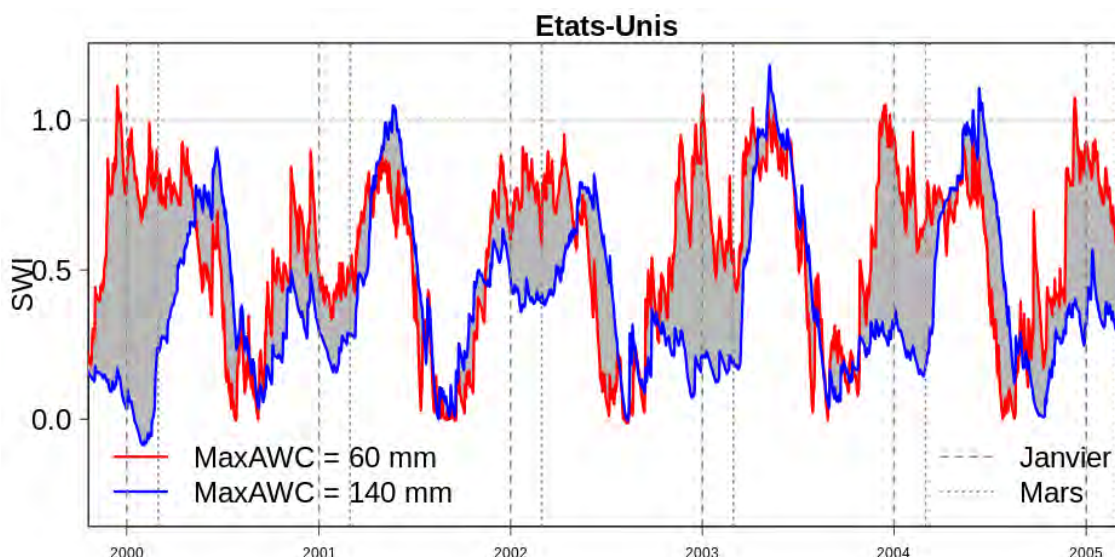


Figure V.40 Séries temporelles des valeurs médianes du SWI simulé par le LDAS pour les points correspondant à une valeur de MaxAWC « modèle LAI » de 60 mm (rouge) et 140 mm (bleu), pour la période 2000-2005 aux Etats-Unis

La moyenne des SWI au mois de mars, juste avant la période d'émergence de la culture, est de 0.50 pour les points correspondant à une valeur de MaxAWC « modèle LAI » de 60 mm, et de 0.42 pour les points correspondant à une valeur de MaxAWC « modèle LAI » de 140 mm.

La capacité au champ n'est donc pas systématiquement atteinte en sortie d'hiver. La quantité d'eau disponible pour la plante pendant la phase de croissance provient des précipitations se produisant au printemps. Ceci expliquerait que la réserve utile évolue en fonctions des précipitations.

La Figure V.41 illustre la dynamique annuelle du SWI simulé par ISBA-A-gs ainsi que le cycle annuel moyen de LAI satellitaire sur la période 1999-2013 pour l'Etat de l'Ohio et la France. Pour l'Etat de l'Ohio, le SWI évolue très peu au cours de l'année. Le lien entre SWI et cycle de la végétation n'est pas établi dans ce cas. De plus, on remarque que la capacité au champ n'est jamais atteinte, traduisant le fait que la quantité d'eau présente dans le sol ne constitue pas la réserve maximale en eau disponible pour la plante. L'eau utilisée par la plante provient donc directement des précipitations survenant lors de la période de croissance. En revanche, pour la France, on observe une grande variabilité du SWI simulé au cours de l'année. En sortie d'hiver, la capacité au champ est atteinte. La réserve en eau du sol est à son maximum, la plante dispose de toute l'eau nécessaire pour son développement. Au début du printemps, la plante commence à se développer. Ceci est accompagné d'une diminution des valeurs de SWI traduisant l'extraction de l'eau du sol par la plante. A la fin de l'été, les valeurs de SWI sont très faibles, la plante a utilisé la totalité de l'eau présente dans le sol. Les pluies survenant à l'automne permettent de recharger le sol en eau comme l'illustre l'augmentation des valeurs du SWI à l'automne.

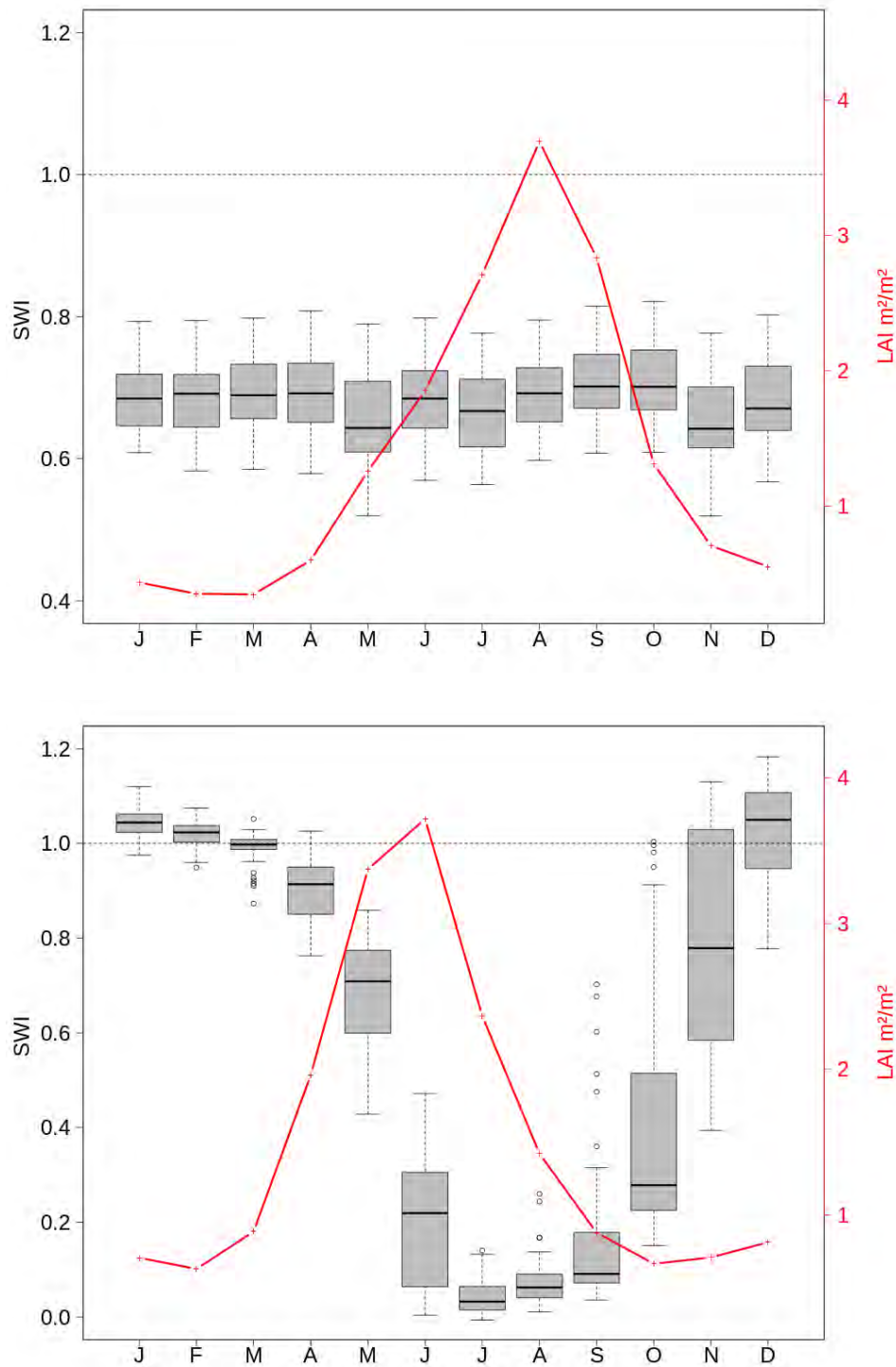


Figure V.41 SWI mensuel simulé et cycle annuel du LAI satellitaire pour l'Etat de l'Ohio (en haut) et la France (en bas)

5.3.2 Ukraine

La Figure V.42 montre le cycle annuel moyen du LAI satellitaire désagrégé pour les points correspondant à des valeurs de MaxAWC « modèle LAI » de 30 mm, 50 mm et 70 mm. Le début de la période de croissance correspond généralement au mois de mai. Celle-ci se termine lorsque le pic de LAI se produit au mois de Juillet.

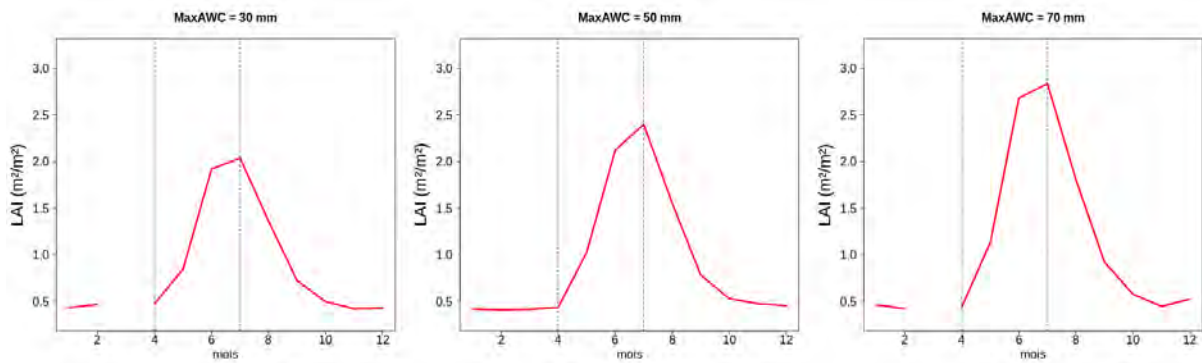


Figure V.42 Cycle annuel moyen du LAI satellitaire désagrégé pour la période 1999-2013 correspondant aux valeurs de MaxAWC « modèle LAI » en Ukraine

La Figure V.43 montre les séries temporelles des valeurs médianes du SWI simulé par le LDAS pour les points correspondant à la plus faible (30 mm) et la plus forte valeur (70 mm) de MaxAWC « modèle LAI » pour l'Ukraine.

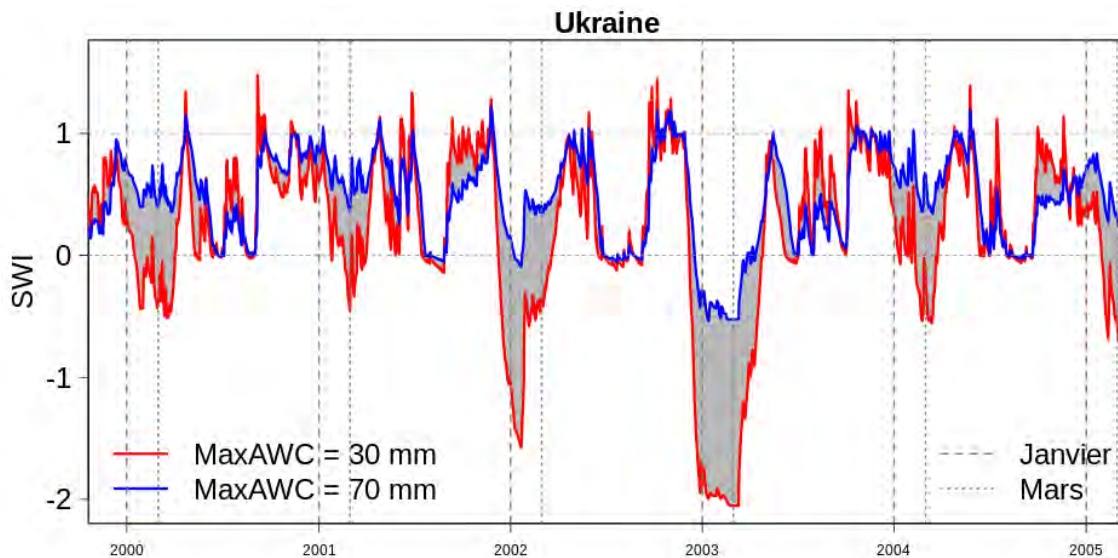


Figure V.43 Séries temporelles des valeurs médianes du SWI simulé par le LDAS pour les points correspondant à une valeur de MaxAWC « modèle LAI » de 30 mm (rouge) et 70 mm (bleu), pour la période 2000-2005 en Ukraine

Les valeurs de SWI peuvent être particulièrement faibles en hiver comme pour le cas de l'année 2003 répertoriée comme une année particulièrement froide au printemps. La valeur moyenne du SWI au mois d'avril, c'est-à-dire la période juste avant le début de la période de croissance de la végétation, pour les points correspondant à la valeur la plus faible de MaxAWC « modèle LAI » prise en compte dans cette étude est de 0.42. Pour les points correspondant à la plus forte valeur de MaxAWC « modèle LAI » prise en compte (70 mm), celle-ci est de 0.71.

Les températures basses pouvant entraîner le gel du sol pendant l'hiver dans cette région comme pour le cas de l'année 2003, ou de faible quantité de précipitations liquides pendant l'hiver ne permettent pas d'atteindre la capacité au champ au début de la phase de croissance. Ainsi, l'eau constituant la réserve utile ne provient pas des recharges en eau du sol effectuées pendant l'hiver, mais des précipitations se produisant au printemps, pendant la

phase de croissance. La réserve utile évolue en fonction de la quantité de précipitations pendant cette période.

6. Bilan du Chapitre V

Dans ce Chapitre, la question de l'application d'un modèle empirique basé sur des données satellitaires de LAI, appelé « modèle LAI », pour des régions en dehors de la zone sur laquelle il a été établi (la France), est posée. Pour cela, j'ai réalisé une évaluation du « modèle LAI » pour des régions présentant une proportion importante de céréales à paille : les Etats Unis et l'Ukraine. Dans le Chapitre 4, on a montré par ailleurs que l'utilisation d'un système d'assimilation de données permettait d'améliorer considérablement la représentation de la variabilité interannuelle de la végétation notamment en reproduisant l'impact négatif des années très humides sur la biomasse.

La démarche développée pour cette évaluation consiste dans un premier temps à estimer pour chaque point, précédemment identifié comme culture (voir Chapitre 3), une valeur de réserve utile grâce au « modèle LAI ». Ensuite, des groupes de 10 points présentant des valeurs proches d'une gamme de MaxAWC « modèle LAI » définie : 60 mm, 80 mm, 100 mm, 120 mm et 140 mm pour les Etats-Unis et 30 mm, 50 mm et 70 mm pour l'Ukraine, sont sélectionnés. Pour chacun des points, deux simulations ont été réalisées : l'une avec le LDAS en utilisant MaxAWC « modèle LAI » et l'autre avec le LDAS en utilisant MaxAWC standard. L'impact de l'utilisation directe de MaxAWC « modèle LAI » est donc évalué en comparant les performances du LDAS avec ces valeurs de réserves utiles et les performances du LDAS avec MaxAWC standard (égale à 132 mm). Ces performances sont jugées sur trois points : la comparaison de la médiane des incréments d'analyse pendant la phase de sénescence ; la comparaison de la biomasse maximale simulée par le LDAS avec les rendements disponibles et l'impact sur une variable indépendante : la GPP.

L'intégration des valeurs de MaxAWC « modèle LAI » permet de diminuer considérablement les incréments d'analyse aussi bien pour les Etats Unis que pour l'Ukraine et plus particulièrement pour des réserves utile inférieures à 100 mm. De plus, cet impact positif est également visible sur la représentation de la GPP où une diminution du RMSE, calculé entre la GPP simulée et la GPP observée, est quasi systématiquement observée après intégration de MaxAWC « modèle LAI ».

Ainsi, prendre en compte la carte de la réserve utile issue du « modèle LAI », améliore les performances du LDAS par rapport au LDAS standard.

Cependant, la représentation de la biomasse, elle, ne semble pas être améliorée. En effet, pour chaque pays, les meilleurs résultats sont obtenus avec le LDAS standard (Pour les Etats-Unis, l'Etat de Washington présente 90 % de points significativement corrélés et pour l'Ukraine, c'est plus de 65 % des sites qui présentent des corrélations significatives). Pour expliquer ce résultat, on peut noter les faibles valeurs de réserves utiles estimées (fortement sous-estimées pour les Etats Unis par rapport à la carte USDA malgré une grande variabilité spatiale, et particulièrement faible pour l'Ukraine). Ces faibles valeurs de réserve utile (entre 20 mm et 50 mm), en particulier pour l'Ukraine, ne permettent pas de simuler des valeurs de biomasses cohérentes par le LDAS en comparaison avec les rendements. Il y a donc une incohérence avec les résultats obtenus pour la France exposés dans le Chapitre 4. Cela suggère que les différences de management agricole entre agriculture extensive et intensive ont un impact dans l'utilisation des ressources en eau qui n'est pas complètement représenté

par le modèle ISBA. Ceci montre aussi les limites de la méthode empirique d'estimation de MaxAWC à partir du LAI_{max}.

Dans le Chapitre 4, une forte anti-corrélation entre les valeurs de réserves utiles optimisées et la moyenne des précipitations printanières a été montrée sur la France. Dans le cas des Etats-Unis et de l'Ukraine, une corrélation positive entre les précipitations printanières et les valeurs de réserve utiles estimées est observée. Une analyse des moyennes de précipitations mensuelles effectuées pour les quatre saisons a montré que la capacité au champ pourrait ne pas être atteinte en sortie d'hiver chaque année. Ainsi, les précipitations printanières conditionnent la valeur de la réserve utile « efficace » pour la végétation. D'autre part, on peut supposer qu'une autre relation existe entre LAI satellitaire et réserve utile (Gao et al. 2014) mais que celle-ci sera composée de coefficients différents que celle développée sur la France. La méthode développée dans le Chapitre 4 pourrait donc être appliquée sur les Etats-Unis et l'Ukraine de manière à établir un autre modèle empirique.

Par ailleurs, la méthode d'optimisation de la réserve utile, développée dans le Chapitre 4, a été appliquée pour un site hyper-instrumenté dans le sud de la France à Avignon (Garrigues et al., 2015), dont les résultats sont présentés plus en détails dans l'Annexe B. Ainsi, j'ai pu évaluer cette méthode à l'échelle locale. L'étude est fondée sur l'optimisation de la réserve utile sur six années de cultures de blé. Pour chaque année, on dispose de forçages atmosphériques SAFRAN haute résolution, de mesures de LAI et de biomasse. Pour ce cas, la méthode de modélisation inverse semble donner de meilleurs résultats avec des valeurs de réserve utile plus réaliste que celle obtenue avec le LDAS. A cette échelle, de nombreux processus biophysiques n'étant pas reproduit par le modèle, peuvent impacter la végétation. Sur ce site, la capacité au champ n'est pas toujours atteinte non plus en fin d'hiver. Cependant, il faut noter le très faible nombre d'années prises en compte (seulement six) contraint par la disponibilité des observations, alors que le développement initial de la méthode d'optimisation a été réalisé sur quinze ans.

CHAPITRE VI. Conclusion et perspectives

La demande d'évaluation et de prédiction des impacts du changement climatique sur la production agricole et les ressources en eau à différentes échelles spatiales est devenue croissante. L'amélioration de la représentation de la végétation et plus particulièrement des sécheresses agricoles par les modèles des surfaces continentales représente un enjeu majeur pour y répondre. La performance de ces modèles repose sur leur paramétrisation et sur la prise en compte de processus biophysiques régissant le cycle de la végétation. Des incertitudes subsistent sur la paramétrisation des processus hydriques dans le sol (texture, profondeur racinaire, caractéristiques hydrauliques...) qui conditionne la quantité d'eau que le sol peut retenir et affecte la représentation d'un paramètre clef de la végétation : la réserve utile. Il n'existe pas de définition universelle de ce paramètre qui est généralement défini comme étant la quantité d'eau maximale contenue dans le sol et disponible pour la végétation. La réserve utile conditionne le comportement de la végétation lors d'événements climatiques extrêmes comme les sécheresses. Une estimation précise de ce paramètre permettrait d'améliorer le suivi des sécheresses agricoles auxquelles certaines régions du monde sont particulièrement vulnérables (Bates et al., 2008 ; Seneviratne et al., 2012).

La détermination de la valeur de ce paramètre dans les modèles de surface est difficile car il est difficilement mesurable à grande échelle et on ne dispose pas, ou très peu, d'observation directe. Cependant, cette difficulté peut être contournée par l'utilisation de données satellitaires de l'indice de surface foliaire, le Leaf Area Index (LAI), maintenant disponibles depuis une trentaine d'années. La réserve utile est estimée de façon indirecte par modélisation inverse.

L'objectif de cette thèse est d'améliorer la représentation de la réserve utile grâce à l'utilisation d'un modèle de surface continentale, ISBA-A-gs, et d'un système d'assimilation de données, le Land Data Assimilation System (LDAS), pour des zones homogènes de cultures de céréales à paille pluviales.

La première étape de ce travail a été de délimiter, à l'échelle du monde, les zones garantissant une certaine homogénéité de cultures de céréales à paille pluviales et de prairies. Pour ce faire, deux cartes d'occupation des sols établies à partir de données de télédétection, ESA-CCI LC et ECOCLIMAP, ont été comparées. Ces cartes ont une résolution différente : ECOCLIMAP présente une résolution de 1 km × 1 km et ESA-CCI présente une résolution de 300 m × 300 m, ainsi qu'une classification différente.

Les différences notables observées entre les deux cartes ont montré la difficulté que représente l'estimation du type d'occupation du sol. En effet, 50% des points de grille de la carte ECOCLIMAP du couvert « cultures en C3 » sont considérés comme des points de grille du couvert « cultures pluviales » dans la carte ESA-CCI LC. La différence est encore plus importante pour les couverts de prairies. Seulement 14 % des points de grille de la carte ECOCLIMAP du couvert « prairies en C3 » sont considérés comme tels par ESA-CCI LC. Ces différences sont inhérentes aux algorithmes utilisés, attribuant une classe à chaque point de grille en fonction d'une nomenclature définie. Une mauvaise estimation du type d'occupation du sol peut avoir un impact considérable dans le calcul des transferts à l'interface sol-végétation-atmosphère dans les modèles de surfaces continentales. Cependant, on peut espérer, de cette manière, réduire les incertitudes résidant dans l'estimation de

l'occupation du sol dans les modèles. Par exemple, la base de données de la FAO a permis d'écarter les zones agricoles susceptibles d'être irriguées. Cette étape est nécessaire afin de ne prendre en compte les zones de cultures pluviales dont la variabilité interannuelle des rendements est principalement régie par la variabilité climatique. Dans le cas contraire, l'estimation indirecte de la réserve utile par modélisation inverse ne serait pas possible.

Une cartographie et une évaluation du paramètre LAI_{min} , qui est la valeur minimale de l'indice foliaire, a été réalisée grâce aux séries temporelles de LAI GEOV1 à une résolution de $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$. Ce paramètre intervient dans l'initiation de la photosynthèse en sortie d'hiver, lorsque les conditions atmosphériques sont favorables. Il a une influence sur la simulation du développement de la plante pendant la phase de croissance, en particulier sur la date d'émergence et la durée de cette phase. Une mauvaise estimation de ce paramètre peut affecter le réalisme du démarrage de la végétation dans les simulations d'ISBA-A-gs. L'influence du type de climat sur ce paramètre est particulièrement forte pour les couverts de prairies permanentes. En effet, l'Europe de l'ouest bénéficiant d'un climat océanique, les valeurs de LAI_{min} sont particulièrement élevées pour les prairies permanentes dépassant largement la valeur par défaut du modèle ISBA (valeurs supérieures à $1 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$) dans cette zone. A contrario, à l'Est où le climat de type continental est caractérisé par une forte amplitude annuelle des températures et des hivers froids et longs, les valeurs de LAI_{min} sont plus faibles aussi bien pour les prairies permanentes que pour les cultures de céréales à paille (inférieurs à $0.3 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$). La grande variabilité spatiale des valeurs de LAI_{min} des prairies permanentes n'a pas permis de retenir ce type de végétation afin d'en estimer la réserve utile. En revanche, les valeurs de LAI_{min} des cultures de céréales à paille sont proches de la valeur par défaut du modèle ISBA. Les observations utilisées doivent être les plus représentatives possibles du type de végétation étudié.

La perspective de la nouvelle version d'ECOCLIMAP (ECOCLIMAP-SG) qui est en cours de développement permettra l'utilisation directe de cartes de paramètres dans le modèle ISBA, dont le paramètre LAI_{min} . Ainsi, grâce à ces cartes de paramètres qui éviteront un calage de ce paramètre point de grille par point de grille, la représentation du démarrage de la phase de croissance, pour tout type de cultures et de végétation, devrait être améliorée.

La deuxième partie de ce travail a consisté à évaluer le potentiel d'utilisation des données satellitaires de LAI et d'un modèle de surface (ISBA) pour la modélisation de la variabilité interannuelle de la biomasse des cultures de céréales à paille et pour le suivi des sécheresses en France. J'ai utilisé deux méthodes, une méthode de modélisation inverse simple et une méthode d'assimilation de données (LDAS), pour caler la réserve utile, paramètre clef de la végétation. La méthode LDAS, permettant d'assimiler des données d'observations du LAI afin de corriger la trajectoire du modèle quand celles-ci étaient disponibles a permis d'améliorer significativement la représentation de la variabilité interannuelle des cultures de céréales à paille grâce au calage de la réserve utile. De plus, un impact positif sur une autre variable simulée par ISBA, la « Gross Primary Production », a été démontré par la réduction systématique des différences entre le produit GPP FLUXNET-MTE et les GPP simulées. Les plus fortes erreurs sont drastiquement réduites grâce au calage de la réserve utile. Ces plus fortes erreurs correspondent à de faibles valeurs de réserves utiles. Ceci permet de confirmer la nécessité de caler la réserve utile et démontre son impact positif sur d'autres variables clefs de la végétation.

Par ailleurs, comme les résultats de la cartographie des surfaces relativement homogènes de cultures de céréales à paille le suggéraient, il est primordial d'utiliser des observations les plus représentatives possibles du type de végétation étudié. Ceci a été démontré par l'amélioration des résultats suite à l'utilisation de produits désagrégés de LAI

(Munier et al., 2017), c'est-à-dire des produits permettant une meilleure prise en compte du type de végétation étudié.

Dans ce travail, la réserve utile est fonction de la profondeur racinaire. Elle dépend de la capacité de la plante à développer un système racinaire qui lui, dépend non seulement du type de sol, mais aussi du climat (Gao et al., 2014, Bastos et al., 2014). Sur la France, on a pu observer une corrélation négative entre la moyenne des précipitations printanières et la valeur de la réserve utile estimée. Ceci traduit la capacité de la plante à s'adapter à des conditions en eau limitée, correspondant à des régions où les précipitations au printemps sont faibles, en développant un système racinaire profond afin d'aller puiser l'eau présente en profondeur. Inversement, dans des conditions en eau non limitée (fortes valeurs de précipitations au printemps), la plante n'a pas besoin de développer un système racinaire plus profond, l'eau étant présente dans les horizons proches de la surface du sol. Ceci induit que la capacité au champ est atteinte en sortie d'hiver. Le calage de la réserve utile dans le modèle ISBA a ainsi permis de rendre compte de la capacité des plantes à s'adapter selon les conditions en eau limitée ou non limitée en France.

Une forte corrélation entre les valeurs de réserves utiles estimées par la méthode LDAS et les valeurs maximales de LAI satellitaires désagrégés a été montrée. Un modèle empirique, appelé « modèle LAI », a permis de relier directement des valeurs maximales observées de LAI à la réserve utile. De cette façon, une carte de la réserve utile a pu être établie pour la France pour les cultures de céréales à paille, basée sur les données satellitaires désagrégées de LAI. Celle-ci a été confrontée à une autre carte de réserves utiles estimées à partir de fonctions de pédotransfert pour la France par l'INRA (Al Majou et al., 2008). Environ 35 % des points de grille composant la carte de réserve utile « modèle LAI » présente une erreur relative absolue inférieure à 25 % de la valeur de la réserve utile issue d'Al Majou et al. (2008). D'autre part, des structures particulières de la variabilité spatiale des réserves utiles sont communes aux deux cartes. Ceci est particulièrement vrai pour le département de l'Eure et Loir. En revanche, plusieurs départements, comme l'Indre et la Marne montrent des résultats divergents. Ces régions sont caractérisées par la présence de sols calcaires et de craies. Ce sont des sols particuliers, peu propices à l'agriculture, qui ont été transformés et extrêmement travaillés au cours des années pour devenir les terres agricoles très productives aujourd'hui. La représentation de la réserve utile par le « modèle LAI » ne semble pas pouvoir s'appliquer sur tous les types de sol.

Dans une dernière partie, l'application conjointe du modèle LAI et la méthode LDAS est évaluée pour d'autres régions du monde présentant une proportion importante de cultures de céréales à paille telles que les Etats Unis et l'Ukraine. Ces régions pratiquent une agriculture extensive ou partiellement intensive. L'impact de l'utilisation directe des réserves utiles « modèle LAI » a donc été évalué en comparant les performances du LDAS avec ces valeurs de réserves utiles et les performances du LDAS avec la réserve utile standard. Les performances du LDAS sont considérablement améliorées aussi bien pour les Etats Unis que pour l'Ukraine. Ceci est particulièrement vrai pour des réserves utiles inférieures à 100 mm et démontré par la réduction quasi systématique des valeurs d'incrément d'analyse. L'amélioration est aussi visible pour la variable GPP simulée dont la valeur du RMSE avec les produits FLUXNET-MTE est réduite. En revanche, pour des valeurs de réserves utiles supérieures à 100 mm, c'est-à-dire se rapprochant de la valeur définie par défaut dans le LDAS (132 mm), il n'y a pas d'amélioration significative. L'impact de fortes valeurs de réserve utile (supérieure à 140 mm), n'a pu être évalué dû à la faible occurrence de celles-ci. L'analyse de la correspondance des rendements agricoles de ces régions avec les valeurs maximales de LAI satellitaires a montré une plus faible cohérence que celle observées sur la

France. Le type d'agriculture exercé a donc un impact sur l'utilisation de la méthode. En effet, la représentation de la biomasse ne semble pas être améliorée, les meilleurs résultats étant obtenus avec le LDAS standard. Dans cette configuration, l'Etat de Washington présente 90 % de points significativement corrélés avec les rendements mais ce résultat n'est pas retrouvé dans d'autres états céréaliers des USA. Plus de 65 % des points pris en compte en Ukraine présentent des corrélations significatives. Les faibles valeurs de réserves utiles estimées (particulièrement pour l'Ukraine) ne permettent pas de simuler des valeurs de biomasses cohérentes par le LDAS en comparaison avec les rendements. Cela suggère une valeur inférieure limite à partir de laquelle le LDAS ne peut simuler un cycle végétatif réaliste. Ceci montre les limites de cette méthode qui correspondent aux bornes de la gamme des réserves utiles estimées imposées par le modèle LAI et donc par les valeurs de LAI_{max} observées.

D'autre part, des facteurs climatiques peuvent influencer la notion de réserve utile. En Ukraine et aux Etats-Unis, les précipitations dans la période automne-hiver sont inférieures aux précipitations de la période printemps-été. De plus une corrélation positive est observée entre la réserve utile et les précipitations survenant pendant la phase de croissance. En effet, les régions présentant de fortes valeurs de précipitation au printemps-été, sont associées à des valeurs élevées de réserves utiles. Inversement, les régions présentant de faibles précipitations pendant la phase de croissance présentent des valeurs de réserves utiles faibles. Cette relation peut s'expliquer par le fait que la capacité au champ n'est pas forcément atteinte en sortie d'hiver, quelle que soit la valeur de réserve utile, comme le montrent les simulations. Ainsi, la plante ne développerait son système racinaire qu'en fonction de la quantité des précipitations survenant au printemps. Un résultat similaire est obtenu sur le site d'Avignon, où la méthode LDAS échoue. Il faut noter toutefois que le site d'Avignon n'est pas situé sur une zone céréalière. En général, les régions cérésières françaises semblent offrir un cadre favorable à l'utilisation de la méthode LDAS.

Ce travail a montré que l'accent doit être mis sur l'utilisation d'un système d'assimilation de données, le LDAS, pour estimer des paramètres clefs de la végétation. Par ailleurs, de nombreux points pourraient faire l'objet de nouvelles recherches :

- A quelle résolution spatiale estimer la réserve utile ?

La réserve utile est un paramètre clef de la végétation dont la variabilité spatiale est fonction de la variabilité spatiale des caractéristiques physiques du sol mais aussi du climat. Elle peut varier au sein d'une même parcelle agricole.

Dans ce travail, nous avons estimé la réserve utile pour des cultures de céréales à paille à une faible résolution ($35 \text{ km} \times 35 \text{ km}$). Celle-ci a été imposée par la validation de la méthode à partir de statistiques agricoles disponibles à l'échelle du département. Malgré cette faible résolution, l'impact positif de ce calage de la réserve utile a été démontré. La correspondance de la photosynthèse simulée avec les produits de GPP FLUXNET-MTE, à une résolution spatiale de $0.5^\circ \times 0.5^\circ$, est elle aussi améliorée.

D'autre part, cette méthode a été appliquée à un site hyper-instrumenté pour lequel de nombreuses observations sont disponibles. Le LDAS n'a pas permis d'obtenir de résultats concluants. Ceci peut être expliqué par le faible nombre d'années disponibles qui ne permet pas un calage robuste de la réserve utile et par le fait que la capacité au champ n'est pas toujours atteinte en sortie d'hiver. D'autre part, à cette échelle, de nombreux processus biophysiques peuvent affecter la réserve utile. La répartition des racines jeunes/matures permettant l'absorption/le transport de l'eau du sol vers la plante, les hétérogénéités du sol par exemple, peuvent avoir un impact sur l'estimation de la réserve utile. Ainsi, à l'échelle de la

parcelle, il est indispensable d'évaluer l'impact de la représentation multi-couches du modèle ISBA et de l'estimation de la réserve utile sur d'autres flux tels que la GPP, mais aussi l'évapotranspiration qui est une variable clef de la végétation. Ceci nécessite aussi d'avoir des données observées sur une période suffisamment longue.

- Quelles données satellitaires utiliser ?

Ce travail a montré que les données satellitaires devaient être autant que possible représentatives du type de végétation étudié. Les produits LAI désagrégés grâce à l'application d'un filtre de Kalman, permettent de distribuer la valeur de LAI pour chacun des types de végétation coexistant dans un même point de grille. Ceci a permis d'améliorer significativement les résultats. Ce type de données devrait donc être préférentiellement utilisé dans le cadre d'estimations de paramètre clef de la végétation.

D'autre part, la mission « Sentinel 2 » de l'Agence Spatiale Européenne, dont les produits présentent une résolution de 20 m avec une répétitivité de 5 jours, pourraient être utilisés. Le satellite Venus, lancé en 2017, a été conçu pour suivre l'évolution saisonnière de la végétation. Le capteur de ce satellite permet d'acquérir des images à 5m de résolution sur 110 sites, avec une répétitivité de deux jours. Ceci permettra de suivre avec précision les différentes phases du cycle de la végétation, les changements rapides d'état de la végétation lors de la phase de croissance et de sénescence. Ces observations permettront de mieux comprendre les interactions entre le sol et la végétation et ainsi, d'obtenir une estimation précise de la réserve utile.

La forte relation résultant de l'application de la méthode mise en œuvre dans ce travail de thèse, entre les valeurs maximales de LAI satellitaire, LAI_{max} , et la réserve utile optimisées suggère que les valeurs minimales et particulièrement les valeurs maximales de réserves utiles estimées sont contraintes par les valeurs minimales et maximales de LAI_{max} . Il serait cependant intéressant d'évaluer l'impact de l'assimilation d'autres produits satellitaires tels que le FAPAR (Fraction of Absorbed Photosynthetic Active Radiation) sur l'estimation de la réserve utile, dont la bonne corrélation avec les rendements agricoles a été démontrée dans Lopez-Lozano et al. (2015).

- La méthode peut-elle être appliquée à d'autres types de végétation ?

Cette méthode a été appliquée uniquement à des cultures de céréales à paille. En effet, il n'était pas envisageable d'estimer la réserve utile pour les prairies dans mon cas d'étude (forte variabilité des valeurs de LAI_{min} , pas de gestion des coupes des prairies dans SURFEX). Dans la perspective d'une prise en compte du nombre de coupe des prairies dans SURFEX et du développement de la nouvelle version d'ECOCLIMAP-SG, l'estimation de la réserve utile pour les prairies pourrait être envisagée.

- La réserve utile dérivée du LAI est-elle compatible avec la modélisation hydrologique ?

Il serait un grand intérêt d'évaluer l'impact du calage de la réserve utile sur l'hydrologie. En effet, la quantité d'eau contenue dans le sol a un impact sur le débit des rivières. Le modèle ISBA-TOPMODEL par exemple permet de coupler un modèle de surface avec un modèle hydrologique à des échelles fines. Le modèle CTRIP est un autre modèle utilisé au CNRM, qui permet de simuler les eaux souterraines et les débits à l'échelle mondiale. La version du modèle ISBA utilisée dans mon travail comporte une représentation simplifiée de l'hydrologie du sol, compatible avec le concept de réserve utile. L'utilisation

d'une option plus complexe, avec une hydrologie du sol multi-couches et une représentation des remontées capillaires provenant des nappes souterraines, est nécessaire à terme. Cela pose la question de la cohérence entre le degré de complexité de la représentation du fonctionnement de la végétation avec celui de l'hydrologie de surface.

Bibliographie

Agreste Bilans (2001): Agreste, Publications, Chiffres et Données No. 11, Bilan conjoncturel de l'année agricole 2001, 16 pp.,

www.agreste.agriculture.gouv.fr/IMG/pdf/BILAN2001NOTE.pdf (last access February 2017).

Agreste Bilans (2003): Agreste, Publications, Chiffres et Données Agriculture, Bilan conjoncturel Novembre 2003, 2pp.,

<http://agreste.agriculture.gouv.fr/IMG/pdf/conjenc10311.pdf> (last access February 2017).

Agreste Bilans (2007): Agreste, Publications, Chiffres et Données No. 10-11, Bilan conjoncturel 2007, 40 pp., www.agreste.agriculture.gouv.fr/IMG/pdf/bilan2007note.pdf (last access February 2017).

Agreste Bilans (2011): Agreste, Publications, Chiffres et Données Agriculture No. 7, Bilan conjoncturel 2011, 45 pp., www.agreste.agriculture.gouv.fr/IMG/pdf_bilan2011note.pdf (last access February 2017).

Al Majou H., Bruand A., Duval O., Cousin I., 2007. Comparaison de fonctions de pédotransfert nationales et européennes pour prédire les propriétés de rétention en eau des sols. *Étude et Gestion des Sols*, 14, 2 : 103-116.

Al Majou, H., Bruand, A., Duval, O., Le Bas, C., and Vauer A. (2008) : Prediction of soil water retention properties after stratification by combining texture, bulk density and the type of horizon, *Soil Use Manage.*, 24, 383–391, doi: 10.1111/j.1475-2743.2008.00180.x.

Albergel, C., Calvet, J.-C., Mahlouf, J.-F., Rüdiger, C., Barbu, A.L., Lafont, S., Roujeau, J.-L., Walker, J. P., Crapeau, M., 15 and Wigneron, J.-P.(2010) : Monitoring of water and carbon fluxes using a land data assimilation system: a case study for southwestern France, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 14, 1109–1124.

Anderson, J.R., Hardy, E.E., Roach, J.T. and Witmer, R.E. (1976) : A land use and land cover classification system for use with remote sensor data, *Geological Survey professional paper*, 964.

Asseng, S., Ewert, F., Rosenzweig, C., Jones, J.W., Hatfield, J.L., Ruane, A., Boote, K.J., Thorburn, P., Rötter, R.P., Cammarano, D., Brisson, N., Basso, B., Martre, P., Aggarwal, P.K., Angulo, C., Bertuzzi, P., Biernath, C., Challinor, A., Doltra, J., Gayler, S., Goldberg, R., Grant, R., Heng, L., Hooker, J., Hunt, T., Ingwersen, J., Izaurralde, C., Kersebaum, K.C., Müller, C., Naresh Kumar, S., Nendel, C., O'Leary, G., Olesen, J.E., Osborne, T.M., Palosuo, T., Priesack, E., Ripoche, D., Semenov, M., Shcherbak, I., Steduto, P., Stöckle, C., Stratonovitch, P., Streck, T., and Wolf, J. (2013) : Quantifying uncertainties in simulating wheat yields under climate change, *Nat. Clim. Change*, 3, 827-832.

Atzberger, C. (2013) : Advances in Remote Sensing of Agriculture: Context Description, Existing Operational Monitoring Systems and Major Information Needs, *Remote Sens.*, 5(2), 949-981; doi:10.3390/rs5020949.

Baldocchi, D. (2008) : Breathing of the terrestrial biosphere: lessons learned from a global network of carbon dioxide flux measurement systems, *Australian Journal of Botany*, 56, 1–26.

Baldocchi, D., Falge, E., Gu, L., Olson, R., Hollinger, D., Running, S., Anthoni, P., Bernhofer, C., Davis, K., Evans, R., Fuentes, J., Goldstein, A., Katul, G., Law, B., Lee, X., Malhi, Y., Meyers, T., Munger, W., Oechel, W., Paw, K. T., Pilegaard, K., Schmid, H. P., Valentini, R., Verma, S., Vesala, T., Wilson, K., Wofsy, S. (2001) : FLUXNET: A New Tool to Study the Temporal and Spatial Variability of Ecosystem–Scale Carbon Dioxide, Water Vapor, and Energy Flux Densities, *American Meteorological Society*, 82(11), 2415-2434.

Ball, T.J., Woodrow, I.E., Berry, J.A. (1987) : A Model Predicting Stomatal Conductance and its Contribution to the Control of Photosynthesis under Different Environmental Conditions, *Progress in Photosynthesis Research* pp 221-224.

Balsamo, G., Bouyssel, F., and Noilhan, J. (2004): A simplified bi dimensional variational analysis of soil moisture for screen-level observations in a mesoscale numerical weather prediction model, *Q. J. Roy. Meteorol. Soc.*, 130, 895–915.

Barbu, A. L., Calvet, J.-C., Mahfouf, J.-F., Albergel, C., and Lafont, S.(2011) : Assimilation of Soil Wetness Index and Leaf Area Index into the ISBA-A-gs land surface model: grassland case study, *Biogeosciences*, 8, 1971–1986, doi:10.5194/bg-8-25 1971-2011.

Barbu, A. L., Calvet, J.-C., Mahloul, J.-F., and Lafont, S.(2014) : Integrating ASCAT surface soil moisture and GEOV1 leaf area index into the SURFEX modelling platform: a land data assimilation application over France, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 18, 173–192.

Baret, F., Hagolle, O., Geiger, B., Bicheron, P., Miras, B., Huc, M., Berthelot, B., Nino, F., Weiss, M., Samain, O., Roujean, J.-L. and Leroy, M. (2007): LAI, fAPAR and fCover CYCLOPES global products derived from VEGETATION, Part 1: Principles of the algorithm, *Remote Sens. Environ.*, 110, 275–286.

Baret, F., Weiss, M., Lacaze, R., Camacho, F., Makhmara, H., Pacholczyk, P., and Smets, B. (2013) : GEOV1: LAI and FAPAR essential climate variables and FCOVER global time series capitalizing over existing products, Part 1: Principles of development and production, *Remote Sens. Environ.*, 137, 299–309.

Bastos, A., Gouveia, C. M., Trigo, R. M., and Running, W.(2014) : Analysing the spatio-temporal impacts of the 2003 and 2010 30 extreme heatwaves on plant productivity in Europe, *Biogeosciences*, 11, 3421–3435.

Becker-Reshef, I., Vermote, E., Lindeman, M., and Justice, C. (2010): A generalized regression-based model for forecasting winter wheat yields in Kansas and Ukraine using MODIS data, *Remote Sens. Environ.*, 114, 1312–1323.

- Benchmann, M., Schneider, C., Carminati, A., Vetterlein, A., Attinger, S., and Hildebrandt, A. (2014) : Effect of parameter choice in root water uptake models – the arrangement of root hydraulic properties within the root architecture affects dynamics and efficiency of root water uptake, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 18, 4189-4206.
- Betts, A.K., Ball, J.H., Beljaars, A.C.M., Miller, M.J. and Viterbo, P. (1996): The landsurface-atmosphere interaction: A review based on observational and global modelling perspectives, *J. Geophys. Res.*, 101, 7209-7225.
- Bojinski, S., Verstraete, M., Peterson, T.C., Richter, C., Simmons, A., Zemp, M., (2014) : The Concept Of Essential Climate Variables In Support Of Climate Research, Applications, And Policy.
- Boken, V.K. (2005): Agricultural drought and its monitoring and prediction: Some Concepts, in *Monitoring and Predicting Agricultural Drought: A Global Study*, edited by Boken, V.K., Cracknell, A.P. and Heathcote, R.L., Oxford University Press, 3-10.
- Bonn F, Rochon G, (1992) : *Precis de teledetection. Principes et methodes*. Sainte-Foy (Quebec) : Presses de l'Universite du Quebec.
- Bontemps S., Defourny P., Radoux J., Van Bogaert E., Lamarche C., Achard F., Mayaux P., Boettcher M., Brockmann C., Kirches G., Zülkhe M., Kalogirou V., Seifert F.M, Arino O.(2012) : Consistent global land cover maps for climate modelling communities: current achievements of the ESA'Land Cover CCI.
- Boodgaard, H.L., De Wit, A.J.M., te Roller, J.A., Van Diepen, C.A. et al. (2014) : WOFOST Control Centre 2.1 and WOFOST 7.1.7 User's guide for the WOFOST Control 2.1 and WOFOST 7.1.7 crop growth simulation model. <http://www.wageningenur.nl/wofost>.
- Boone, A., Calvet, J.-C. and Noilhan, J. (1999): Inclusion of a third soil layer in a land surface scheme using the force-restore method, *J. Appl. Meteorol.*, 38, 1611-1630.
- Boone, A., Masson, V., Meyers, T. and Noilhan, J. (2000): The influence of the inclusion of soil freezing on simulation by a soil-atmosphere-transfer scheme, *J. Appl. Meteorol.*, 9, 1544–1569.
- Bouma, J. and Van Lanen, J.A.J. (1987) : Transfer functions and threshold values: From soil characteristics to land qualities. In: K.J. Beek et al. (Editors), *Quantified Land Evaluation*. International Institute Aerospace Surv. Earth Sci. ITC Publ., 6, 106-110.
- Bouyssel, F., V. Cassé, and J. Pailleux (1999), Variational surface analysis from screen-level atmospheric parameters, *Tellus, Ser. A*, 51, 453–468.
- Bruand A., Duval O., Cousin I., 2004. Estimation des propriétés de rétention en eau des sols à partir de la base de données SOLHYDRO : une première proposition combinant le type d'horizon, sa texture et sa densité apparente. *Étude et Gestion des Sols*, 11 : 323-334.

Bruand A., Pérez Fernandez P., Duval O., 2003. Use of class pedotransfer functions based on texture and bulk density of clods to generate water retention curves. *Soil Use and Management*, 19 : 232-242.

Brut, A., Rüdiger, C., Lafont, S., Roujean, J.-L., Calvet, J.-C., Jarlan, L., Gibelin, A.-L., Albergel, C., Le Moigne, P., Soussana, J.-F., Klumpp, K., Guyon, D., Wigneron, J.-P. and Ceschia, E. (2009): Modelling LAI at a regional scale with ISBA-A-gs: comparison with satellite-derived LAI over southwestern France, *Biogeosciences*, 6, 1389-1404, doi:10.5194/bg-6-1389-2009.

Cabelguenne, M. and Debaeke, P.(1998) : Experimental determination and modelling of the soil water extraction capacities of crops of maize, sunflower, soya bean, sorghum and wheat, *Plant and Soil*, 202, 175–192, doi:10.1023/A:1004376728978.

Calvet, J.-C. (2000): Investigating soil and atmospheric plant water stress using physiological and micrometeorological data, *Agr. Forest Meteorol.*, 103, 229–247.

Calvet, J.-C. and Soussana, J.-F. (2001) : Modelling CO₂ -enrichment effects using an interactive vegetation SVAT scheme, *Agr. Forest Meteorol.*, 108, 129–152.

Calvet, J.-C., Gibelin, A.-L., Roujean, J.-L., Martin, E., Le Moigne, P., Douville, H., and Noilhan, J. (2008): Past and future scenarios of the effect of carbon dioxide on plant growth and transpiration for three vegetation types of southwestern France, *Atmos. Chem. Phys.*, 8, 397–406, doi:10.5194/acp-8-397.

Calvet, J.-C., Lafont, S., Cloppet, E., Souverain, F., Badeau, V., and Le Bas, C. (2012): Use of agricultural statistics to verify the interannual variability in land surface models: a case study over France with ISBA-A-gs, *Geosci. Model Dev.*, 5, 37–54, doi:10.5194/gmd-5-37-2012.

Calvet, J.-C., Noilhan, J., Roujean, J., Bessemoulin, P., Cabelguenne, M., Olioso, A., and Wigneron, J. (1998): An interactive vegetation SVAT model tested against data from six contrasting sites, *Agr. Forest Meteorol.*, 92, 73–95.

Calvet, J.-C., Rivalland, V., Picon-Cochard, C., and Guehl, J.M. (2004): Modelling forest transpiration and CO₂ fluxes – response to soil moisture stress, *Agr. Forest Meteorol.*, 124, 143–156, doi:10.1016/j.agrformet.2004.01.007.

Camacho, F., Cernicharo, J., Lacaze, R., Baret, F., and Weiss, M. (2013): GEOV1: LAI and FAPAR essential climate variables and FCOVER global time series capitalizing over existing products. Part2: Validation and intercomparison with reference products, *Remote Sens. Environ.*, 137, 310–329.

Canal, N., Calvet, J.-C., Decharme, B., Carrer, D., Lafont, S., and Pigeon, G.(2014): Evaluation of root water uptake in the ISBA-15 A-gs land surface model using agricultural yield statistics over France, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 18, 4979–4999.

- Capa-Morocho, M., Rodriguez-Fonseca, B., and Ruiz-Ramoz, M.(2014): Crop yields as a bioclimatic index of El Nino impact in Europe: Crop forecast implications, *Agr. Forest Meteorol.*, 198-199, 42-52, doi:10.1016/j.agrformet.2014.07.012.
- Carlson, T.N., Ripley, D.A. (1997): On the relation between NDVI, Fractional Vegetation Cover, and Leaf Area Index, *Remote Sensing environment*, 62 (3), pp. 241-252.
- Carrer, D., Lafont, S., Roujean, J. L., Calvet, J. C., Meurey, C., Le Moigne, P., and Trigo, I. F. (2012): Incoming solar and infrared radiation derived from METEOSAT: Impact on the modelled land water and energy budget over France, *J. Hydrometeorol.*, 13, 504–520, doi:10.1175/JHM-D-11-059.1.
- Carrer, D., Meurey, C., Ceamanos, X., Roujean, J.-L., Calvet, J.-C., and Liu, S. (2014) : Dynamic mapping of snow-free vegetation and bare soil albedos at global 1 km scale from 10-year analysis of MODIS satellite products, *Remote Sens. Environ.*, 140, 25 420–432, doi:10.1016/j.rse.2013.08.041.
- Carrer, D., Roujean, J.-L., Lafont, S., Calvet, J.-C., Boone, A., Decharme, B., Delire, C., and Gastellu-Etchegorry, J.-P. (2013) : A canopy radiative transfer scheme with explicit FAPAR for the interactive vegetation model ISBA-A-gs: impact on carbon fluxes, *J. Geophys. Res.-Biogeo.*, 118, 1–16, doi:10.1002/jgrg.20070.
- Cayrol, P., Kergoat, L., Moulin, S., Dedieu, G. and Chehbouni, A. (2000) : Calibrating a coupled SVAT-Vegetation growth model with remotely sensed reflectance and surface temperature – A case study for the HAPEX-Sahel Grassland sites. *Journal of applied meteorology*, 39, 2452-2472.
- Challinor, A.J., Wheeler, T.R., Craufurd, P.Q., Slingo, J.M., and Grimes D.I.F. (2004) : Design and optimization of a large-area process-based model for annual crops. *Agric. For. Meteorol.*, 124 ,99-120.
- Charney JG, Quirk WK, Chow SH, Kornfield J (1977) A comparative study of the effects of albedo change on drought in semi-arid regions. *Journal of the Atmospheric Sciences*,34, 1366–1387.
- Chaves, M. M., Maroco, J. P. and Pereira, J. S. (2003): Understanding plant response to drought: from genes to the whole plant, *Funct. Plant Biol.*,30,239–264.
- Chaves, M.M. (1991) : Effects of water deficits on carbon assimilation, *Journal of Experimental Botany*, 42,1-16.
- Choi, M., Jacobs, J. M., Anderson, M.C., Bosch, D. D. (2013) : Evaluation of drought indices via remotely sensed data with hydrological variables, *Journal of Hydrology*, 476, 265-273.
- Collatz, G. J., Ribas-Carbo, M. and Berry, J. A. (1992): Coupled photosynthesis-stomatal conductance model for leaves of C4 plants, *Aust. J. Plant. Physiol.*, 19, 519-538.

Constable, A.J., Costa, D.P., Schofield, O., Newman, L., Urban, E.R., Fulton, E.A., Melbourne-Thomas, J., Ballerini, T., Boyd, P.W., Brandt, A., de la Mare, W.K., Edwards, M., Eléaume, M., Emmerson, L., Fennel, K., Fielding, S., Griffiths, H., Gutt, J., Hindell, M.A., Hofmann, E.E., Jennings, S., La, H.S., McCurdy, A., Mitchell, B.G., Moltmann, T., Muelbert, M., Murphy, E., Press, A.J., Raymond, B., Reid, K., Reiss, C., Rice, J., Salter, I., Smith, D.C., Song, S., Southwell, C., Swadling, K.M., Van de Putte, A., Willis, Z., (2015) : Developing priority variables (“ecosystem Essential Ocean Variables” — eEOVs) for observing dynamics and change in Southern Ocean ecosystems, *Journal of Marine Systems*, 161, 26-41.

Cornic, G. (1994) : Drought stress and high light effects on leaf photosynthesis. In Baker NR, Bowyer JR, eds. *Photoinhibition of photosynthesis*. Oxford : Bios Scientific Publishers, 297-313.

Cramer, W., Bondeau, A., Woodward, F.I., Prentice, I.C., Betts, R.A., Brovkin, V., Cox, P.M., Fisher, V., Foley, J.A., Friend, A.D., Kucharik, C., Lomas, M.L., Ramankutty, N., Sitch, S., Smith, B., White, A., Young-Molling, C. (2001) : Global response of terrestrial ecosystem structure and function to CO₂ and climate change: results from six dynamic global vegetation models, *Global Change Biology*, 7(4), 357-373.

Crow, W. T., Kumar, S. V., and Bolten, J. D. (2012): On the utility of land surface models for agricultural drought monitoring, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 16, 3451–3460.

Dai, A.G. (2011) : Characteristics and trends in various forms of the Palmer Drought Severity Index during 1900-2008, *J. Geophys. Res.* 116:D12115.

De Lannoy, G.J.M., Houser, P.R., Verhoest, N.E.C. n Pauwels, V.R.N. and Gish, T.J.(2007) : Upscaling of point scale measurements to field averages at the OPE3 test site, *J. Hydrol.*, 343 (1-2), 1-11.

De Lannoy, G.J.M., Reichle, R.H., Houser, P.R., Pauwels, V.R.N. and Verhoest, E.C. (2007) : Correcting for forecast bias in soil moisture assimilation with the ensemble Kalman filter, *Water Resources Research*, 43, W09410, doi:10.1029/2006WR005449.

Decharme, B. and Douville, H. (2006a): Introduction of a sub-grid hydrology in the ISBA land surface model, *Clim. Dynam.*, 26, 65–78.

Dee, D. P., Uppala, S. M., Simmons, A. J., Berrisford, P., Poli, P., Kobayashi, S., Andrae, U., Balmaseda, M. A., Balsamo, G., Bauer, P., Bechtold, P., Beljaars, A. C. M., van de Berg, L., Bidlot, J., Bormann, N., Delsol, C., Dragani, R., Fuentes, 30 M., Geer, A. J., Haimberger, L., Healy, S. B., Hersbach, H., Hólm, E. V., Isaksen, L., Kallberg, P., Köhler, M., Matricardi, M., McNally, A. P., Monge-Sanz, B. M., Morcrette, J. J., Park, B. K., Peubey, C., de Rosnay, P., Tavolato, C., Thépaut, J.-N., and Vitart, F. (2011) : The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system, *Q. J. Roy. Meteorol. Soc.*, 137, 553–597, doi:10.1002/qj.828.

Dewaele, H., Munier, S., Albergel, C., Planque, C., Lannaia, N., Carrer, D., Calvet, J.-C. (2017) : Parameter optimisation for a better representation of drought by LSMs : inverse modelling vs. sequential data assimilation, HESS.

Dickinson, R.E., Henderson-Sellers, A., Kennedy, P.J. and Wilson, M.F. (1986): Biosphere Atmosphere Transfer Scheme (BATS) for the NCAR Community Climate Model, NCAR Technical Note, NCAR, TN275STR, 69 pp.

Döll, P., Siebert, S. (1999): A Digital Global Map of Irrigated Areas, Kassel World Series 1, Center for Environmental Systems Research, University of Kassel, Germany, 23 pp.

Duchaufour (1995) : Pédologie : " Sol, végétation et Environnement ", MASSON – Abrégés.

Duchaufour, Revue Forestière Française, « L'équilibre agro-sylvo-pastoral en Champagne Crayeuse ».

Eitzinger, J., Trnka, M., Hösch, J., Žalud, Z., and Dubrovský, M.(2003) : Comparison of CERES, WOFOST and SWAP models in simulating soil water content during growing season under different soil conditions, Ecological Modelling, 171, 223-246, doi:10.1016/j.ecolmodel.2003.08.012.

Entekhabi, D., Nakamura, H., and Njoku, E.G.: Solving the Inverse problem for soil moisture and temperature profiles by sequential assimilation of multifrequency remotely sensed observations, IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., 32 (2), 438-448, 1994.

Etchevers, P. , Golaz C. and Habets, F. (2001): Simulation of the water budget and the river flows of the Rhone basin from 1981 to 1994, J. Hydrol., 244, 60-85.

Fairbairn, D., Barbu,A.L., Mahfouf, J-F, Calvet, J.-C., and Gelati, E. (2015) : Comparing the ensemble and extended Kalman filters for in situ soil moisture assimilation with contrasting conditions, Hydrol. Earth Syst. Sci., 19, 4811-4830.

FAO (2005a) : La situation mondiale de l'alimentation et de l'agriculture. Le commerce agricole et la pauvreté : le commerce peut-il être au service des pauvres ? FAO, Rome.

FAO (2007) : Agricultural and water scarcity: a programmatic approach to water use efficiency and agricultural productivity. Rome, COAG/2007/7.12pp.

FAO (2008) : Financial mechanisms for adaptation to and mitigation of climate change in the food and agricultural sectors. High-Level conference on world food security.

Faroux, S., Kaptué Tchuenté, A. T., Roujean, J.-L., Masson, V., Martin, E., and Le Moigne, P. (2013): ECOCLIMAP-II/Europe: a twofold database of ecosystems and surface parameters at 1-km resolution based on satellite information for use in land surface, meteorological and climate models, Geosci. Model Dev., 6, 563–582, doi:10.5194/gmd-6-563-2013.

Farquhar, G.D., von Caemmerer S. And Berry, J.A. (1980): A biochemical model of photosynthetic CO₂ assimilation in leaves of C₃ species, Planta, 149, 78-90.

- Feddes, R. A., Hoff, H., Bruen, M., Dawson, T., De Rosnay, P., Dirmeyer, P., Jackson, R.B., Kabat, P., Kleidon, A., Lilly, A. and Pitman A.J. (2001): Modeling root-water uptake in hydrological and climate models, *Bull. Am. Meteorol. Soc.*,82(12), 2797–2809.
- Ferrant, S., Gascoïn, S., Veloso, A., Salmon-Monviola, J., Claverie, M., Rivalland, V., Dedieu, G., Demarez, V., Ceshia, E., Probst, J.-L., Durand, P., and Bustillo, V. (2014) : Agro-Hydrology and multi-temporal high-resolution remote sensing: toward an explicit spatial processes calibration, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 18, 5219-5237.
- Folberth, C., et al. (2016): Uncertainty in soil data can outweigh climate impact signals in global crop yield simulations, *Nat. 10 Commun.*, 7, 11872, doi:10.1038/ncomms11872.
- Foley, J. A., Levis, S., Heil Costa, M., Cramer, C., and Pollard D. (2000): Incorporating dynamic vegetation cover within global climate models, *Ecological applications*, 10(6) pp. 1620-1632.
- Foley, J. A., Ramankutty, N., Brauman, K. A., Cassidy, E. A., Gerber, S. G., Johnston, M., Mueller, N. D., O’Connell, C., Ray, D. K., West, P. C., Balzer, C., Bennett, E. M., Carpenter, S. R., Hill, J., Monfreda, C., Polasky, S., Rockström, J., Sheehan, J., Siebert, S., Tilman, D., and Zacks, D. P. M. (2011) : Solutions for a cultivated planet, *Nature*, 478, 7369, 337-342.
- Ford, T. W., Harris, E., and Quiring, S. M.(2014) : Estimating root zone layer soil moisture using near-surface observations from SMOS, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 18, 139–154.
- Friedl, M.A., Brodley, C.E. (1996) : Decision tree classification of land cover from remotely sensed data, *Remote Sensing of environment*, 61(3), 399-409.
- Gao, H., M. Hrachowitz, S. J. Schymanski, F. Fenicia, N. Sriwongsitanon, and H. H. G. Savenije (2014), Climate controls how ecosystems size the root zone storage capacity at catchment scale, *Geophys. Res. Lett.*, 41, 7916–7923, doi:10.1002/2014GL061668.
- Garcia-Ruiz, J., Lopez-Moreno, J. I., Vicente-Serrano., S. M., Lasanta, T., and Begueria, S. (2011) : Mediterranean water resources in a global change scenario, *Earth-Science Reviews*, 105, 121-139.
- Garrigues, S., Olioso, A., Carrer, D., Decharme, B., Calvet, J.-C., Martin, E., Moulin, S., and Marloie, O. (2015) : Impact of climate, vegetation, soil and crop management variables on multi-year ISBA-A-gs simulations of evapotranspiration over a Mediterranean crop site, *Geosci. Model Dev.*, 8, 3033–3053.
- Gate, P.(1995) : *Ecophysiologie du blé : de la plante à la culture*, Tech&Doc Lavoisier, Paris, France. 424pp.
- Ghilain, N., Arboleda, A., Sepulcre-Cantò, G., Batelaan, O., Ardö, J., and Gellens-Meulenberghs, F. (2012): Improving evapotranspiration in a land surface model using biophysical variables derived from MSG/SEVIRI satellite, *Hydrol. Earth 15 Syst. Sci.*, 16, 2567–2583.

- Gibelin, A.-L., Calvet, J.-C., Roujean, J.-L., Jarlan, L., and Los, S. O. (2006): Ability of the land surface model ISBA-A-gs to simulate leaf area index at the global scale: Comparison with satellites products, *J. Geophys. Res.*, 111, D18102, doi:10.1029/2005JD006691.
- Gibelin, A.-L., Calvet, J.-C., Viovy, N., (2008): Modelling energy and CO₂ fluxes with an interactive vegetation land surface model –evaluation at high and middle latitudes. *Agric. For. Meteorol.* 148, 1611–1628.
- Gil, M., Garrido, A. and Gomez-Ramos, A. (2011) : Economic analysis of drought risk: An application for irrigated agriculture in Spain, *Agricultural Water Management*, 98(5), 823-833.
- Global Harvest Initiative – Global Agricultural Productivity report (2016) : Sustainability in a uncertain season, 72 pp.
- Goudriaan, J., Van Laar, H.H, Van Keulen, H. and Louwerse, W. (1985): Photosynthesis, CO₂ and plant production. In: Day, edited by: W., Atkin, R.K., *Wheat Growth and Modelling*, NATO ASI Series, Series A: Life Sciences, 86, 107–122.
- Grime, J.P (2001): *Plant strategies, vegetation processes and ecosystem properties*, 2nd edn. John Wiley & Sons Ltd, Chichester.
- Gu, L., Falge, E. M., Boden, T., Baldocchi, D. D., Black, T. A., Saleska, S. R., Suni, T., Verma, S. B., Vesala, T., Wofsy, S. C., and Xu, L (2005).: Objective threshold determination for nighttime eddy flux filtering, *Agric. Forest Meteorol.*, 128, 179–197.
- Guderle, M., and Hildebrandt, A. (2015) : Using measured soil water contents to estimate evapotranspiration and root water uptake profiles – a comparative study, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 19, 409–425.
- Gutman, G. and Ignatov, A. (1998) : The derivation of the green vegetation fraction from NOAA/AVHRR data for use in numerical weather prediction models, *Int. J. of Rem. Sens.*, 19, 1533-1543.
- Habets, F., Etchevers, P., Golaz, C., Leblois, E., Ledoux, E., Martin, E., Noilhan, J. and Otle, C. (1999b): Simulation of the water budget and the river flows of the Rhone basin, *J. Geophys. Res.* 104, 31145– 31172.
- Hamblin, A.P. (1986) : The Influence of Soil Structure on Water Movement, Crop Root Growth, and Water Uptake, *Advances in Agronomy*, 38, 95-158.
- Hamdy, A. (1996) : Saline irrigation assessment and management techniques. In: Choukr-Allah, R., Malcolm, C.V., Hamdy, A. (Eds.). *Halophytes and Biosaline Agriculture*. Marcel Dekker, New York, NY. Pp. 147-180.
- Haudricourt A.-G. (1962) : Domestication des animaux, cultures des plantes et traitements d'autrui, *L'Homme*, tome 2 n°1. pp 40-50.

- Hollmann, R., Merchant, C.J., Saunders, R., Downy, C., Buchwitz, M., Cazenave, A., Chuvieco, E., Defourny, P., de Leeuw, G., Forsberg, R., Holzer-Popp, T., Paul, F., Sandven, S., Sathyendranath, S., van Roozendaal, Wagner, W. (2012): The ESA Climate Change Initiative: Satellite Data Records for Essential Climate Variables, <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00254.1>
- Hong, S.-Y., and E. Kalnay (2000) : Role of sea surface temperature and soil-moisture feedback in the 1998 Oklahoma-Texas Drought, *Nature*, 408, 842 – 844.
- Houborg, R., Fisher, J.E., Skidmore, A.K. (2015) : Advances in remote sensing of vegetation function and traits, *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 43, 1-6.
- Houser, P.R., Shuttleworth, W.J., Famiglietti, J.S., Gupta, H.V., Syed, K.H. and Goodrich, D.C. (1998) : Integration of soil moisture remote sensing and hydrologic modeling using data assimilation, *Water resources research*, 34(12), 3405-3420.
- Huete, A., et al. (1999). A light aircraft radiometric package for MODLand Quick Airborne Looks (MQUALS). *Earth Observations*, 11 ,22–25 (NASA/GSFC).
- Huete, A.R. (1988) : A soil-adjusted vegetation index (SAVI), *Remote Sensing of Environment*, 25(3), 295-309.
- Hunt, E.D., Hubbard, K.G., Wilhite, D.A., Arkebauer, T.J. and Dutcher, A.L. (2009) : The development and evaluation of a soil moisture index, *Int. J. Climatol.*, 29, 747-759.
- Ichii, K., Wang, W., Hashimoto, H., Yang, F., Votava, P., Michaelis., A. R., Nemani, R . R. (2009) : Refinement of rooting depths 20 using satellite based evapotranspiration seasonality for ecosystem modelling in California, *Agr. Forest Meteorol.*, 149, 1907-1918.
- Iglesia, A., Garrote, L., Flores, L., Moneo, M. (2007) : Challenges to Manage the Risk of Water Scarcity and Climate Change in the Mediterranean, *Water Resour. Manage.*, 21, 775-788, DOI 10.1007/s11269-006-9111-6.
- IPCC, «Intergovernmental panel on climate change», 5th assessment report, 2014.
- Jarlan, L., G. Balsamo, S. Lafont, A. Beljaars, J.-C. Calvet, and E. Mougin (2008), Analysis of leaf area index in the ECMWF land surface model and impact on latent heat and carbon fluxes: Application to West Africa, *J. Geophys. Res.*, 113, D24117, doi:10.1029/2007JD009370.
- Jarvis, N.J. (2011) : Simple physics-based models of compensatory plant water uptake: concepts and eco-hydrological consequences, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 15, 3431–3446.
- Jarvis, P.G. (1976): The interpretation of the variations in leaf water potential and stomatal conductance found in canopies in the field, *Phil. Trans. R. Soc. Lond. B*, 273, 593-610.
- Jobbagy, E. G., and R. B. Jackson. (2001) : The distribution of soil nutrients with depth: global patterns and the imprint of plants, *Biogeochemistry*, 53, 51–77.

- Jump, A. S., Penuelas, J. (2005) : Running to stand still: adaptation and the response of plants to rapid climate change, *Ecology Letters*, 8, 1010-1020, doi: 10.1111/j.1461-0248.2005.00796.x.
- Jung, M., Reichstein, M., and Bondeau, A. (2009): Towards global empirical upscaling of FLUXNET eddy covariance observations: validation of a model tree ensemble approach using a biosphere model, *Biogeosciences*, 6, 2001–2013, doi:10.5194/bg-6-2001-2009.
- Kallis, G. (2008) : Droughts, *Annu. Rev. Environ. Resour.* 33, 85-118.
- Kerr, Y. (2007): Soil moisture from space: Where are we?, *Hydrogeol. J.*, 15, 1, 117-120.
- Kerr, Y., Waldteufel, P., Wigneron, J.-P., Martinuzzi, J.-M., Font, J. and Berger, M. (2001): Soil Moisture retrieval from space: the Soil Moisture and Ocean Salinity (SMOS) mission, *IEEE T. Geosci. Remote*, 39, 1729-1736.
- Kersebaum, K.C., Boote, K.J., Jorgenson, J.S., Nendel, C., Bindi, M., Fruhauf, C., Gaiser, T., Hoogenboom, G., Kollas, C., Olesen, J.E., Rötter, R.P., Ruget, F., Thorburn, P.J., Trnka, M. and Wegehenkel, M. (2015) : Analysis and classification of data sets for calibration and validation of agro-ecosystem models, *Envir. Modelling & Software*.
- Khan, S., Gabriel, H. and Rana, T. (2008) : Standard precipitation index to track drought and assess impact of rainfall on watertables in irrigation areas. *Irrigation and Drainage Systems*. 22. 159-177. 10.1007/s10795-008-9049-3.
- Kogan, F. (1990): Remote Sensing of Weather Impacts on Vegetation in Non-Homogeneous Areas, *International Journal of Remote Sensing*, 11, 1405–1419. doi:10.1080/01431169008955102.
- Kogan, F.N. (1995): Drought of the late 1980s in the United States as derived from NOAA polar-orbiting satellite data, *Bulletin of the American Meteorological Society*, 76, 655–668.
- Koster, R.D., Guo, Z., Yang, R., Dirmeyer, P.A., Mitchell, K., Puma, M.J. (2009) : On the nature of soil moisture in land surface models, *Journal of Climate*, 22, 4322-4335.
- Koster, R.D., Milly, P.C.D. (1996) : The interplay between transpiration and runoff formulations in land surface schemes used with atmospheric models, *Journal of Climate*, 10, 1578-1591.
- Kowalik, W., Dabrowska-Zielinska, K., Meroni, M., Raczka, U. T., and de Wit A.(2014): Yield estimation using SPOT-VEGETATION products: A case study of wheat in European countries, *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf.*, 32, 228–239, doi:10.1016/j.jag.2014.03.011.
- Krinner, G., Viovy, N., de Noblet-Ducoudré, N., Ogée, J., Polcher, J., Friedlingstein, P., Ciais, P., Sitch, S., and Prentice, I. C. (2005): A dynamic global vegetation model for studies of the coupled atmosphere-biosphere system, *Global Biogeochem. Cy.*, 30 19, GB1015, doi:10.1029/2003GB002199.

- Kumar, R., Shankar, V., Jat, M.K. (2014) : Evaluation of root water uptake models-a review, *Journal of Hydraulic Engineering*, <http://dx.doi.org/10.1080/09715010.2014.981955>.
- Kuppel, S., Chevallier, F., Peylin, P., (2013): Quantifying the model structural error in carbon cycle data assimilation systems. *Geosci. Model Dev.* 6, 45–55. doi:10.5194/gmd-6-45-2013.
- Kuppel, S., Peylin, P., Chevallier, F., Bacour, C., Maignan, F., Richardson, A.D., (2012): Constraining global ecosystem model with multi-site eddy-covariance data. *Biogeosciences Discuss.* 9, 3317–3380. doi:10.5194/bgd-9-3317-2012.
- Lafont, S., Zhao, Y., Calvet, J.-C., Peylin, P., Ciais, P., Maignan, F. and Weiss, M. (2012): Modelling LAI, surface water and carbon fluxes at high-resolution over France: comparison of ISBA-A-gs and ORCHIDEE, *Biogeosciences*, 9, 439-456, doi:10.5194/bg-9- 439-2012.
- Lawlor, D.W. (1995) : The effects of water on photosynthesis. In : Smirnoff, N. *Environment and plant metabolism*. Oxford : Bios Scientific Publishers, 129-160.
- Le Moigne, P. (2009): SURFEX scientific documentation, Note de centre du Groupe de Météorologie à Moyenne Echelle, Météo-France, CNRM, Toulouse, 87, 211 pp.
- Lemaire G., Gastal F. (1997) : "N Uptake and distribution in plant canopies", *Diagnosis of the nitrogen status in crops*, G.Lemaire éd., Springer Verlag, New-York, pp 3-44.
- Levis, S. and Foley, J.A. (1999) : Potential high-latitude vegetation feedbacks on CO₂-induced climate change, *Geophys. Res. Lett.*, 26(6), 747-750.
- Li, S., Wheeler, T., Challinor, A., Lin, E., Ju, H., and Xu, Y.(2010): The observed relationship between wheat and climate in China, *Agr. Forest Meteorol.*, 150, 1412-1419, doi:10.1016/j.agrformet.2010.07.003.
- Lobell, D. B., Schlenker, W., and Costa-Roberts (2011) : Climate trends and global crop production since 1980, *Science*, 333 (6042), 616-620.
- López-Lozano, R. et al., (2015) : Towards regional grain yield forecasting with 1km-resolution EO biophysical products: Strengths and limitations at pan-European level, *Agricultural and Forest Meteorology*, Volume 206, Pages 12-32, ISSN 0168-1923, <http://dx.doi.org/10.1016/j.agrformet.2015.02.021>. (<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168192315000702>).
- Loubet, B., Laville, P., Lehuger, S., Larmanou, E., Flécharde C., Mascher N., Genermont S., Roche R., Ferrara, R. M., Stella, P., Personne, E., Durand B., Decuq C., Flura, D., Masson, S., Fanucci, O., Rampon, J.-N., Siemens, J., Kindler, R., Gabrielle B., Schrupf, M., and Cellier P. (2011): Carbon, nitrogen and Greenhouse gases budgets over a four years crop rotation in northern France, *Plant Soil*, 343, 109–137, doi:10.1007/s11104-011-0751-9.
- Mahfouf, J.-F., Bergaoui, K., Draper, C., Bouyssel, F., Taillefer, F. and Taseva, L. (2009) : A comparison of two off-line soil analysis schemes for assimilation of screen level observations, *J. Geophys. Res.*, 114, 21 pp, D08105, doi:10.1029/2008JD011077.

Mahfouf, J.-F., Manzi, O., Noilhan, J., Giordani, H. and Déqué, M. (1995): The land surface scheme ISBA within the Météo-France climate model ARPEGE. Part I : Implementation and preliminary results, *J. Climate*, 8, 2039-2057.

Mahfouf, J.-F., Rabier, F. (2000) : The ECMWF operational implementation of four-dimensional variational assimilation. II: Experimental results with improved physics, *Q.J.R. Meteorol. Soc.*, 126, 564, Part A, 1171–1190.

Mairano, A., Martre, P., Asseng, S., Ewert, F., Müller, C., Rötter, R.P., Ruane, A.C., Semenov, M.A., Wallach, D., Wang, E., Alderman, P.D., Kassie, B.T., Biernath, C., Basso, B., Cammarano, D., Challinor, A.J., Doltra, J., Dumont, B., Rezaei, E.E., Gayler, S., Kersebaum, K.C., Kimball, B.A., Koehler, A.-K., Liu, B., O’Leary, G.J., Olesen, J.E., Ottman, M.J., Priesack, E., Reynolds, M., Stratonovitch, P., Streck, T., Thorburn, P.J., Waha, K., Wall, G.W., White, J.W., Zhao, Z. and Zhu, Y. (2016) : Crop model improvement reduces the uncertainty of the response to temperature of multi-model ensembles, *Fields Crops Res.*

Manabe, S. (1969): Climate and the ocean circulation, 1. The atmospheric circulation and the hydrology of the Earth’s surface, *Mon. Weather Rev.*, 97, 739-774.

Margat, J. and Vallee, D. (1999): *Vision Méditerranéenne sur l’eau, la population et l’environnement au XXème siècle*, Plan Bleu, MEDTAC/Pan Bleu, Sophia-Antipolis, 62 pp.

Martin, E., Le Moigne, P., Masson, V., Boone, A., Bogatchev, A., Brut, A., Bouyssel, F., Calvet, J.-C., Champeaux, J.-L., Chancibault, K., Decharme, B., Donier, S., Douville, H., Dzierdzic, A., Giard, D., Faroux, S., Fischer, C., Gibelin, A.-L., Habets, F., Hello, G., Jarlan, L., Jidane, M., Kraljevic, L., Kullmann, L., Lac, C., Lacarrère, P., Lebeaupin, C., Mahfouf, J.-M., Malardel, S., Mallet, I., Marquet, P., Masson, V., Mokthari, M., Payart, J., Noilhan, J., Quintana-Seguí, P., Seity, Y., Tulet, P., Vincendon, B., Zaaboul, R. and Zuurendonk, I. (2007): Le code de surface externalisé SurfEx de Météo-France. Atelier de modélisation de l’atmosphère, Toulouse, 16-17 janvier 2007, 4p., http://www.cnrm.meteo.fr/ama2007/resumes/2007_AMA_SURFEX.pdf

Martre, P., Wallach, D., Asseng, S., Ewert, F., Jones, J.W., Rötter, R.P., Boote, K.J., Ruane, A.C., Thorburn, P.J., Cammarano, D., Hatfield, J.L., Rosenzweig, C., Aggarwal, P.K., Angulo, C., Basso, B., Bertuzzi, P., Biernath, C., Brisson, N., Challinor, A.J., Doltra, J., Gayler, S., Goldberg, R., Grant, R.F., Heng, L., Hooker, J., Hunt, L.A., Ingwersen, J., Izaurralde, R.C., Kersebaum, K.C., Müller, C., Kumar, S.N., Nendel, C., O’Leary, G.J., Olesen, J.E., Osborne, T.M., Palosuo, T., Priesack, E., Ripoche, D., Semenov, M.A., Shcherbak, I., Steduto, P., Stöckle, C.O., Stratonovitch, P., Streck, T., Supit, I., Tao, F., Travasso, M., Waha, K., White, J.W., Wolf, J. (2015) : Multimodel ensembles of wheat growth: many models are better than one, *Glob. Change Biol.*, 21, 911-925.

Masson, V., Le Moigne, P., Martin, E., Faroux, S., Alias, A., Alkama, R., Belamari, S., Barbu, A., Boone, A., Bouyssel, F., Brousseau, P., Brun, E., Calvet, J.-C., Carrer, D., Decharme, B., Delire, C., Donier, S., Essaouini, K., Gibelin, A.-L., Giordani, H., Habets, F., Jidane, M., Kerdraon, G., Kourzeneva, E., Lafaysse, M., Lafont, S., Lebeaupin Brossier, C.,

- Lemonsu, A., Mahfouf, J.-F., Marguinaud, P., Mokhtari, M., Morin, S., Pigeon, G., Salgado, R., Seity, Y., Taillefer, F., Tanguy, G., Tulet, P., Vincendon, B., Vionnet, V., and Voldoire, A. (2013): The SURFEXv7.2 land and ocean surface platform for coupled or offline simulation of earth surface variables and fluxes, *Geosci. Model Dev.*, 6, 929–960, doi:10.5194/gmd-6-929-2013.
- McKee, T.B., Doesken, N.J. and Kleist, J. (1993): The relationship of drought frequency and duration to time scales, In: McKee, T.B., Doesken, N.J. and Kleist, J. (eds.), *Preprints, 8th Conference on Applied Climatology*, 179–84. 17–22 January 1993, Anaheim, Calif., Boston, Mass., American Meteorological Society.
- Miller, D.A., White, R.A. (1998) : A conterminous United States multilayer soil characteristics dataset for regional climate and hydrology modeling, *Earth Interactions*, 2, 26pp.
- Miralles, D. G., Holmes, T. R. H., De Jeu, R. A. M., Gash, J. H., Meesters, A. G. C. A., and Dolman, A. J. (2011): Global land-15 surface evaporation estimated from satellite-based observations, *Hydrology and Earth System Sciences*, 15, 453–469, doi:10.5194/hess-15-453-2011.
- Mironov D.V. (2008): Parameterization of lakes in numerical weather prediction. Description of a lake model. COSMO Technical Report 11, Deutscher Wetterdienst, Offenbach am Main, Germany, 41 pp.
- Montandon, L.M., Small, E.E., (2008) : The impact of soil reflectance on the quantification of the green vegetation fraction from NDVI. *Remote Sensing of Environment* 112, 1835–1845.
- Munier, S., Carrer, D., Planque, C., Albergel, C. and Calvet, J.-C. (2017): Satellite Leaf Area Index: global scale analysis of the tendencies per vegetation type over the last 17 years, *Remote Sens. Environ.*, submitted 2017.
- Myneni, R. B., Hall, F. G., Sellers, P. J., & Marshak, A. L. (1995). The meaning of spectral vegetation indices. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*,33, 481–486.
- Myneni, R. B., R. R. Nemani, and S. W. Running, Estimation of global leaf area index and absorbed PAR using radiative transfer models, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*,35, 1380–1393.
- Myneni, R.B., Hoffman, S., Knyazikhin, Y., Privette, J.L., Glassy, J., Tian, Y., Wang, Y., Song, X., Zhang, Y., Smith, G.R., Lotsch, A., Friedl, M., Morisette, J.T., Votava, P., Nemani, RR, Running, S.W. (2002) : Global products of vegetation leaf area and fraction absorbed PAR from year one of MODIS data, *Remote Sensing of Environment*, 83, 214–231.
- Nachtergaele, F., van Velthuize, H., Verelst, L., Wiberg, D., Batjes, N., Dijkshoorn, K., van Engelen, V., Fischer, G., Jones, A., Montanarella, L., Petri, M., Prieler, S., Teixeira, E., and Shi, X.: *Harmonized World Soil Database (version 1.2)*, 2012, available at:

http://webarchive.iiasa.ac.at/Research/LUC/External-World-soil-database/HWSD_Documentation.pdf (last access: December 2014), 2012.

Nemani, R.R., Keeling, C.D., Hashimoto, H., Jolly, W.M., Piper, S.C., Tucker, C.J., Myneni, R.B., Running, S.W. (2003) : Climate-driven increases in global terrestrial net primary production from 1982 to 1999, *Science*, 300(5625), pp. 1560-1563.

Noilhan, J. and Mahfouf, J.-F. (1996): The ISBA land surface parameterisation scheme, *Global Planet. Change*, 13, 145-149.

Noilhan, J. and Planton, S. (1989): A simple parameterisation of Land Surface Processes for meteorological model, *Mon. Weather Rev.*, 117, 356-549.

Olesen, J.E., Trnka, M., Kersebaum, K.C., Skjelvag, A.O., Seguin, B., Peltonen-Sainio, P., Rossi, F., Kozyra, J., and Micalle, F. (2011): Impacts and adaptation of European crop production systems to climate change, *Europ. J. Agronomy*, 34, 96-112, doi:10.1016/j.eja.2010.11.003.

Oweis, T. Pala, M. and Ryan, J. (1998): Stabilizing rainfed wheat yields with supplemental irrigation and nitrogen in a Mediterranean-type climate. *Agronomy Journal* vol. 90:672-681.

Palmer, W. C. (1965): *Meteorological Drought*, Weather Bureau, Research Paper, 45, U.S. Dept. of Commerce, Washington, DC, 58 pp.

Palosuo, T., Kersebaum, K.C., Angulo, C., Hlavinka, P., Moriondo, M., Olesen, J.E., Patil, R.H., Ruget, F., Rumbaur, C., Takac, J., Trnka, M., Bindi, M., Caldag, B., Ewert, F., Ferrise, R., Mirschel, W., Saylan, L., Siska, B., Rötter, R. (2011): Simulation of winter wheat yield and its variability in different climates of Europe : A comparison of eight crop growth models, *European Journal of Agronomy*, 35(3), 103-114.

Pereira, H. M., S. Ferrier, M. Walters, G. N. Geller, R. H. G. Jongman, R. J. Scholes, M. W. Bruford, N. Brummitt, S. H. M. Butchart, A. C. Cardoso, N. C. Coops, E. Dulloo, D. P. Faith, J. Freyhof, R. D. Gregory, C. Heip, R. Höft, G. Hurtt, W. Jetz, D. S. Karp, M. A. McGeoch, D. Obura, Y. Onoda, N. Pettorelli, B. Reyers, R. Sayre, J. P. W. Scharlemann, S. N. Stuart, E. Turak, M. Walpole, and M. Wegmann, 2013: Essential Biodiversity Variables. *Science* 339, 277-278.

Perrier, E.R, and Salkini, A.B. (1991): Supplement irrigation in the near East and north Africa. *Proceedings of a Workshop on Regional Consultation on Supplemental Irrigation*. ICARDA and FAO, Rabat, Morocco, 7–9 December, 1987.

Piedallu, C., Gégout, J.-C., Bruand, A., and Seynave, I., (2011) : Mapping soil water holding capacity over large areas to predict potential production of forest stands, *Geoderma*, 160, 355-366, doi:10.1016/j.geoderma.2010.10.004.

Pielke, R.A., Sr, Roni Avissar, Raupach, M., Dolman, A.J., Zeng, X., Denning, A.S (1998) : Interactions between the atmosphere and terrestrial ecosystems: influence on weather and climate, *Global Change Biology*, 4(5), 461-475.

- Portoghesi, I., Iacobellis, V., Sivapalan, M. (2008) : Analysis of soil and vegetation patterns in Mediterranean landscapes by way of a conceptual water balance model, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 12, 899-911.
- Prigent, C., Aires, F., Rossow, W. B. and Robock, A. (2005): Sensitivity of microwave and infrared satellite observations to soil moisture at a global scale. I: Satellite observations and their relationship to in situ soil moisture measurements, *J. Geophys. Res.*, 110, D07110, doi:10.1029/2004JD005087.
- Prout, N., Dalezios, N.R., Manore, M., Tracey, J., Brown, R. and Walker, G. (1986): Agricultural drought : precipitation deficiency and NOAA-AVHRR index comparisons, In: *Proc. Canadian Hydrol. Symp. (GHS: 86) (Regina, Saskatchewan, 3-6 June)*, 91-100. Natural Science and Engineering Research Council (NSERC), Canada.
- Quillet, A., Peng, C., and Garneau, M. (2010) : Toward dynamic global vegetation models for simulating vegetation-climate interactions and feedbacks : recent developments, limitations, and future challenges, *Environmental reviews*, 18, 333-353.
- Quiring, S.M., (2009): Developing objective operational definitions for monitoring drought. *J. Appl. Meteorol. Climatol.* 48, 1217–1229.
- Quiroga, S., Fernandez-Haddad, Z., and Iglesia, A.(2011): Crops yields response to water pressure in the Ebro basin in Spain: risk and water policy implications, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 15, 505–518.
- Ragab, R.(1995) : Towards a continuous operational system to estimate the root-zone soil moisture from intermittent remotely sensed surface soil moisture, *J. Hydrol.*, 173, n°1-4, 1-25.
- Rasmussen, M. S. (1992) : Assessment of millet yields and production in northern Burkina Faso using integrated NDVI from the AVHRR, *International Journal of Remote Sensing*, 13, 3431-3442.
- Reich PB, Ellsworth DS, Walters MB, Vose JM, Gresham C, Volin JC, Bowman WD (1999) Generality of leaf trait relationships: a test across six biomes. *Ecology*, 80, 1955–1969.
- Reichle, R.H., McLaughlin, D.B., Entekhabi, D. (2002) : Hydrologic data assimilation system with the ensemble kalman filter, *Monthly weather review*, 130, 103-114.
- Rembold, F., Atzberger, C., Savin, I., Rojas, O. (2010) : Using Low Resolution Satellite Imagery for Crop Monitoring and Yield Prediction at the Regional Scale. In *Remote Sensing Optical Observations of Vegetation Properties*; Maselli, F., Menenti, M., Brivio, A., Eds.; Research.
- Ritchie, J. T., and Otter, S.(1985): Description and performance of CERES-wheat: A user-oriented wheat yield model, *ARS wheat yield project*, 38, 159-175.

- Rivalland, V., Calvet, J.-C., Berbigier, P., Brunet, Y. et Granier, A. (2005) : Transpiration and CO₂ fluxes of a pine forest: modelling the undergrowth effect, *Ann. Geophys.*, 23, 291–304, 2005.
- Rivalland, Vincent. (2003). Improvement and Validation of the Vegetation Functioning Model ISBA-A-gs: Water Stress and CO₂ Fluxes.
- Rodell, M., Houser, P.R., Berg, A.A., Famiglietti, J.S. (2005) : Evaluation of 10 methods for initializing a land surface model, *Journal of Hydrometeorology*, 6, 146-155.
- Rojas, O., Vrieling, A., Rembold, F. (2011): Assessing drought probability for agricultural areas in Africa with coarse resolution remote sensing imagery. *Remote Sens. Environ.*, 115, 343–352.
- Rosenzweig, C. et al. (2013) : The agricultural model intercomparison and improvement project (AgMIP): protocols and pilot studies, *Agr. Forest Meteorol.*, 170, 166-182.
- Rötter, R., Carter, T.R., Olesen, J.E., and Porter, J.R. (2011): Crop-climate models need an overhaul, *Nature Clim. Change*, 1, 175-177.
- Rüdiger, C., Calvet, J.-C., Gruhier, C., Holmes, T., De Jeu, R., and Wagner, W. (2009) : An intercomparison of ERS-Scat and AMSR-E soil moisture observations with model simulations over France, *J. Hydrometeorol.*, 10, 431–447, doi:10.1175/2008JHM997.1.
- Sabater, J.M., Jarlan, L., Calvet, J.-C, Bouyssel, F. and De Rosnay, P. (2007): From near surface to root zone soil moisture using different assimilation techniques, *J. Hydrometeorol.*, 8, 2, 94-206.
- Sannier, C. A. D., Taylor, J. C., Du Plessis, W. & Campbell, K. (1998) : Real-time vegetation monitoring with NOAA-AVHRR in Southern Africa for wildlife management and food security assessment. *International J. of Remote Sensing* 19: 621-639.
- Sarrat, C., Noilhan, J., Lacarrère, P., Ceschia, E., Ciais, P., Dolman, A. J., Elbers, J. A., Gerbig, C., Gioli, B., Lauvaux, T., Miglietta, F., Neininger, B., Ramonet, M., Vellinga, O. and Bonnefond, J. M. (2009): Mesoscale modelling of the CO₂ interactions between the surface and the atmosphere applied to the April 2007 CERES field experiment, *Biogeosciences*, 6, 633–646.
- Schmugge, T.J. (1983) : Remote Sensing of Soil Moisture: Recent Advances, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 21(3), 336 – 344.
- Schneider, C.L., Attinger, S., Delfs, J.-O., Hildebrandt, A. (2010) : Implementing small scale processes at the soil-plant interface – the role of root architectures for calculating root water uptake profiles, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 14, 279-289.
- Schulze ED, Kelliher FM, Körner C, Lloyd J, Leuning R (1994) Relationship among maximum stomatal conductance, ecosystem surface conductance, carbon assimilation rate,

and plant nutrition: a global ecology scaling exercise. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 25, 629–660.

Sellers, P. J. (1985), Canopy reflectance, photosynthesis and transpiration, *Int. J. Remote Sens.*, 6, 1335–1372.

Sellers, P. J., Bounoua, L, Collatz, G.J., Randall, D.A., Dazlich, D.A., Los, S.O., Berry, J.A., Fung, I., Tucker, C.J., Field, C.B. and Jensen, T.G. (1996): Comparison of Radiative and Physiological Effects of Doubled Atmospheric CO₂ on Climate, *Science*, 271, 5254, 1402 – 1406, doi: 10.1126/science.271.5254.1402.

Sellers, P.J., Meeson B.W., Hall F.G., Asrar G., Murphy, R.E., Schiffer R.A., Bretherton, F.P., Dickinson, R.E., Ellingson R.G., Field C.B., Huemmrich K.F., Justice, C.O., Melack, J.M., Roulet N.T., Schimel, D.S. and Try P.D. (1995): Remote sensing of the land surface for studies of global change: Models-algorithms-experiments, *Remote Sens. Environ.*, 51, 1, pp 3-26.

Sellers, P.J., Mintz, Y., Sud Y.C. and Dalcher A. (1986): A simple biosphere model (SiB) for use within general circulation models, *J. Atmos. Sci.*, 43, 505-531.

Sheffield, J., Goteti, G., Wen, F., Woof, E.F. (2004) : A simulated soil moisture based drought analysis for the United States, *J. of Geophys. Res.*, 109, D24108, doi:10.1029/2004JD005182.

Shukla, J.M., and Mintz, Y., (1982): The influence of land surface evapotranspiration on Earth's climate, *Science*, 215, 1498-1501.

Simmons, A. J., Willett, K. M., Jones, P. D., Thorne, P. W., and Dee, D. P. (2010): Low-frequency variations in surface atmospheric humidity, temperature, and precipitation: Inferences from reanalyses and monthly gridded observational data sets, *J. Geophys. Res.*, 115, D01110, doi:10.1029/2009JD012442.

Siquiera, M., Katul, G., Porporato, A. (2008) : Onset of water stress, hysteresis in plant conductance, and hydraulic lift: Scaling soil water dynamics from millimeters to meters, *WATER RESOURCES RESEARCH*, VOL. 44, W01432, doi:10.1029/2007WR006094.

Soylu, M.E., Istanbuluoglu, E., Lenters, J. D., and Wang, T. (2011): Quantifying the impact of groundwater depth on evapotranspiration in a semi-arid grassland region, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 15, 787–806.

Sternberg, T. (2011): Regional drought has a global impact, *Nature*, 472, 169, doi:10.1038/472169d.

Szczypta, C., Calvet, J.-C., Albergel, C., Balsamo, G., Boussetta, S., Carrer, D., Lafont, S., and Meurey, C. (2011) : Verification of the new ECMWF ERA-Interim reanalysis over France, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 15, 647–666, doi:10.5194/hess-15-647-2011.

- Szczypta, C., Calvet, J.-C., Maignan, F., Dorigo, W., Baret, F., and Ciais, P. (2014) : Suitability of modelled and remotely sensed essential climate variables for monitoring Euro-Mediterranean droughts, *Geosci. Model Dev.*, 7, 931–946.
- Szczypta, C., Decharme, B., Carrer, D., Calvet, J.-C., Lafont, S., Somot, S., Faroux, S., and Martin, E. (2012) : Impact of precipitation and land biophysical variables on the simulated discharge of European and Mediterranean rivers, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 16, 3351–3370, doi:10.5194/hess-16-3351-2012.
- Tallaksen, L. M., Madsen, H. and Clausen, B. (1997): On the definition and modelling of streamflow drought duration and deficit volume, *Hydrol. Sci. J.*, 42, 1, 15-33.
- Tanaka, K., Takizawa, H., Kume, T., Xu J., Tantasirin, C., and Suzuki, M.(2004): Impact of rooting depth of soil hydraulic properties on the transpiration peak of an evergreen forest in northern Thailand in the late dry season, *J. Geophys. Res.*, 109, D23107, doi:10.1029/2004JD004865.
- Tetegan, M., Nicoullaud, B., Baize, D., Bouthier, A., Cousin, I. (2011) : The contribution of rock fragments to the available water content of stony soils: Proposition of new pedotransfer functions, *Geoderma* 165 (1), 40-49.
- Tezara, W., Mitchell, V. J., Driscoll, S. D., Lawlor, D. W. (1999) : Water stress inhibits plant photosynthesis by decreasing coupling factor and ATP, *Nature*, London 401.6756, 914-917.
- Trnka, M., Hlavinka, P., Semenov, M.A., (2015): Adaptation options for wheat in Europe will be limited by increased adverse weather events under climate change. *J. R. Soc. Interface* 12, 20150721. <http://dx.doi.org/10.1098/rsif.2015.0721>.
- Tucker, C.J., Vanpraet, C.L., Sharman, M.J. and Van Ittersum, G. (1985): Satellite remote sensing of total herbaceous biomass production in the Senegalese Sahel, 1980-1984, *Remote Sens. Environ.*, 17, 233-249.
- Urban, M. C., De Meester, L., Vellend, M., Stocks, R., and Vanoverbeke, J. (2012) : A crucial step toward realism: responses to climate change from an evolving metacommunity perspective, *Evolutionary Applications*, 5, 154-167.
- Van Dam, J. C., Huygen, J., Wesseling, J. G., Feddes, R. A., Kabat, P., Van Walsum P. E. V., Groenendijk, P., and Van Diepen, C. A.(1997) : Theory of SWAP version 2.0. Simulation of water flow, solute transport and plant growth in the Soil–Water–Atmosphere–Plant environment, Report 71, Sub department of Water Resources, Wageningen University, Technical document, 45.
- Van Der Velde, M., Tubiello, N.Francesco., Vrieling, A., and Bouraoui, F. (2012): Impacts of extreme weather on wheat and maize 15 in France: evaluating regional crop simulations against observed data, *Climatic Change*, 113, 751–765.
- Van Diepen, C. A., Wolf, J., Van Keulen, H., and Rappoldt, C. (1989): WOFOST: a simulation model of crop production, *Soil Use and Management*, 5, 16-24.

- Vasiliades, L. and Loukas, A. (2009) : Hydrological response to meteorological drought using the Palmer drought indices in Thessaly, Greece, *Desalination*, 237, 3-21.
- Vicente-Serrano, S. M. (2007) : Evaluating the impact of drought using remote sensing in a Mediterranean, Semi-arid region, *Natural Hazards*, 40, 173-208.
- Walker, J.P., Willgoose, G.R. and Kalma, J.D.: One-dimensional soil moisture profile retrieval by assimilation of near-surface measurements: A simplified soil moisture model and field application, *J. Hydrometeor.*, 2, 356-373, 2001a.
- Walker, J.P., Willgoose, G.R. and Kalma, J.D.: One-dimensional soil moisture profile retrieval by assimilation of near-surface observations: a comparison of retrieval algorithms, *Advanced in Water Resources*, 24, 6, 631-650, 2001b.
- Walker, W.E., Harremoës, P., Rotmans, J., van der Sluijs, J.P., van Asselt, M.B.A., Janssen, P., Krayer von Krauss, M.P., 2003. Defining uncertainty: a conceptual basis for uncertainty management in model-based decision support. *Integr. Assess.* 4, 5-17.
- Wang, S., Fu, B. J., Gao, G. Y., Yao, X. L., Zhou, J.(2012): Soil moisture and evapotranspiration of different land cover types on the Loess Plateau, China, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 16, 2883–2892.
- Weedon, G.P., Balsamo, G., Bellouin, N., Gomes, S., Best, M.J. and Viterbo, P.(2014): The WFDEI meteorological forcing data set: WATCH Forcing Data methodology applied to ERA-Interim reanalysis data, *Water Resources Research*, 50, 7505-7514, doi:10.1002/2014WR015638.
- Wheeler, T. and Von Braun, J. (2013) : Climate change impacts on global food security, *Science*, 341, 6145, 508-513.
- Wilhelmi, O. V., Hubbard, K. G. and Wilhite, D. A. (2002): Spatial representation of agroclimatology in a study of agricultural drought, *Int. J. Climatol.*, 22, 1399–1414. doi: 10.1002/joc.796.
- Wilhite, D. A. (2000): *Drought: A Global Assessment, I and II*, Nat. Hazards and Disasters Series, Routledge Publishers, London, UK.
- Wilhite, D.A. and M.H. Glantz (1985): Understanding the drought phenomenon: the role of definitions, *Water Int.*, 10, 111-120.
- Williams, M., Richardson, A.D., Reichstein, M., Stoy, P.C., Peylin, P., Verbeeck, H., Carvalhais, N., Jung, M., Hollinger, D.Y., Kattge, K., Leuning, R., Luo, Y., Tomelleri, E., Trudinger, C.M., and Wang, Y.-P. (2009) : Improving land surface models with FLUXNET data, *Biogeosciences*, 6, 1341–1359.
- Wösten J.H.M., Lilly A., Nemes A., Lebas C., 1999. Development and use of a database of hydraulic properties of European soils. *Geoderma*, 90 : 169-185.

Yang, W., Huang, D., Tan, B., Stroeve, J.C., Shabanov, N.V., Knyazikhin, Y., Nemani, R.R. and Myneni, R.B. (2006a). Analysis of leaf area index and fraction of PAR absorbed by vegetation products from the terra MODIS sensor: 2000–2005, *IEEE T. Geosci. Remote*, 44, 7, 1829–1842.

Yevjevich, V. (1967): An objective approach to definitions and investigations of continental hydrologic droughts, *Hydro. Paper No 23*, Colorado State University, Fort Collins, Colorado.

Zeng, X., Dickinson, R.E., Walker, A., Shaikh, M., DeFries, R.S. and Qi, J. (2000) : Derivation and Evaluation of Global 1-km Fractional Vegetation Cover Data for Land Modeling, *J. Of Applied Meteorology*, 39, 826-839.

Zhang, H., and Oweis, T. (1999): Water-yield relations and optimal irrigation scheduling of wheat in the mediterranean region. *Agricultural Water Management* 38:195-211.

Zwieniecki, M. A., Newton, M. (1994) : Root distribution of 12-year-old forests at rocky sites in southwestern Oregon : effects of rock physical properties. *Can. J. For Res.*, 24, 1791-1796.

ANNEXE A. Zoom sur trois départements: Eure et Loir, l'Indre et la Marne.

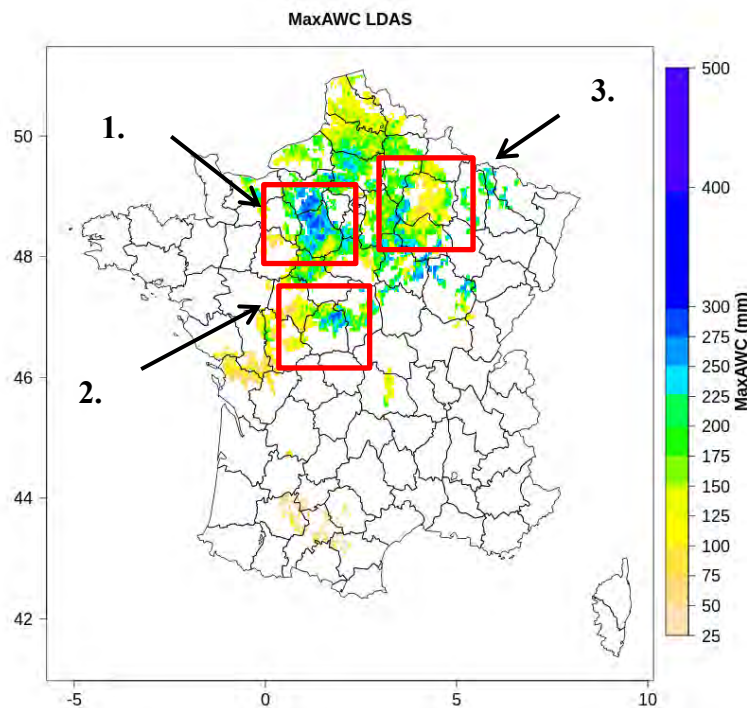


Figure A. 1 Réserves utiles modèle LAI. Régions présentant une variabilité des réserves utiles estimées remarquables : 1. Eure et Loir ; 2. Indre ; 3. Marne et 4. Gers et Haute Garonne

Une étude de comparaison plus détaillée est réalisée pour chacune de ces quatre départements. Ainsi, Les réserves utiles calculées à l'aide des classes de fonctions de pédotransfert d'Al Majou et al. (2008) qui présentent la plus grande proportion de faibles erreurs relatives sont utilisées uniquement. Les réserves utiles Al Majou sont calculées pour la profondeur de sol et auxquelles quatre types de corrections ont été apportés :

- Calcul de la réserve utile sans cailloux et sans prise en compte des remontées capillaires (noté « RUPRS »)
- Calcul de la réserve utile sans cailloux et prise en compte des remontées capillaires (noté « RUPR ») ;
- Calcul de la réserve utile sur la profondeur de sol avec cailloux, cailloux sans réserve d'eau et prise en compte des remontées capillaires (noté « RUPRCX ») ;
- Calcul de la réserve utile sur la profondeur de sol avec cailloux, cailloux avec réserve d'eau et prise en compte des remontée capillaires (noté « RUPRCXH »).

1. Département de l'Eure et Loir

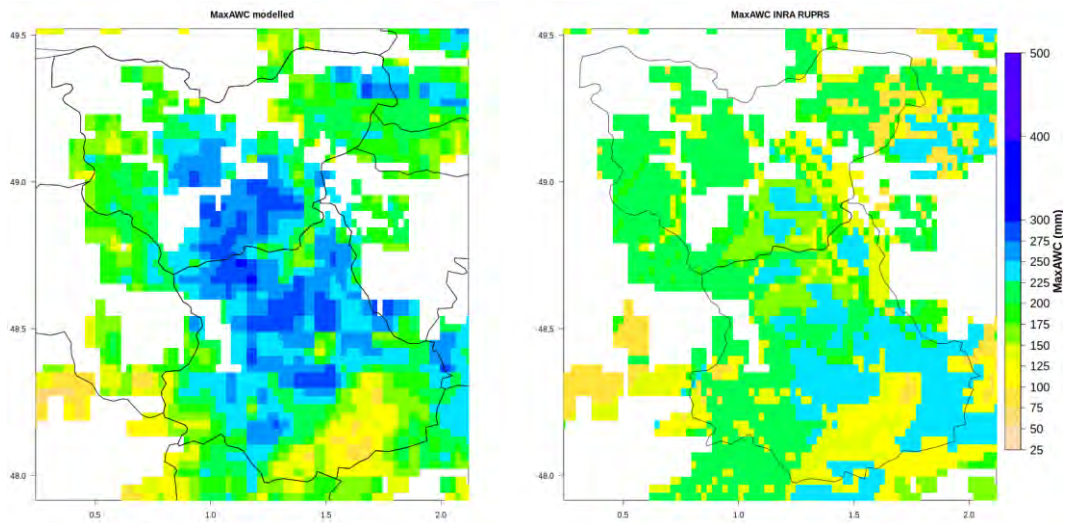


Figure A. 2 Eure et Loir : RU modèle vs RU INRA RUPRS (Réserve Utile de l'UTS calculée sur la profondeur PR sans cailloux, sans prise en compte des remontées capillaires). $R^2 = 0.110$, RMSE = 59.35

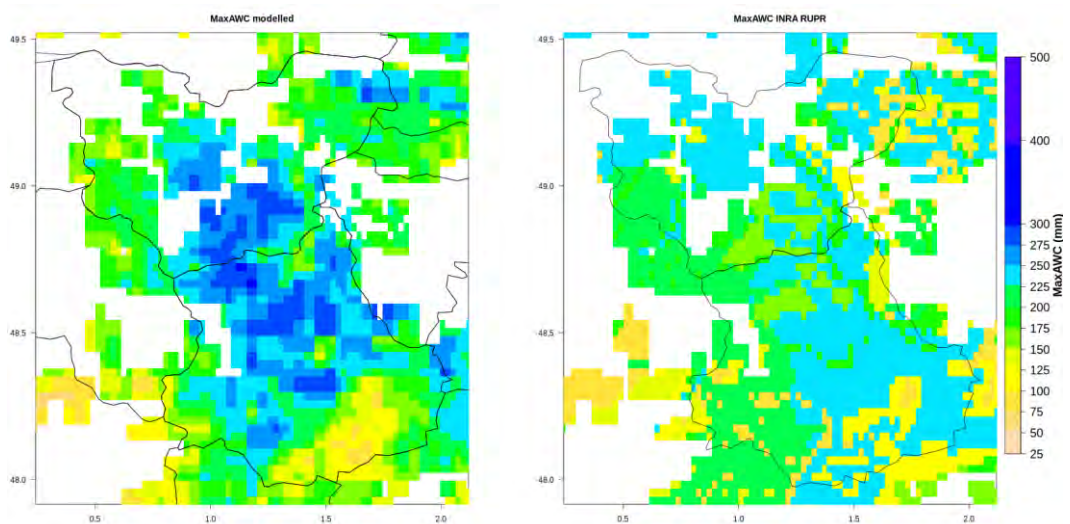


Figure A. 3 Eure et Loir : RU modèle vs RU INRA RUPR (Réserve Utile de l'UTS calculée sur la profondeur du sol sans cailloux, avec prise en compte des remontées capillaires). $R^2 = 0.088$, RMSE = 57.98

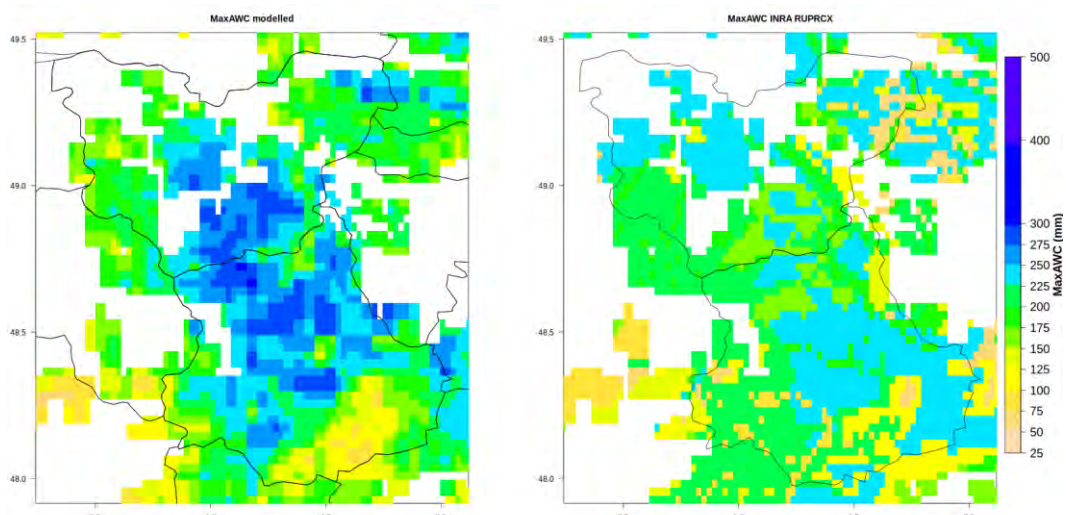


Figure A. 4 Eure et Loir : RU modèle vs RU INRA RUPRCX (Réserve Utile de l'UTS calculée sur la profondeur PR avec cailloux, cailloux sans réserve en eau, avec prise en compte des remontées capillaires). $R^2 = 0.089$, $RMSE = 60.57$

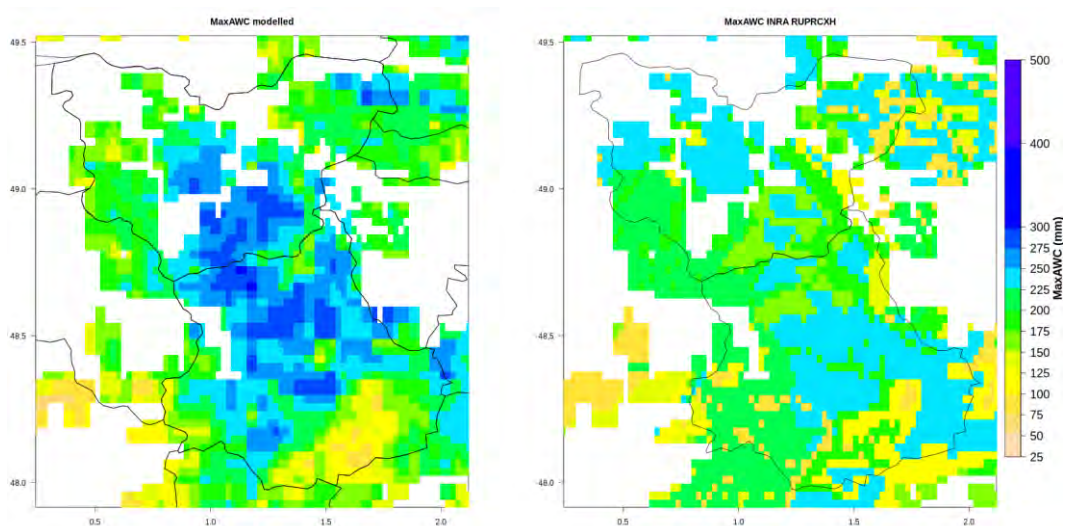


Figure A. 5 Eure et Loir : RU modèle vs RU INRA RUPRCXH (Réserve Utile de l'UTS calculée sur la profondeur PR avec cailloux, cailloux avec réserve en eau, avec prise en compte des remontées capillaires). $R^2 = 0.099$, $RMSE=59.10$

	R^2	R	RMSE (mm)
RUPRS	0.110	0.332	59.35
RUPR	0.088	0.297	57.98
RUPRCX	0.089	0.299	60.57
RUPRCXH	0.099	0.315	59.10

Tableau A-1. Comparaison des scores de la région des départements l'Eure entre les RU modèle LAI et les RU AI Majou selon les différentes corrections

2. Département de l'Indre

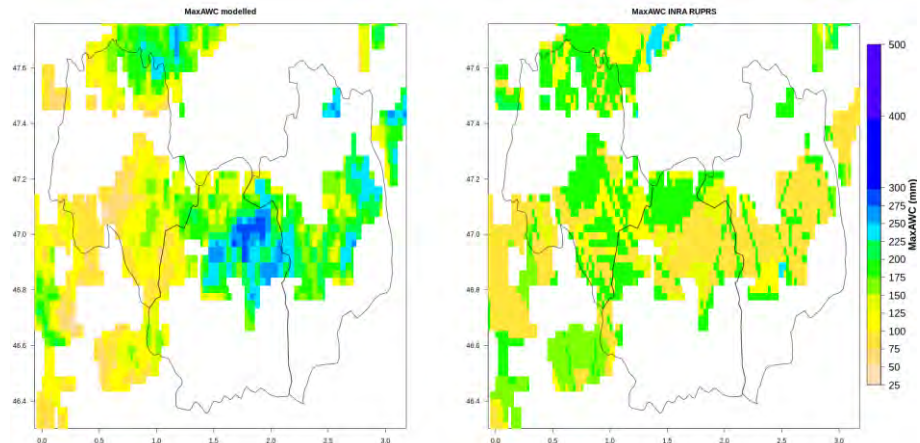


Figure A. 6 Indre : RU modèle vs RU INRA RUPRS (Réserve Utile de l'UTS calculée sur la profondeur PR sans cailloux, sans correctif matériau). $R^2 = 0.052$, RMSE = 82.68 mm

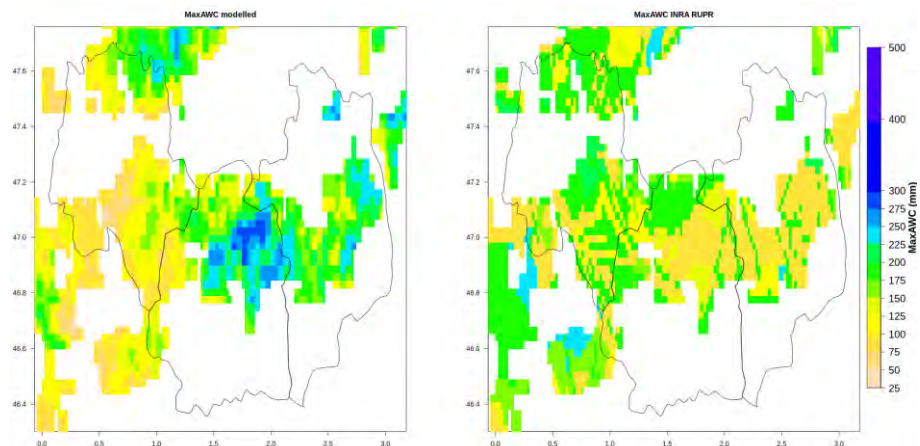


Figure A. 7 Indre : RU modèle vs RU INRA RUPR (Réserve Utile de l'UTS calculée sur la profondeur PR sans cailloux, avec correctif matériau). $R^2 = 0.094$, RMSE = 94.65 mm

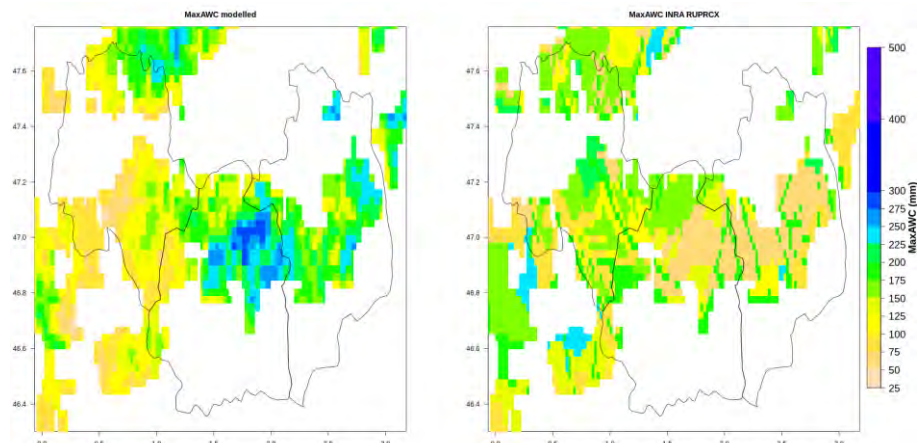


Figure A. 8 Indre : RU modèle vs RU INRA RUPRCX (Réserve Utile de l'UTS calculée sur la profondeur PR avec cailloux, cailloux sans réserve en eau, avec correctif matériau). $R^2 = 0.092$, RMSE = 88.13 mm

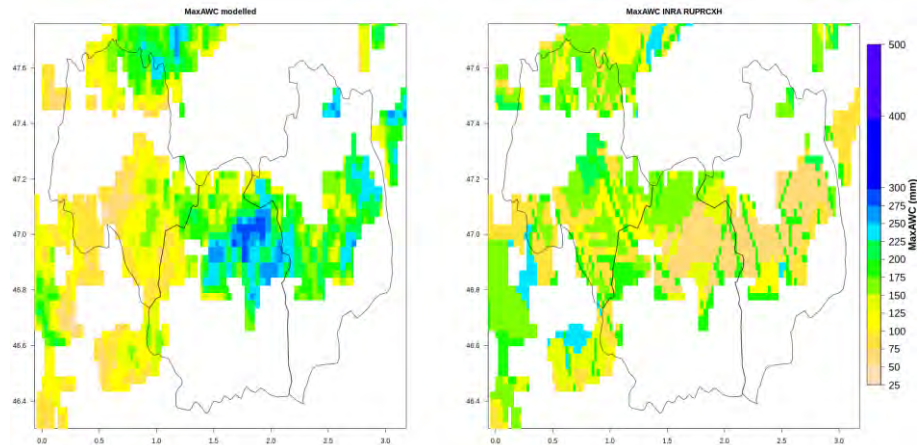


Figure A. 9 Indre : RU modèle vs RU INRA RUPRCXH (Réserve Utile de l'UTS calculée sur la profondeur PR avec cailloux, cailloux avec réserve en eau, avec correctif matériau). $R^2 = 0.088$, RMSE = 85.83 mm

	R^2	R	RMSE (mm)
RUPRS	0.052	- 0.227	82.68
RUPR	0.094	- 0.307	86.79
RUPRCX	0.092	- 0.304	88.13
RUPRCXH	0.088	- 0.297	85.83

Tableau A-2 Comparaison des scores de la région des départements l'Indre entre les RU modèle LAI et les RU AI Majou selon les différentes corrections

3. Département de la Marne

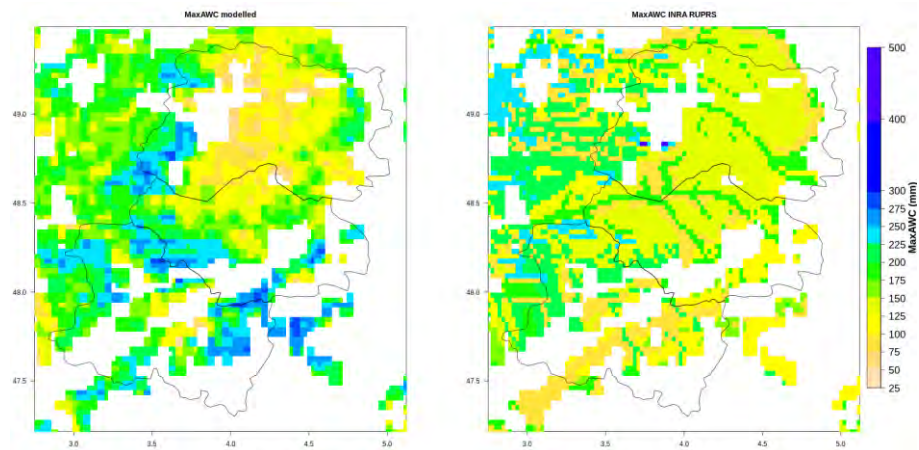


Figure A. 10 Marne : RU modèle vs RU INRA RUPRS (Réserve Utile de l'UTS calculée sur la profondeur PR sans cailloux, sans correctif matériau). $R^2 = 0.003$, RMSE = 72.55 mm

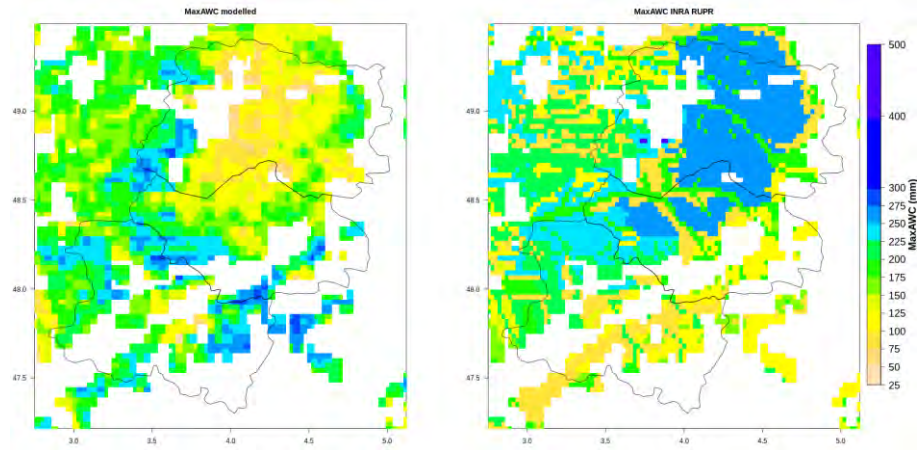


Figure A. 11 Marne : RU modèle vs RU INRA RUPR (Réserve Utile de l'UTS calculée sur la profondeur PR sans cailloux, avec correctif matériau)

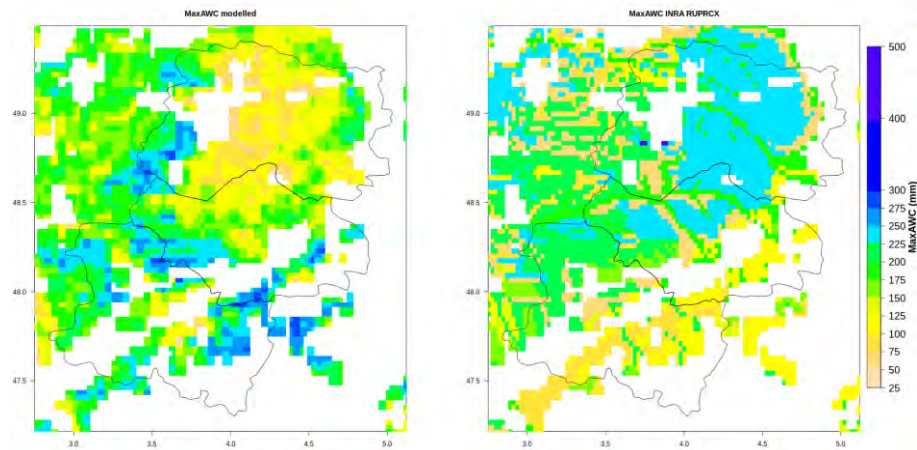


Figure A. 12 Marne : RU modèle vs RU INRA RUPRCX (Réserve Utile de l'UTS calculée sur la profondeur PR avec cailloux, cailloux sans réserve en eau, avec correctif matériau)

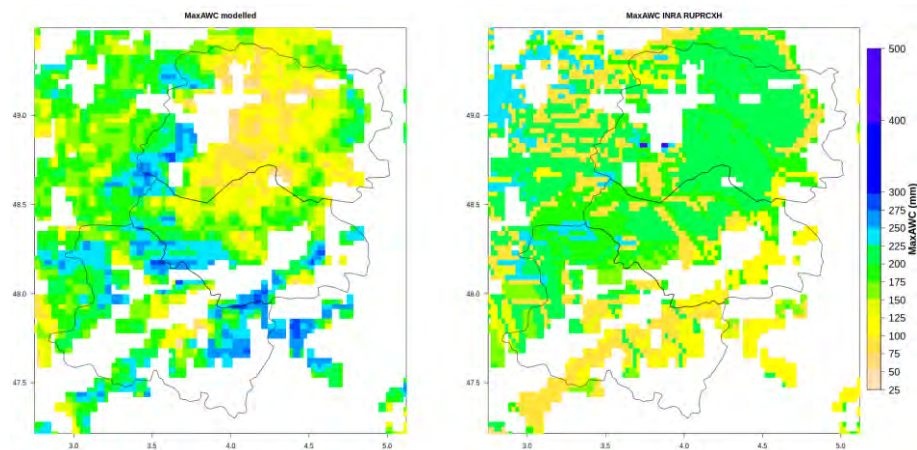


Figure A. 13 Marne : RU modèle vs RU INRA RUPRCXH (Réserve Utile de l'UTS calculée sur la profondeur PR avec cailloux, cailloux avec réserve en eau, avec correctif matériau).

	R ²	R	RMSE (mm)
RUPRS	0.003	0.057	72.55
RUPR	0.088	- 0.297	94.65
RUPRCX	0.082	- 0.286	94.18
RUPRCXH	0.046	- 0.214	82.78

Tableau A-3 Comparaison des scores de la région des départements la Marne entre les RU modèle LAI et les RU AI Majou selon les différentes corrections

ANNEXE B. Application de la méthode à un site instrumenté

1. Présentation du site

Le site expérimental appelé « flux et télédétection » de l'INRA situé à Avignon est dédié au suivi d'une surface cultivée par l'observation de la dynamique des bilans hydriques, radiatifs, énergétiques, des flux de CO₂ et de production de biomasse (LAI et rendement) sur une période de 12 années (2001-2012). Il s'agit d'une parcelle où des cultures d'été (tournesol, maïs et sorgo) et des cultures d'hiver (blé et pois) se succèdent. Ce site a fait l'objet d'une évaluation d'ISBA-A-gs sur la représentation de l'évapotranspiration (ETP) (Garrigues et al., 2015). Cette étude évalue l'influence de paramètres clefs contrôlant l'ET tels que la profondeur racinaire, l'humidité du sol à saturation, le point de flétrissement et la capacité au champ au sein du modèle. La capacité au champ s'est montré être le paramètre impactant le plus les simulations d'évapotranspiration.

Dans ce travail de thèse, les cultures de céréales à paille seulement sont étudiées. J'ai donc utilisé uniquement les observations disponibles pour les six années de blé (2002, 2004, 2006, 2008, 2010 et 2012) dont la série temporelle de LAI mesuré est présentée dans la **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** Deux années présentent un cycle de LAI particulièrement faible : 2008 et 2012.

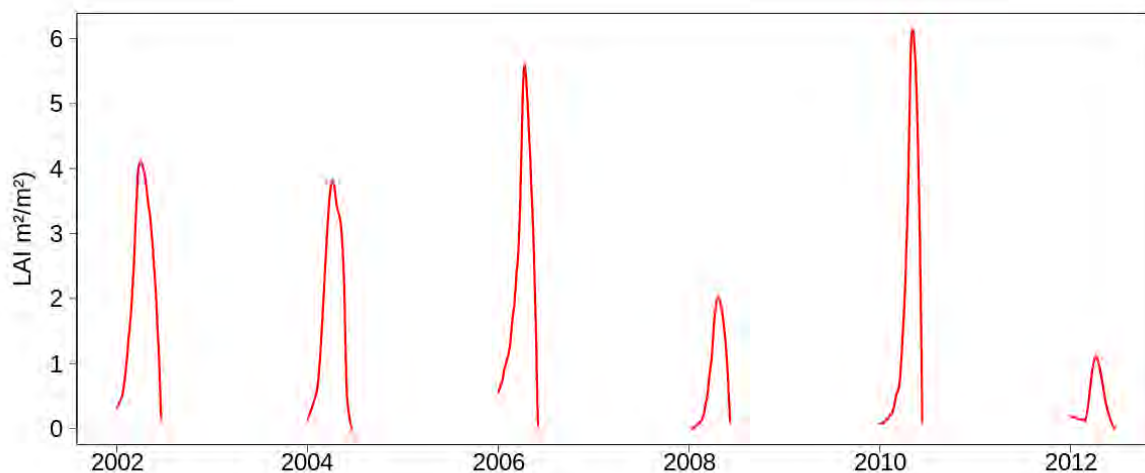


Figure B. 1 Série temporelle de LAI mesuré sur le site d'Avignon

On dispose de mesures de réserve utile et de profondeur racinaire (Garrigues et al. 2015) et sont présentées dans le Tableau B-

	Profondeur racinaire d_r (m)	MaxAWC (mm)
2002	1.55	291
2004	1.65	216
2006	1.85	241
2008	1.00	77
2010	1.75	254
2012	1.50	203
moyenne	1.55	214

Tableau B-1 Mesures d'observations de la profondeur racinaire et de la réserve utile pour le site d'Avignon (Garrigues et al. (2015))

La profondeur racinaire mesurée dans Garrigues et al. (2015), est définie comme étant la profondeur à partir de laquelle on n'observe plus de variation dans le temps d'humidité du sol, en lien avec l'absorption de l'eau par les racines. La moyenne des valeurs de MaxAWC est de 214 mm. Cette valeur est particulièrement élevée par rapport à l'étude effectuée sur l'ensemble de la France dans le Chapitre 4 où la valeur maximale de MaxAWC estimée était de 196 mm pour le département des Yvelines.

La réserve utile (ainsi que la concentration massique en azote des feuilles) par le biais de la profondeur racinaire dans le modèle est optimisée à partir de ces six années en utilisant :

- la méthode de modélisation inverse en minimisant le RMSE pendant la phase de sénescence ;
- et en utilisant le système d'assimilation de données, le LDAS, en minimisant les incréments d'analyse sur cette même période.

La valeur du point de flétrissement utilisée est de $190 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ et la valeur de la capacité au champ est de $280 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, conformément aux valeurs dans Garrigues et al. (2015). Ainsi, 14 valeurs de MaxAWC allant de 47 mm à 312 mm avec un intervalle de 15 mm environ sont testées.

8 valeurs de NI allant de 0.80 % à 2.55 % sont de même testées.

Une étude de sensibilité a été réalisée de manière à confirmer, à fine échelle, les résultats de celle exposée dans l'article du Chapitre IV obtenue pour la France, c'est-à-dire que le paramètre MaxAWC impacte la variabilité interannuelle du LAI tandis que le NL impacte la valeur maximale du LAI simulé.

2. Etude de sensibilité de MaxAWC et de N_L

Suivant le même protocole exposé dans l'article du Chapitre 4, j'ai réalisé une étude de sensibilité des paramètres MaxAWC et N_L sur le coefficient de variation (CV %) des valeurs annuelles maximales de LAI et de la moyenne des valeurs annuelles maximales de LAI, simulés ISBA-A-gs. La Figure B. 2 Etude de sensibilité des paramètres MaxAWC et NI sur le coefficient de variation du LAI max simulé (variabilité interannuelle) et sur la valeur annuelle moyenne maximale du LAI

présente ces résultats. C'est bien la réserve utile qui influence particulièrement la variabilité interannuelle du cycle de la végétation, et la concentration en azote massique des feuilles qui impacte nettement les valeurs de LAI maximales, conformément aux résultats présentés dans l'article du Chapitre 4.

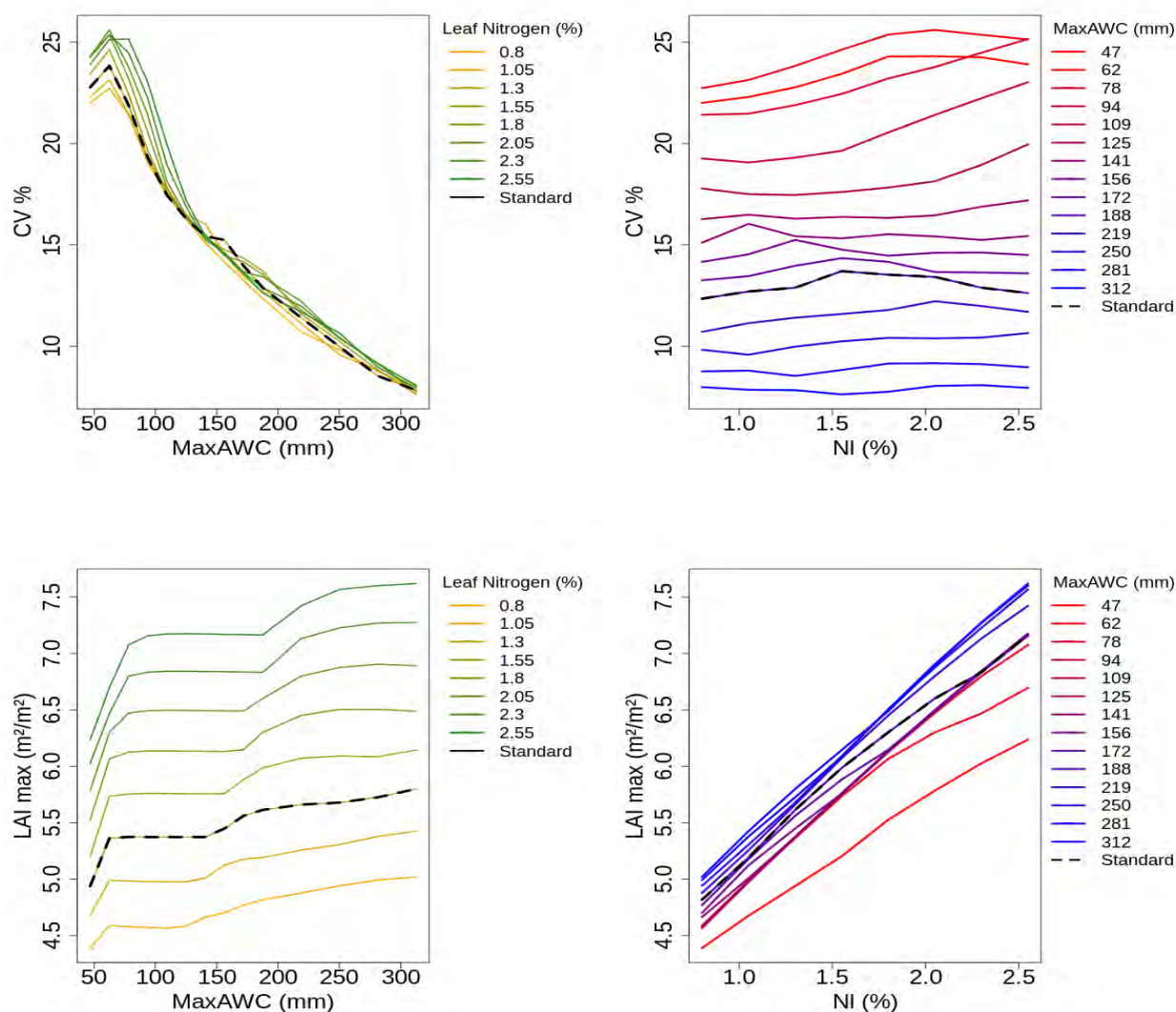


Figure B. 2 Etude de sensibilité des paramètres MaxAWC et NI sur le coefficient de variation du LAI max simulé (variabilité interannuelle) et sur la valeur annuelle moyenne maximale du LAI

Pour la méthode de modélisation inverse, les valeurs optimales de MaxAWC et NI sont obtenues grâce à la minimisation du RMSE. Pour la méthode LDAS, la valeur optimale de MaxAWC est obtenue en minimisant la médiane des incréments d'analyse. Chaque fonction coûts (RMSE et médiane des incréments d'analyse), présentée dans la Figure B. 3 Fonctions coûts pour le site d'Avignon pour la méthode de modélisation inverse (a) et la méthode LDAS (b) pour la période croissance de la plante (1^{er} mars jusqu'au pic de LAI observé) (en rouge) ; la période de développement maximale de la plante (période pour laquelle toutes les valeurs de LAI observé > à 50% de la valeur maximale annuelle du LAI observé) (en vert) ; la période de sénescence (du pic de LAI observé au 31 juillet) (en noir).

, a été calculée selon trois périodes :

- Période croissance de la plante (1^{er} mars jusqu'au pic de LAI observé) (en rouge) ;
- Période de développement maximale de la plante (période pour laquelle toutes les valeurs de LAI observé sont supérieures à 50% de la valeur maximale annuelle du LAI observé) (en vert) ;
- Période de sénescence (du pic de LAI observé au 31 juillet) (en noir).

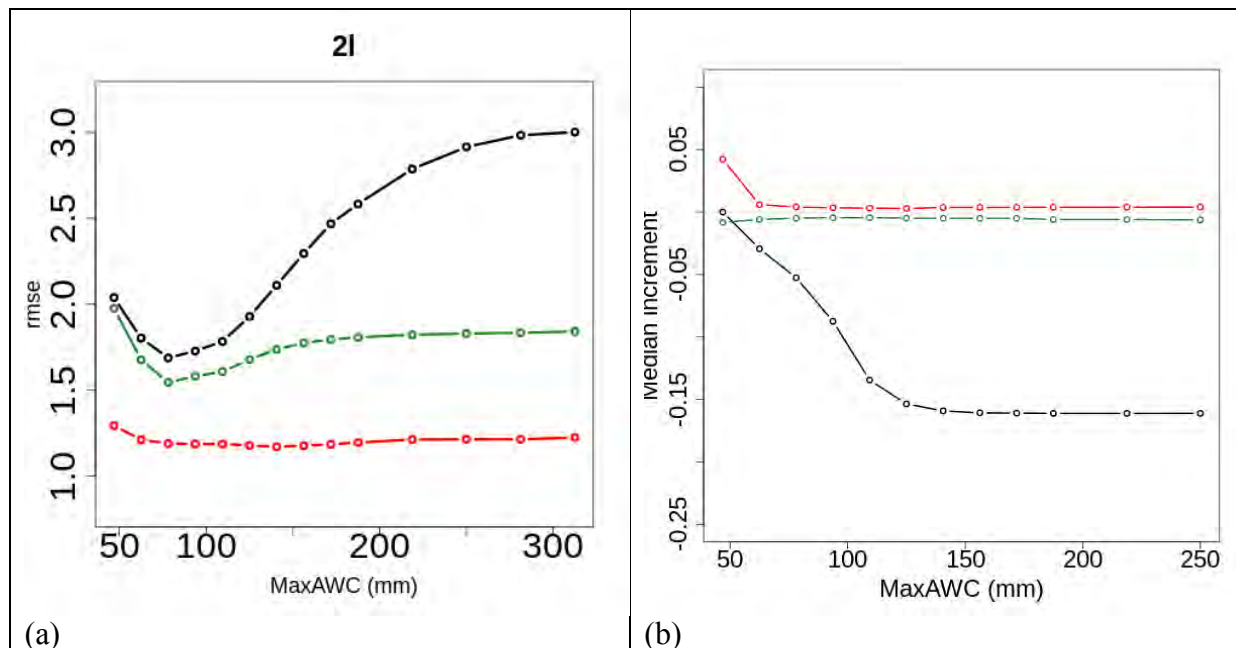


Figure B.3 Fonctions coûts pour le site d'Avignon pour la méthode de modélisation inverse (a) et la méthode LDAS (b) pour la période croissance de la plante (1^{er} mars jusqu'au pic de LAI observé) (en rouge) ; la période de développement maximale de la plante (période pour laquelle toutes les valeurs de LAI observé > à 50% de la valeur maximale annuelle du LAI observé) (en vert) ; la période de sénescence (du pic de LAI observé au 31 juillet) (en noir).

- **Les fonctions coûts sont-elles cohérentes avec celle obtenue dans l'étude sur la France ?**

Les fonctions coûts obtenues avec la méthode de modélisation inverse sont cohérentes avec celles obtenues dans le Chapitre 4, c'est-à-dire que la période la plus déterminante pour MaxAWC est la période de sénescence. La minimisation du RMSE est atteinte pour une valeur de MaxAWC de 78 mm.

Les fonctions coûts obtenues avec la méthode LDAS sont différentes de celles obtenues dans le Chapitre 4. La période la plus déterminante pour la méthode LDAS semble être aussi la période de sénescence. Cependant, la gamme des valeurs de MaxAWC ne permet pas d'obtenir des valeurs de médiane des incréments positives et négatives. En effet, celles-ci sont toutes négatives. Ceci induit, selon cette méthode, que pendant la période de sénescence, le modèle surestime systématiquement les valeurs de LAI, amenant à des valeurs d'incréments négatifs. La réserve utile optimale est ici très faible (47 mm).

Les deux méthodes utilisées pour estimer la réserve utile ne convergent pas comme les résultats de l'article du chapitre 4 le montraient. La valeur de MaxAWC estimée par la méthode de modélisation inverse semble être plus réaliste d'après Garrigues et al. (2015) mais encore très sous-estimée (Tableau B-).

3. L'optimisation année par année est-elle nécessaire ?

J'ai aussi regardé l'apport d'appliquer la méthode année par année sur l'estimation de la réserve utile par les deux méthodes. Garrigues et al. (2015) ont montré un faible impact de

la représentation de la variabilité interannuelle de la profondeur racinaire et des paramètres du sol comme le point de flétrissement et la capacité au champ sur l'évapotranspiration simulée.

Le Tableau B- résume les résultats pour la méthode de modélisation inverse (noté « MI » dans le tableau). Le Tableau B- résume ceux de la méthode LDAS (noté LDAS dans le tableau). Les résultats sont présentés de la même façon pour chacun des tableaux : la première partie des tableaux concernent les paramètres optimisés pour chaque année (noté avec le signe (*)), pour la période des six années et en version standard ; la seconde partie des tableaux présentent le RMSE calculée sur la période ou la valeur du LAI observé est supérieur à 50% du LAI_{max} ; la troisième partie des tableaux présentent le RMSE calculé sur la période mai à juillet sur l'ET cumulée, simulée avec les paramètres optimisés par année, sur toute la période et avec les paramètres standards ; la dernière partie du tableau montrent les biomasses maximales simulées avec les paramètres optimisés par année, sur toute la période et avec les paramètres standards.

		2002	2004	2006	2008	2010	2012	Médiane ± écart-type
MaxAWC (mm)	IM(*)	78	78	188	47	94	47	88 ± 52
	IM	78	78	78	78	78	78	78 ± 0
	ISBA std	132	132	132	132	132	132	132 ± 0
NI (%)	IM(*)	1.55	2.30	2.55	0.80	2.55	0.80	1.92 ± 0.83
	IM	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80 ± 0
	ISBA std	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3 ± 0
Rmse LAI (m ² m ⁻²)	IM(*)	1.07	1.14	1.31	1.12	0.76	1.16	1.13 ± 0.18
	IM	1.56	1.82	2.85	1.11	2.48	1.16	1.70 ± 0.71
	ISBA std	1.58	1.63	2.20	1.57	1.90	1.60	1.61 ± 0.25
Rmse ETP cumulé (mm)	IM(*)	46	30	6	44	14	5	22 ± 18
	IM	53	36	26	44	7	5	31 ± 20
	ISBA std	35	25	17	40	7	4	21 ± 15
Biomasse max (kg m ⁻²)	IM(*)	0.60	0.40	0.69	1.00	0.79	0.58	0.65 ± 0.20
	IM	0.74	0.58	0.38	1.08	0.73	0.72	0.73 ± 0.23
	ISBA std	1.2	0.81	0.71	1.16	1.00	1.06	1.03 ± 0.20
Biomasse sèche max mesurée (kg m ⁻²)		1.43	1.76	1.53	1.06	1.59	1.04	1.48 ± 0.29

Tableau B-2 Résumé des résultats pour la méthode de modélisation inverse (MI). Les résultats avec une (*) sont les résultats obtenus lorsque l'on applique la méthode année par année. Le RMSE LAI est calculée sur la période pour laquelle la valeur du LAI > 50 % du LAI max ; le RMSE ETP

		2002	2004	2006	2008	2010	2012	Médiane ± écart-type
MaxAWC (mm)	LDAS (*)	47	47	47	172	94	156	70.5 ± 57
	LDAS	47	47	47	47	47	47	47 ± 0
	LDAS std	132	132	132	132	132	132	132 ± 0
Rmse LAI (m ² m ⁻²)	LDAS (*)	0.40	0.30	1.07	0.98	1.97	0.75	0.86 ± 0.60
	LDAS	0.41	0.30	1.07	0.97	2.11	0.75	0.86 ± 0.65
	LDAS std	0.48	0.52	0.85	0.98	1.74	0.75	0.80 ± 0.46
Rmse ETP cumulé (mm)	LDAS (*)	63	30	26	33	4	6	28 ± 21
	LDAS	63	30	25	33	15	7	27.5 ± 20
	LDAS std	34	14	10	33	3	6	12 ± 13.5
Biomasse max (kg m ⁻²)	LDAS (*)	0.85	0.68	0.71	0.30	1.22	0.11	0.70 ± 0.40
	LDAS	0.85	0.68	0.71	0.37	1.24	0.13	0.70 ± 0.38
	LDAS std	0.82	0.73	1.10	0.30	1.22	0.11	0.80 ± 0.44
Biomasse sèche mesurée (kg m ⁻²)		1.43	1.76	1.53	1.06	1.59	1.04	1.48 ± 0.30

Tableau B-3 Résumé des résultats méthode LDAS. Les résultats avec une (*) sont les résultats obtenus lorsque l'on applique la méthode année par année

4.1 Impact sur la réserve utile optimisée

Optimiser les paramètres année par année permet d'obtenir une valeur médiane de MaxAWC supérieure à celle que l'on obtient en considérant la totalité de la période. Celle-ci est de 88 mm (78 mm) pour la méthode de modélisation inverse et de 70.5 mm (47 mm) pour la méthode LDAS en optimisant année par année (en optimisant pour la totalité de la période). Ces valeurs sont très faibles comparées à celles mesurées sur le site dont la médiane présente une valeur de réserve utile de 214 mm (Tableau B-).

4.2 Impact sur le RMSE entre le LAI simulé/observé

L'optimisation par année améliore sensiblement le RMSE entre le LAI simulé par la méthode de modélisation inverse. En effet, la valeur médiane sur les six années considérées du RMSE est de 1.13 m² m⁻² alors que celui-ci est de 1.70 m² m⁻² lorsque l'optimisation est effectuée sur la totalité de la période.

Pour la méthode LDAS, il n'y a pas d'impact de l'optimisation année par année sur le RMSE calculé pour le LAI simulé/observé. Pour les deux cas, la valeur médiane des six années de celui-ci est de 0.86 m² m⁻².

Conformément aux résultats du chapitre 4, la méthode LDAS permet d'améliorer la représentation du cycle de la végétation, en améliorant la représentation des années particulières telles que 2008 et 2012.

4.3 Impact sur le RMSE entre l'ETP simulée/observée

Des données d'observations de l'évapotranspiration sont disponibles pour ce site. L'impact de l'optimisation sur cette variable a donc été étudié. Le RMSE entre l'ETP cumulée simulée et l'ETP cumulée observée est calculée sur une période de mai à juillet.

La méthode de modélisation inverse montre que l'optimisation année par année améliore la représentation de l'ETP (RMSE = 22 mm) par rapport à une optimisation considérant la totalité de la période (RMSE = 32 mm). Mais l'optimisation de la réserve utile n'améliore pas les performances de ISBA par rapport à sa version standard (RMSE standard = 21 mm)

En revanche, peu de différence est observée sur les résultats entre l'optimisation année par année et l'optimisation sur la totalité des six années pour la méthode LDAS. De plus, l'optimisation de la réserve utile, dans le cas de la méthode LDAS, ne permet pas d'améliorer la valeur de RMSE par rapport à la version standard dont la valeur est déjà faible (RMSE = 12 mm).

4.4 Impact sur la biomasse

Enfin, les valeurs de biomasse sont nettement sous estimées par les deux méthodes, particulièrement pour la méthode LDAS.

Les anomalies standardisées des biomasses maximales simulées par les deux approches sont confrontées aux anomalies standardisées de la biomasse sèche mesurée pour les six années de blé. Une corrélation significative est uniquement obtenue avec la méthode LDAS.

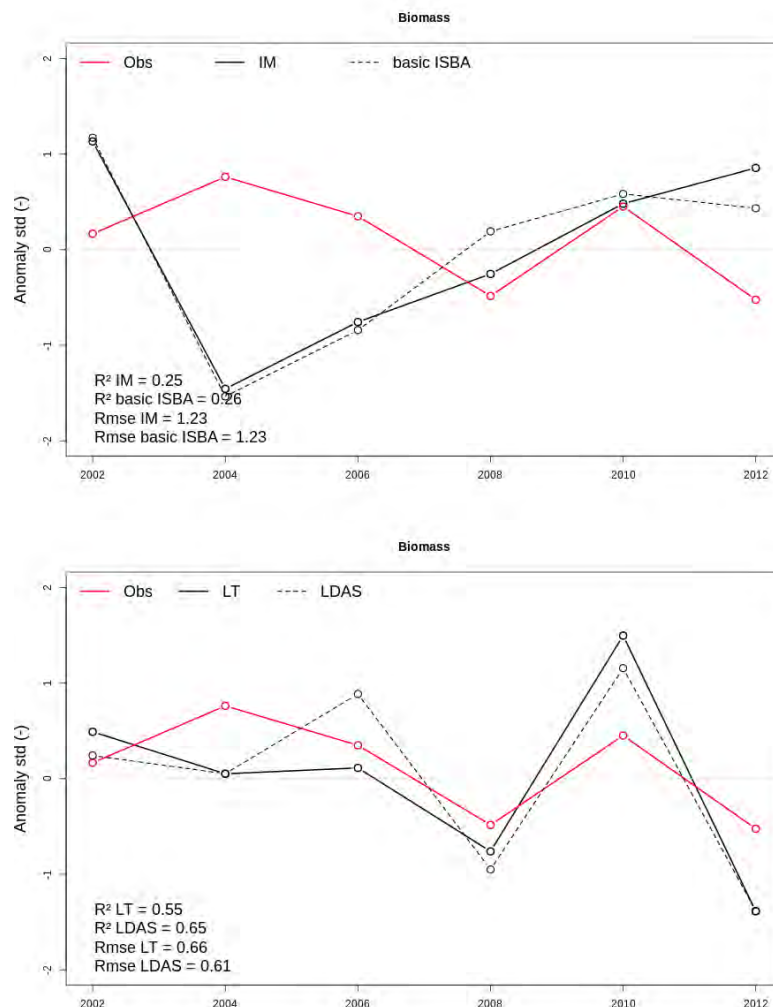


Figure B. 4 Comparaison des anomalies de biomasses simulées (courbes noires) et observées (courbes rouges) pour les années 2002-2004-2006-2008-2010-2012 sur le site d'Avignon

4. Discussion

L'application de la méthode développée sur la France dans le chapitre 4, à un site hyper instrumenté est analysée. De nombreuses observations sont disponibles telles que des mesures de biomasse sèche, de LAI, d'évapotranspiration... Garrigues et al. (2015) ont montré qu'une mauvaise estimation des caractéristiques du sol (l'humidité du sol à saturation, la capacité au champ, le point de flétrissement) avait un impact considérable sur la représentation de l'ETP dans le modèle ISBA. En effet, une surestimation du point de flétrissement amène à une sous-estimation de la réserve utile et donc une sous-estimation de l'ETP du modèle par exemple.

L'optimisation de la réserve utile dans notre méthode, est réalisée via la profondeur racinaire. Les valeurs de capacité au champ et du point de flétrissement utilisées sont celles utilisés dans l'article de Garrigues et al. (2015).

Seulement six années de blé disponibles peuvent être exploitées dans notre cas d'étude qui se concentre sur la restitution de la réserve utile pour les céréales à paille. De plus, les années 2008 et 2012 sont des années particulières où la valeur maximale du LAI est extrêmement faible. Le trop faible nombre d'années considérées pour effectuer une optimisation de la réserve utile pourrait expliquer le fait que la méthode LDAS ne fonctionne pas.

D'autre part, la capacité au champ n'est pas toujours atteinte en sortie d'hiver d'après les simulations du LDAS, ce qui pourrait aussi expliquer le fait que la méthode ne fonctionne pas pour ce site (Figure B. 5). En effet la capacité au champ n'est atteinte que pour l'année 2002 et 2010.

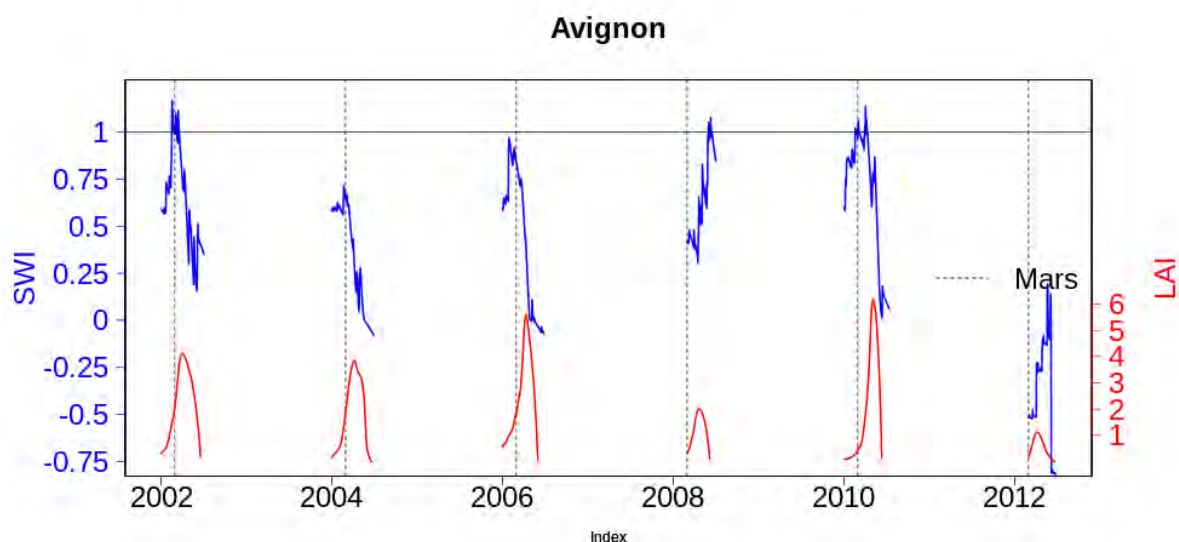


Figure B. 5 Série temporelle du SWI simulée avec la réserve utile optimisée (bleu) et du LAI observé (rouge) pour les années 2002, 2004, 2006, 2008, 2010 et 2012 pour le site d'Avignon

Les observations de LAI sont des interpolations faites à partir de quelques observations utilisant une relation entre le LAI et la somme en degré jour (Duveiller et al., 2011). Le cycle de la végétation semble être avancé par rapport à ce qu'il a été observé dans

le Chapitre 4. En effet, la valeur maximale de LAI est atteinte généralement en avril, alors que celui-ci était généralement atteint au mois de mai ou de juin dans les séries temporelles de LAI sur la France. Ceci est dû au climat méditerranéen où les températures plus élevées au printemps permettent l'émergence plus précoce de la culture. Une adaptation par rapport à la date d'émergence a été réalisée sans incidence majeure sur les résultats présentés ci-dessus.

A l'échelle de la parcelle, de nombreux processus biophysiques non représentés dans le modèle interviennent et peuvent impacter la végétation et donc la production de biomasse. Le LDAS ne serait pas adapté à de telles résolutions. L'impact d'une description du sol plus détaillée devrait être investiguée dans ce cas.

ANNEXE C. ISBA-A-gs

1. Le modèle de photosynthèse dans ISBA-A-gs

Les bases du modèle A-g_s sont décrites par Jacobs (1994) et Jacobs et al., 1996. D'autres détails de la formulation actuelle sont donnés dans Calvet et al., 1998, 2004. Pour la description de la conductance de la canopée au CO₂, une approche par étapes est suivie avec: (i) la définition des paramètres dépendants de la température, (ii) la réponse de rayonnement, (iii) le calcul du rapport entre concentration de CO₂ interne et externe, (iv) le calcul de la conductance stomatique, (v) l'inclusion de la réponse d'humidité du sol et (vi) l'intégration verticale sur la canopée.

1.1 Réponse à la température

Il y a plusieurs paramètres dans le modèle qui dépendent de la température, à savoir le point de compensation Γ , la conductance du mésophylle g_m et la capacité photosynthétique maximale. Le point de compensation est défini comme la concentration de CO₂ à laquelle l'assimilation nette de CO₂ d'une feuille entièrement éclairée est nulle. La conductance du mésophylle g_m décrit le transport du CO₂ des cavités sub-stomatiques vers les cellules du mésophylle où le dioxyde de carbone est fixé. Cela comprend la représentation des processus physiques et chimiques. La capacité photosynthétique maximale $A_{m,max}$ est spécifiée en tant que limite supérieure absolue du taux de photosynthèse en plein soleil et en concentration de CO₂ non limitée.

La dépendance à la température est décrite avec des fonctions en Q_{10} , où Q_{10} représente l'augmentation proportionnelle d'un paramètre pour une augmentation de température de 10 °C (Berry et Raison, 1981). Pour le point de compensation Γ , la formulation est :

$$\Gamma(T_s) = \Gamma(25^\circ) Q_{10\Gamma}^{(T_s - 25)/10} \quad (C1)$$

Où $\Gamma(25^\circ)$ est le point de compensation à 25° C, $Q_{10\Gamma}$ est la constante Q_{10} et T_s est la température de surface de la feuille. Pour g_m et $A_{m,max}$, la dépendance à la température est ajustée de façon plus complexe en utilisant les fonctions d'inhibitions définies par Collatz et al., 1992 :

$$g_m(T_s) = \frac{g_m(25^\circ) Q_{10gm}^{(T_s - 25)/10}}{(1 + e^{0.3(T_{1gm} - T_s)})(1 + e^{0.3(T_s - T_{2gm})})} \quad (C2)$$

$$A_{m,max}(T_s) = \frac{A_{m,max}(25^\circ) Q_{10Am,max}^{(T_s - 25)/10}}{(1 + e^{0.3(T_{1am,max} - T_s)})(1 + e^{0.3(T_s - T_{2am,max})})} \quad (C3)$$

où $Q_{10g_m}, Q_{10A_m, \max}, T_{1g_m}, T_{2g_m}, T_{1A_m, \max}, T_{2A_m, \max}$ sont des constantes affectant la sensibilité à la température de surface de la plante, T_s . Le paramètre $g_m(25^\circ)$ dépend du stress hydrique du sol. Sa valeur en conditions non stressées $g_m^*(25^\circ\text{C})$ est optimisée à l'aide d'observations.

1.2 Réponse au rayonnement et au CO₂

Pour A_n , deux régimes sont distingués : rayonnement limitant et CO₂ limitant (Goudriaan et al., 1985; Jacobs, 1994). Dans un régime de rayonnement limitant et de CO₂ non-limitant, A_n est contrôlée par la quantité de rayonnement photosynthétiquement actif (PAR) I_a :

$$A_n = \varepsilon I_a - R_d \quad (\text{C4})$$

où R_d est la respiration à l'obscurité et où ε est l'efficacité quantique exprimée comme :

$$\varepsilon = \varepsilon_o \frac{C_s - \Gamma}{C_s + 2\Gamma} \quad (\text{C5})$$

Le paramètre ε_o est l'efficacité quantique maximale et C_s est la concentration de CO₂ ambiante à la surface de la feuille. À des intensités de rayonnement élevées, l'assimilation nette sature à un niveau A_m et devient limitée par le CO₂ selon $A_m = (C_i - \Gamma)g_m$ avec C_i la concentration en CO₂ dans les cavités des feuilles. Une limite absolue pour tenir compte de la capacité photosynthétique maximale des feuilles est appliquée comme suit :

$$A_m = A_{m, \max} \left[1 - \exp \left\{ -g_m (C_i - \Gamma) / A_{m, \max} \right\} \right]. \quad (\text{C6})$$

Les deux régimes de rayonnement limitant et de CO₂ limitant sont combinés via une fonction de transition exponentielle :

$$A_n = (A_m + R_d) \left[1 - \exp \left(\frac{-\varepsilon I_a}{A_m + R_d} \right) \right] - R_d. \quad (\text{C7})$$

La respiration autotrophe à l'obscurité est paramétrée simplement selon Jacobs (1994) et inclut la respiration foliaire seulement

$$R_d = A_m / 9 \quad (\text{C8})$$

1.3 Le rapport C_i/C_s

La concentration de CO₂ à l'intérieur des cavités foliaires doit être connue afin de dériver la conductance stomatique de l'assimilation nette. Les observations indiquent que le rapport C_i / C_s est une quantité plutôt stable en conditions atmosphériques humides. Par

contre, l'augmentation du déficit d'humidité déclenche un fort contrôle stomatique qui affecte ce rapport. Par conséquent, il est exprimé en fonction du déficit de saturation entre la feuille et l'air, D_s , exprimé en unités d'humidité spécifique de l'air.

$$\frac{C_i}{C_s} = f + (1 - f) \frac{\Gamma}{C_s}, \quad (C9)$$

Où f est le facteur de couplage défini par:

$$f = f_o \left(1 - \frac{D_s}{D_{\max}} \right) + f_{\min} \frac{D_s}{D_{\max}}, \quad (C10)$$

et f_o est la valeur de f pour $D_s = 0 \text{ kg/kg}$, D_{\max} est le déficit de saturation maximale et

$$f_{\min} = \frac{g_{cu}}{g_{cu} + g_m}. \quad (C11)$$

Le transport du CO_2 est maintenu dans la situation où $f = f_{\min}$ à travers la cuticule des feuilles ou à cause de la fermeture imparfaite des stomates. Ce processus est représenté par la conductance g_{cu} .

1.4 La conductance stomatique

Le premier calcul de la conductance stomatique pour le CO_2 , g_{sc}^1 est obtenu en divisant l'assimilation nette par la différence entre la concentration de CO_2 dans et à l'extérieur des feuilles. Il est modifié ici pour tenir compte des cas limites d'air très sec et de l'obscurité :

$$g_{sc}^1 = \frac{A_n - A_{\min} \left(\frac{D_s}{D_{\max}} \frac{A_n + R_d}{A_m + R_d} \right) + R_d \left(1 - \frac{A_n + R_d}{A_m + R_d} \right)}{C_s - C_i} \quad (C12)$$

Où A_{\min} représente le taux de photosynthèse résiduelle (à pleine intensité lumineuse) associé aux transferts cuticulaires lorsque les stomates sont fermés en raison d'un fort déficit d'humidité spécifique :

$$A_{\min} = g_m (C_{\min} - \Gamma) \quad (C13)$$

Dans cette équation, C_{\min} est la valeur de C_i au maximum de déficit d'humidité spécifique :

$$C_{\min} = \frac{g_{cu} C_s + g_m \Gamma}{g_{cu} + g_m}. \quad (C14)$$

La diffusion du CO_2 à travers les ouvertures stomatiques interagit avec celle de la vapeur d'eau et donc la conductance stomatique en CO_2 est corrigée pour cette interaction par:

$$g_{sc} = g_{sc}^1 + E \frac{M_a}{\rho_a M_v} \frac{C_s + C_i}{2(C_s - C_i)} \quad (C15)$$

Où M_v et M_a sont les masses moléculaires de la vapeur d'eau et de l'air respectivement, ρ_a est la densité de l'air et E est la transpiration des feuilles basée sur l'estimation précédente de la conductance stomatique :

:

$$E = (1.6 g_{sc}^{-1}) D_s \rho_a \quad (C16)$$

Finalement, la conductance stomatique à la vapeur d'eau g_s est donnée par :

$$g_s = 1.6 g_{sc} \quad (C17)$$

La conductance totale utilisée dans le schéma de transpiration est $g_s + g_{cu}$, où g_{cu} est la conductance cuticulaire, qui dépend du type de végétation.

1.5 Réponse au stress hydrique du sol

Parmi d'autres formulations A-gs possibles pour lesquelles la réponse au stress hydrique du sol est directement appliquée à l'assimilation brute, A_g (Ronda et al., 2001) ou à l'assimilation nette (Sala et Tenhunen, 1996), Calvet (2000) a proposé une réponse au stress hydrique du sol plus complexe, fondée sur la conductance du mésophylle, g_m , le déficit d'humidité spécifique maximum toléré par la végétation, D_{max} , et le rapport C_i / C_s contrôlé par f . La réponse de l'humidité du sol se comporte différemment pour la végétation haute et pour la végétation basse.

Pour la végétation basse, Calvet (2000) a montré que la conductance du mésophylle g_m et le déficit maximal de saturation feuille-air D_{max} varient avec l'humidité du sol, mais qu'ils restent corrélés en conditions de stress hydrique modéré selon :

$$\ln(g_m(25^\circ)) = a - b \ln(D_{max}) \quad (C18)$$

Par conséquent, cette équation est utilisée pour dériver D_{max}^* (déficit de saturation maximal sans stress hydrique du sol) à partir de $g_m^*(25^\circ)$, où l'exposant * indique des conditions optimales d'humidité du sol et a et b sont des coefficients empiriques.

La Figure C1 montre les réponses des plantes herbacées C3 au stress hydrique du sol comme représenté dans le modèle ISBA-A-gs, à travers la relation entre $g_m(25^\circ)$ et D_{max} (Calvet, 2000): évitement de la sécheresse et tolérance à la sécheresse (flèches rouges et bleues, respectivement). Les valeurs g_m et D_{max} dans des conditions de stress hydrique sont déterminées par l'indice de stress FS, dont la valeur dépend de l'humidité du sol (FS = 0 au point de flétrissement, et FS = 1 à la capacité au champ). Pour un stress modéré (FS > FSC), l'évolution de D_{max} de sa valeur non contrainte vers sa valeur minimale (0,03 kg kg⁻¹) ou maximale (0,30 kg kg⁻¹) (évitement de la sécheresse et tolérance à la sécheresse, respectivement), est proportionnel à FS. Pour les herbacées en C3, la valeur de g_m est déterminée par D_{max} à travers l'équation logarithmique mentionnée ci-dessus (ligne pleine):

$$\ln(g_m) = 2.381 - 0.6103 \times \ln(D_{max}), \text{ avec } g_m \text{ et } D_{max} \text{ en mm s}^{-1} \text{ et g kg}^{-1}, \text{ respectivement.}$$

Pour un stress hydrique du sol plus prononcé ($F_S < F_{SC}$), soit g_m soit D_{max} (pour les cas d'évitement et de tolérance à la sécheresse, respectivement), diminue de sa valeur à $F_S = F_{SC}$ à sa valeur minimale, de façon proportionnelle à F_S . A titre d'exemple dans la Figure C1, des valeurs F_{SC} et g_m non contraintes égales à 0,3 et 1 mm s⁻¹ sont utilisées. De plus amples détails sur la paramétrisation des effets du stress hydrique sur la photosynthèse peuvent être trouvés dans Calvet et al. [2000 et 2004].

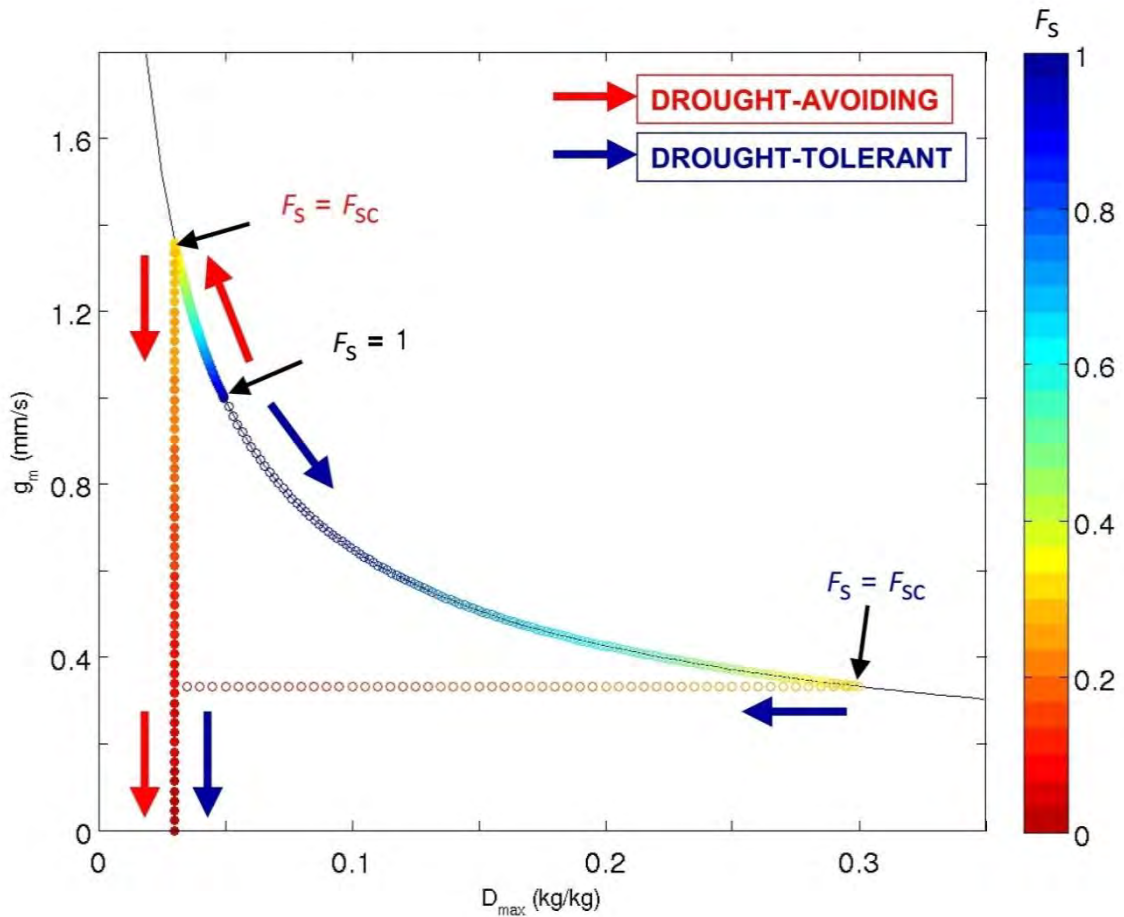


Figure C1 - Réponse des herbacées en C3 au stress hydrique dans ISBA-A-gs : évitement de la sécheresse ("drought-avoiding") ou tolérance à la sécheresse ("drought-tolerant"). D'après Canal et al. (2014).

1.6 Intégration verticale de la feuille à la canopée

L'assimilation nette de CO₂ calculée à l'échelle foliaire est intégrée à l'échelle de la canopée en supposant que (a) les paramètres foliaires ne varient pas avec la hauteur dans la canopée, et que (b) l'atténuation du rayonnement solaire entrant dans la canopée peut être calculée à l'aide d'un modèle de transfert radiatif simple. L'approche proposée par Carrer et al. (2013) est utilisée.

2. La phénologie dans ISBA-A-gs

Les feuilles sont représentées par un réservoir de biomasse active B . Une fois par jour ($\Delta t = 1$ jour), à minuit, la croissance et la mortalité sont calculées :

$$B(t + \Delta t) = B(t) + \Delta B^+ - \Delta B^- \quad (C19)$$

La croissance est basée sur l'assimilation nette de CO_2 accumulée au cours de la journée précédente :

$$\Delta B^+ = \frac{M_C}{P_C M_{\text{CO}_2}} A_{n, \text{day}} \Delta t \quad (C20)$$

où P_C est la proportion de carbone dans la biomasse végétale sèche, pour laquelle une valeur constante de 0.4 est utilisée, et M_C et M_{CO_2} sont les masses molaires du carbone et du CO_2 (12 et 44 g mol⁻¹). Le terme de mortalité dépend lui aussi de la photosynthèse et augmente en cas de déficit de photosynthèse. Ce dernier peut-être provoqué par un déficit de rayonnement, par exemple, ou par le stress hydrique. Il faut noter que ce terme peut représenter le transfert de molécules organiques de la biomasse active vers les organes de stockage et de structure. Il est donné par une extinction exponentielle de B caractérisée par une espérance de vie effective dépendante du temps :

$$\Delta B^- = B \left(1 - \exp \left(- \frac{\Delta t}{\tau} \right) \right) \quad (C21)$$

et

$$\tau(t) = \tau_M \cdot \frac{A_{nfm}(t)}{A_{n, \text{max}}} \quad (C22)$$

où τ_M est l'espérance de vie maximale, paramètre qui dépend du type de végétation, A_{nfm} est la valeur de A_n foliaire maximum atteint le jour précédent et $A_{n, \text{max}}$ est la valeur de A_n foliaire en conditions optimales :

$$D_s = 0 \text{ g kg}^{-1},$$

$$I_a(h) = 500 \text{ W m}^{-2}$$

et $T_s = 25^\circ\text{C}$ pour les plantes en C_3 et $T_s = 35^\circ\text{C}$ pour les plantes en C_4 .

Afin d'éviter une perte extrême de biomasse dans les périodes où A_n est faible, la contrainte suivante sur l'espérance de vie de la feuille est imposée:

$$\tau \geq 5 \text{ jours} \quad (\text{C23})$$

Le LAI est obtenu à partir de la biomasse active en supposant un ratio SLA (Specific Leaf Area) constant, en fonction du type de végétation:

$$\alpha_B = \frac{B}{LAI} \quad (\text{C24})$$

Un autre paramètre de la végétation est nécessaire afin de permettre à la végétation de commencer à assimiler le CO_2 après une période de conditions défavorables : la valeur minimale du LAI (LAI_{\min}).

En réalité, α_B dépend du climat (température et concentration en CO_2) et de la fertilisation azotée. Afin de tenir compte de la morphologie des plantes, le concept de dilution de l'azote de Lemaire et Gastal (1997) est utilisé dans l'évolution de la biomasse. Le modèle de dilution de l'azote est une loi agronomique bien établie reliant la teneur en azote de la plante dans des conditions non-limitantes d'apport en azote à la matière sèche aérienne accumulée. La valeur critique de la teneur en azote de la plante est la valeur maximisant la croissance, et cette valeur diminue au fil de l'accumulation de biomasse selon une loi exponentielle.

La base du modèle est que la composante métabolique de la biomasse végétale est liée à la biomasse totale par une loi logarithmique allométrique (Calvet et Soussana, 2001). Dans ISBA-A-g_s, la biomasse métabolique est identifiée comme la biomasse active, ou biomasse foliaire. La relation entre la biomasse active B et la biomasse totale non ligneuse de la biomasse aérienne B_T est la suivante:

$$B_T = \left(\frac{B}{c} \right)^{\frac{1}{1-a}} \quad (\text{C25})$$

Où a et c sont des paramètres constants: $a = 0.38$ et $c = 0.754$. En réalité, a peut varier avec la concentration en CO_2 , mais par souci de simplicité, une valeur constante $a = 0.38$ est utilisée.

La biomasse aérienne totale comprend le réservoir de biomasse active et le réservoir de biomasse aérienne de structure (B_s), qui dans le cas des herbacées peut être considéré comme la biomasse correspondant aux tiges. Dans le modèle de dilution de l'azote, une relation entre le rapport de surface foliaire LAR et la concentration en azote de la biomasse aérienne N_T est appliquée:

$$LAR = \frac{LAI}{B_T} = e N_T + f \quad (\text{C26})$$

où e et f sont appelés des paramètres de plasticité et sont dérivés par type de végétation à partir de données de la littérature. L'Eq. C27 peut être utilisé comme une équation de fermeture pour estimer α_B :

$$\alpha_B = \frac{1}{e N_a + \frac{f}{(cB_T^{-a})}} \quad (C27)$$

où N_a est la concentration en azote massique de la biomasse active. Elle dépend du type de végétation et de la fertilisation azotée. Pour plus de détails et de calculs, voir Calvet et Soussana (2001). De cette façon, α_B pourrait devenir une variable du modèle, variant au cours du temps en fonction de B_T , moyennant des itérations. Cependant, pour des raisons pratiques de temps de calcul, il a été jugé préférable de conserver une valeur α_B constante. Dans ce cas, α_B représente des caractéristiques végétales plutôt intrinsèques indiquant une adaptation biologique au climat et aux conditions de croissance moyens (Calvet et Soussana, 2001). Etant donné que l'équation C27 ne peut être résolue que par itérations, et que les données LAR et N_T pour dériver les paramètres de plasticité par régression manquent, il est préférable d'utiliser une équation plus simple s'appliquant uniquement aux feuilles. Des données sont disponibles pour les feuilles sous la forme de la surface foliaire spécifique (SLA) et de teneur en azote foliaire massique N_L :

$$SLA = \frac{LAI}{B} = e N_L + f \quad (C28)$$

La question du temps de calcul et de la disponibilité des données pour dériver e et f a donc donné lieu à une modification du module de dilution de l'azote représenté par l'Eq. C27. Ce modèle est simplifié en considérant α_B comme le rapport entre la biomasse des feuilles vertes et le LAI:

$$\alpha_B = \frac{1}{SLA} = \frac{1}{e N_L + f} \quad (C29)$$

Il faut noter que les valeurs de N_L peuvent diminuer lorsque la concentration en CO_2 augmente (Calvet et al., 2008, Laanaia et al., 2016).

Bibliographie

- Jacobs, C. M. J.: Direct impact of CO₂ enrichment on regional transpiration, Ph. D. Thesis, Agricultural University, Wageningen, 1994.
- Jacobs, C. M. J., Van den Hurk, B. J. J. M., and De Bruin, H. A.R.: Stomatal behaviour and photosynthetic rate of unstressed grapevines in semi-arid conditions, *Agr. Forest Meteorol.*, 80, 111–134, 1996.
- Berry J. A., and Raison J. K.: Responses of macrophytes to temperature, in OL Lange, PS Nobel, CB Osmond, H Ziegler, eds, *Physiological Plant Ecology*, Vol 12A. Springer-Verlag, Berlin, pp 277–338, 1981.
- Calvet, J.-C., Noilhan, J., Roujean, J., Bessemoulin, P., Cabelguenne, M., Olioso, A., and Wigneron, J.: An interactive vegetation SVAT model tested against data from six contrasting sites, *Agr. Forest Meteorol.*, 92, 73–95, 1998.
- Calvet, J.-C., Gibelin, A.-L., Roujean, J.-L., Martin, E., Le Moigne, P., Douville, H., and Noilhan, J.: Past and future scenarios of the effect of carbon dioxide on plant growth and transpiration for three vegetation types of southwestern France, *Atmos. Chem. Phys.*, 8, 397–406, <https://doi.org/10.5194/acp-8-397-2008>, 2008.
- Calvet, J.-C., Rivalland, V., Picon-Cochard, C., and Guehl, J.-M.: Modelling forest transpiration and CO₂ fluxes – response to soil moisture stress, *Agr. Forest Meteorol.*, 124(3–4), 143–156, doi:10.1016/j.agrformet.2004.01.007, 2004
- Calvet, J.-C. and Soussana, J.-F.: Modelling CO₂-enrichment effects using an interactive vegetation SVAT scheme, *Agr. Forest Meteorol.*, 108, 129–152, 2001.
- Canal, N., Calvet, J.-C., Decharme, B., Carrer, D., Lafont, S., and Pigeon, G.: Evaluation of root water uptake in the ISBA-A-gs land surface model using agricultural yield statistics over France, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 18, 4979–4999, <https://doi.org/10.5194/hess-18-4979-2014>, 2014
- Carrer, D., Roujean, J.-L., Lafont, S., Calvet, J.-C., Boone, A., Decharme, B., Delire, C., and Gastellu-Etchegorry, J.-P.: A canopy radiative transfer scheme with explicit FAPAR for the interactive vegetation model ISBA-A-gs: impact on carbon fluxes, *J. Geophys. Res.-Biogeo.*, 118, 1–16, <https://doi.org/10.1002/jgrg.20070>, 2013.
- Collatz, G. J., Ribas-Carbo, M., and Berry, J. A.: Coupled photosynthesis-stomatal conductance model for leaves of C₄ plants, *Aust. J. Plant Physiol.*, 19, 519–538, 1992.
- Goudriaan, J., van Laar, H.H., van Keulen, H., and Louwse, W.: Photosynthesis, CO₂ and plant production, in: *Wheat growth and modelling*, NATO ASI Series, edited by: Day, W. and Atkin, R. K., Plenum Press, New York, Series A, 86, 107–122, 1985.
- Laanaia, N., Carrer, D., Calvet, J.-C., and Pagé, C.: How will climate change affect the vegetation cycle over France? A generic modeling approach, *Climate Risk Management*, 13, 31–42, doi:10.1016/j.crm.2016.06.001, 2016.
- Lemaire, G., and Gastal, F.: N uptake and distribution in plant canopies, in: Lemaire, G. (Ed.), *Diagnosis of the Nitrogen Status in Crops*. Springer, Berlin, pp. 3–43, 1997.
- Ronda, R.J., de Bruin, H.A.R., Holtslag, A.M.: Representation of the canopy conductance in modelling the surface energy budget for low vegetation. *J. Appl. Meteorol*