

APPORT D'UN MODÈLE CLIMATIQUE RÉGIONAL POUR L'ANALYSE DES CONTRAINTES HYDRIQUES SUR LES DOUGLASIAIES DE BOURGOGNE.

BOULARD D.^(1*), CASTEL T.⁽¹⁻²⁾, CAMBERLIN P.⁽¹⁾, SERGENT AS.⁽³⁾, BRED A N.⁽³⁾,
BADEAU V.⁽³⁾, POHL B.⁽¹⁾, ROSSI A.⁽¹⁾

⁽¹⁾ Centre de Recherches de Climatologie, UMR 6282 Biogéosciences, CNRS/Université de Bourgogne, F-21000 Dijon, France.

⁽²⁾ Département Agronomie-Environnement, AgroSup, F-21000 Dijon, France.

⁽³⁾ INRA-UHP UMR 1137 Forest Ecology and Ecophysiology Unit, F-54280 Champenoux, France.

*Damien.Boulard@u-bourgogne.fr

Résumé – Les peuplements de Douglas (*Pseudotsuga menziesii*) en Bourgogne ont été lourdement affectés depuis l'épisode de sécheresse-canicule de 2003. Leur vulnérabilité au climat est attribuable à l'amplitude et au cumul des contraintes hydriques qui s'exercent durant un cycle de végétation (Sergent et al, 2012). Dans le but d'affiner le diagnostic et dans le contexte du changement climatique, nous tâchons d'étendre ces résultats à l'ensemble du territoire bourguignon. Nous présentons pour cela l'évaluation d'une approche utilisant le modèle climatique régional ARW/WRF (Skamarock et al, 2008) associé au modèle de bilan hydrique forestier BILJOU© (Granier et al, 1999).

Mots-clés : Modélisation régionale du climat – WRF – Evapo-Transpiration Potentielle – Bilan Hydrique – Déficit hydrique du sol

Abstract: In Burgundy, Douglas-fir (*Pseudotsuga menziesii*) were heavily affected by the extreme 2003 drought and heat wave. Their vulnerability is due to the amplitude and accumulated water stress exerted during a growing cycle (Sergent et al, 2012). In order to refine the diagnosis and in the context of climate change, we try to extend these results to the whole Burgundy region. We present an evaluation of an approach combining the regional climate model ARW / WRF (Skamarock et al, 2008) and the processed-based model BILJOU © (Granier et al, 1999).

Keywords: Regional climate modelling – WRF – Potential Evapo-Transpiration – Water Balance – Soil Water deficit

Introduction

L'épisode de canicule-sécheresse de 2003 a lourdement affecté les peuplements de Douglas (*Pseudotsuga menziessi*) en Bourgogne. Ces conditions climatiques extrêmes ont provoqué une sécheresse édaphique particulièrement intense en termes de durée, d'intensité et de superficie. Pour prévenir des risques de baisse de croissance radiale, de dépérissement, ou de mortalité chez le Douglas, il est nécessaire de quantifier l'intensité du déficit hydrique auquel il est soumis. Or, l'évapotranspiration comme les précipitations, joue un rôle majeur dans le cycle hydrologique et dans le bilan hydrique des sols et sont utilisées comme données d'entrée climatique aux modèles d'impact. Mais l'estimation de l'évapotranspiration nécessite de nombreuses variables climatiques renseignant la température de l'air, la vitesse du vent, l'humidité relative et les et rayonnement global incident. Les jeux de données provenant de réanalyses globales ou de modèle de circulation générale peuvent pallier à la rareté des données d'observation renseignant ces variables climatiques mais leur faible résolution spatiale n'est pas pertinente pour des études d'impact local ou régional. Celles-ci nécessitent de travailler généralement à une résolution inférieure à 10 km. Dans cette étude, les données climatiques quotidiennes nécessaires au modèle de bilan hydrique forestier Biljou© (Granier et al., 1999) sont produites en continu pour la période 1989-2009 à la résolution de 8km par désagrégation dynamique des réanalyses ERA-INTERIM (ECMWF) par le Modèle de Climat Régional (MCR) ARW/WRF (skamarock et al., 2009). Ces données

climatiques sont ensuite utilisées pour alimenter le Modèle Biljou© afin de simuler les contraintes hydriques pour 30 parcelles morvandelles de Douglas reprises du dispositif de l'ANR DRYADE. Ce travail présente des résultats de validations effectués à partir des données d'observations précipitations bourguignonnes, (i) hiérarchiser l'influence des variables climatiques pour l'estimation du déficit hydrique du sol et (iii) analyser la capacité du modèle à simuler le bilan hydrique et le déficit hydrique du sol des parcelles de Douglas.

1. Approche expérimentale

1.1 Modélisation climatique régionale

WRF est un modèle climatique non-hydrostatique de méso-échelle développé au NCAR. Pour ce travail la version 3.1.1 est utilisée (Skamarok *et al.*, 2008). Le noyau ARW (Advanced Research WRF) est adapté pour la simulation du climat. WRF utilise un système de projection verticale en niveaux sigma. La résolution des mouvements verticaux permet de simuler la convection d'échelle fine et les phénomènes de méso-échelles. Le modèle propose une importante liste de paramétrisations: interaction surface continentale-atmosphère, couche de surface, schémas de radiation d'ondes longues et ondes courtes, de couche limite, de convection et de microphysique. Ces schémas sont d'une importance primordiale pour la simulation des précipitations et sont susceptibles d'affecter la variabilité spatiale et temporelle des précipitations du domaine.

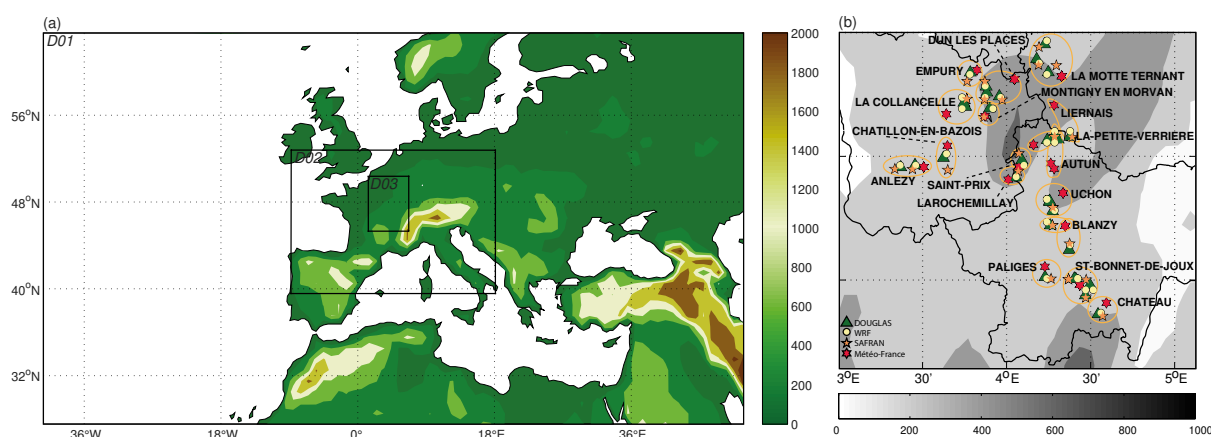


Fig. 1. a Domaines utilisés pour les simulations avec ARW/WRF. **b** Localisation des 30 placettes de Douglas et des données météorologiques les plus proches.

La figure 1a présente les trois domaines emboîtés de maille horizontale 120, 32,5 et 8,2 km utilisés pour la simulation du climat régional avec retour d'information des domaines enfants aux domaines parents (two-way nesting). La zone de relaxation se compose de 5 points de grille, avec un point de grille de forçage, et 4 points de grille de relaxation. L'expérience prend en compte les caractéristiques majeures de la topographie régionale, une résolution verticale de 28 niveaux sigmas et couvre la Bourgogne et ses territoires adjacents sur un domaine d'extension 45,91°N-48,52°N et 2,58°E-5,62°E. Les forçages latéraux et les champs atmosphériques de référence sont fournis par les réanalyses ERA-Interim (Berrisford *et al.*, 2009) toutes les 6 heures et les champs de températures de surface océaniques (TSO) sont prescrits toutes les 24 heures par interpolation linéaire des TSO ERA-Interim. Le pas de temps du modèle est fixé à 150 secondes. Les données sont archivées toutes les 6 heures du 1er Janvier au 31 Décembre après un spin-up d'une année. Les champs injectés latéralement concernent la hauteur géopotentielle, la température, l'humidité spécifique et les composantes zonale, méridienne et verticale du vent. Les champs de surface (humidité et température du sol, albédo) sont également injectés dans le LSM au premier pas de

temps (voir Xu *et al.* (2012) pour la description de l'ensemble physique).

1.2 Modélisation du bilan hydrique forestier

Le déficit hydrique des sols est calculé en utilisant le modèle de bilan hydrique forestier Biljou© (Granier *et al.*, 1999). Biljou© est un modèle écosystémique basé sur les processus permettant de calculer les flux d'eau (interception, transpiration, évapotranspiration, drainage) et la teneur en eau des sols au pas de temps quotidien. Pour chaque peuplement de Douglas, Biljou© caractérise les sols (maximum d'eau extractible, densité apparente, teneur en eau au point de flétrissement permanent pour chaque couche du sol) et les peuplements (indice de surface foliaire, distribution des racines fines). En cas de dessèchement du sol, la transpiration n'est limitée par la régulation du couvert que lorsque la réserve en eau relative du sol (REW) descend au-dessous d'un seuil critique de 40%. La simulation quotidienne de la capacité en eau du sol inclue une autocorrélation temporelle et ne réinitialise jamais la réserve en eau relative du sol.

1.3. Peuplements forestiers

Trente peuplements de Douglas (Fig. 1b) sont analysés (Sergent *et al.*, 2012). La campagne de renseignement sur chaque peuplement a été effectuée de Mars à Avril 2009. Une fosse pédologique a été creusée pour décrire le profil du sol (profondeur, texture, fraction d'élément grossier, fraction de racines fines dans chaque horizon) pour chacun des peuplements. Le coefficient de texture du sol et la fraction des éléments grossiers de chacune des couches sont utilisés pour calculer la quantité d'eau extractible du sol. Le diamètre à hauteur de poitrine, la hauteur dominante, et l'état du houppier ont également été enregistrés pour caractériser les profils sylvicoles de chaque peuplement.

2. Résultats

2.1. Désagrégation des précipitations et de l'évapotranspiration potentielle

La figure 2 présente les résultats de comparaison entre les précipitations observées et simulées sur la période 1989-2009. L'amplitude de la variabilité interannuelle des précipitations est bien reproduite par le modèle en comparaison avec les réanalyses SAFRAN et les observations. WRF présente un écart-type de 132,6mm, proche de celui des observations et de SAFRAN (114,4 & 111,5mm). Les précipitations simulées montrent une forte covariabilité (Fig. 2a) avec les observations et les réanalyses ($r=0,87/0,88$ sur l'ensemble de la période). Cependant, le modèle présente une surestimation des cumuls de précipitations systématique (+122,8mm entre WRF et les observations). Les années particulièrement sèches 1991, 2003 et à moindre mesure 2005 simulées par le modèle sont trop humides tandis qu'une année neutre comme 1996 en termes de cumul de précipitations, correspond à l'une des plus humides de la période selon WRF. Les résultats sont toutefois moins satisfaisants concernant la reproduction du cycle annuel moyen (Fig. 2b). Même si l'amplitude des cumuls journaliers de précipitations semble réaliste comparativement aux données SAFRAN et aux observations, sa covariabilité avec ces deux jeux de données est moins satisfaisante qu'au pas de temps interannuel ($r=0,47$). Les différences maximales sont retrouvées systématiquement au printemps et en été, d'avril à août. La surestimation des pluies par le modèle dépend d'une surestimation des précipitations convectives tant en terme d'occurrence de nombre de jours de pluie ($>1\text{mm}$) qu'en terme d'intensité. La surestimation des précipitations simulées est quasi-systématique sur l'ensemble de la région (Fig. 2c). Les différences maximales sont retrouvées sur le versant au vent du massif du Morvan, et plus généralement, sur les zones de reliefs avec des différences de cumul de précipitations maximales pouvant atteindre localement 300mm.

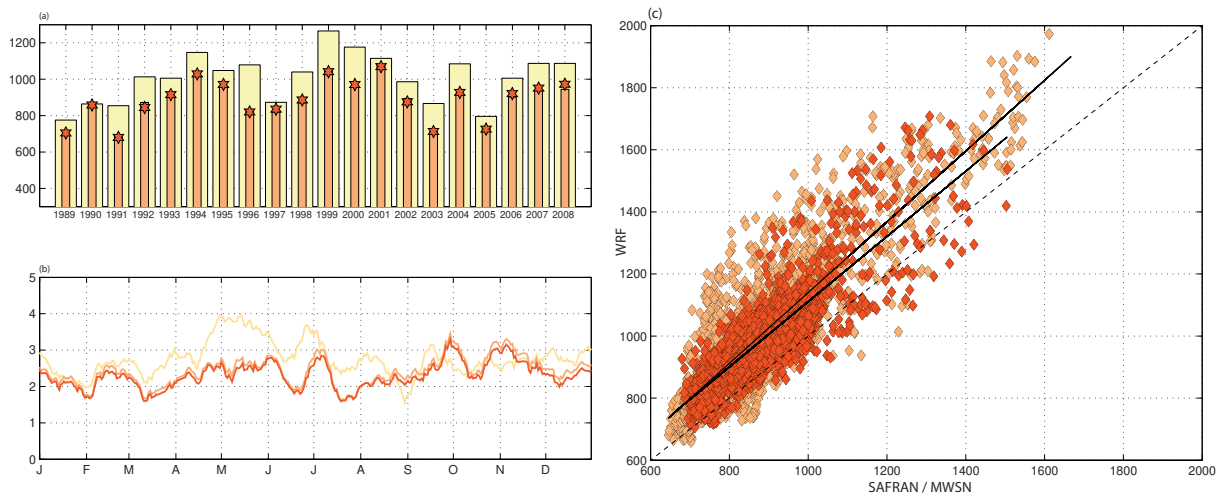


Fig. 2 **a** Cumuls de précipitations annuels sur la période 1989-2009 pour les données WRF (jaune), SAFRAN (orange) et Météo-France (rouge). **b** Cycle annuel moyen sur la période 1989-2009 pour les données WRF (jaune), SAFRAN (orange) et Météo-France (rouge). **c** Comparaison de la distribution spatiale des données WRF et SAFRAN (orange), et WRF et Météo-France (rouge).

La figure 3 présente les résultats de comparaison entre les évapotranspirations estimées à partir des données WRF, SAFRAN, et des observations sur la période 1989-2009 selon la formule de Penman-Monteith (FAO-56 – Allen et *al.*, 1998). La variabilité interannuelle de l'évapotranspiration potentielle estimée à partir des données SAFRAN et des observations sont fortement corrélées mais les réanalyses SAFRAN, régulièrement utilisées pour les études d'impact agro-forestières, présentent une sous-estimation systématique. Cette sous-estimation est produite principalement durant l'été avec un biais pouvant atteindre 1mm/jour. Le cycle annuel simulé par le modèle est particulièrement bien reproduit ($r^2 > 0,94$) et WRF présente des différences moins importantes avec les observations qu'avec les estimations SAFRAN (Biais=-0,07 ; RMSE=0,37mm).

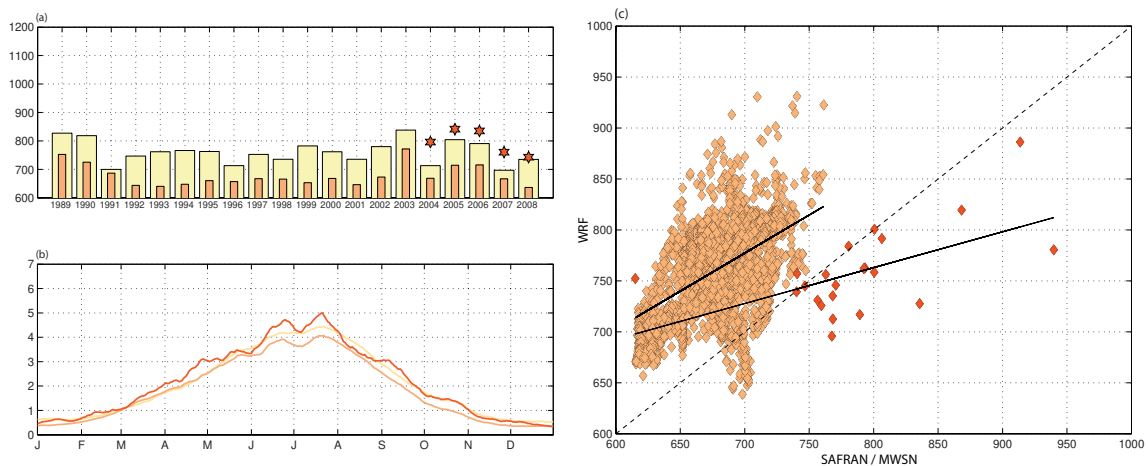


Fig. 3 **a** Cumuls d'évapotranspiration potentielle annuels sur la période 1989-2009 pour les données WRF (jaune), SAFRAN (orange) et Météo-France (rouge). **b** Cycle annuel moyen sur la période 1989-2009 pour les données WRF (jaune), SAFRAN (orange) et Météo-France (rouge). **c** Comparaison de la distribution spatiale des données WRF et SAFRAN (orange), et WRF et Météo-France (rouge).

Les différences maximales sont retrouvées durant l'été. Les cumuls d'évapotranspiration potentielle estimés à partir des données WRF sont cohérents avec les estimations issues des données d'observation même si le modèle présente une légère sous-estimation sur la majorité de la région. Mais l'évapotranspiration potentielle estimée à partir des données WRF semble être de meilleure qualité que les estimations SAFRAN, dont les différences avec les observations sont induites par la sous-estimation du rayonnement global incident en été, de la vitesse du vent moyen

sur l'ensemble de l'année, et de la sous-estimation (surestimation) des températures moyennes (humidité relative moyenne) durant l'été et l'automne.

2.2. Sensibilité de l'indice de stress hydrique aux variables climatiques.

Pour évaluer la fiabilité des données simulées par le modèle WRF, le bilan hydrique quotidien a été calculé en utilisant le modèle de bilan hydrique forestier Biljou©. Les stations Météo-France, et les points de grille WRF et SAFRAN les plus proches ont été utilisées comme données d'entrées météorologiques. Les Douglas ont quant à eux été choisis en raison de leur grande sensibilité aux épisodes de sécheresse. Les différences entre l'indice de stress hydrique calculé à partir des données WRF et météo-France (Fig. 4a) présente une distribution hétérogène avec des différences plus importantes (entre 10 et 27%) sur retrouvées sur les placettes les plus à l'Est (et spécialement sur les 3 placettes les plus au Nord : 31-42%), et plus faibles (<10%) sur les placettes les plus à l'Ouest du domaine. Ces différences plus faibles sont attribuables aux déficits hydriques des sols moins importants sur la partie exposée au vent du massif du Morvan qui est plus humide. Les variations interannuelles des SWD pour les 30 placettes de Douglas présentent une corrélation moyenne de 0.34 sur la période 1989-2008, avec des différences très prononcées entre chaque placette. Les corrélations les plus importantes sont retrouvées à l'extérieur du massif du Morvan où elles sont d'ailleurs très contrastées sur ce dernier. Cela suggère que la forte variabilité spatiale des paramètres climatiques sur les terrains les plus élevés n'est pas adéquatement représentée par le peu de stations d'observation sur le massif du Morvan. La Fig. 4b présente la quantité d'eau extractible (REW) calculée à partir des mêmes jeux de données climatiques. La REW calculée à partir des données WRF est très fortement corrélée à celle calculée à partir des données SAFRAN et Météo-France ($r=0.83$). Cependant, WRF surestime la REW de Mai à Octobre. Malheureusement, cette surestimation est un problème majeur qui affecte la capacité du WRF à produire un SWDI fiable puisque le SWDI correspond à la somme des écarts journaliers entre la quantité d'eau extractible et une valeur de critique de 40%. En Juillet-Août, les différences entre WRF et Météo-France sont faibles, mais ces faibles différences peuvent se transformer en d'importants biais de SWDI (Fig. 4c). La figure 4c présente une analyse de sensibilité visant à simuler l'indice de stress hydrique présenté dans la section 1.2. Chacune des variables météorologiques WRF a été substituée et remplacée par une variable météorologique observée. Cette expérience de sensibilité montre que l'estimation de l'indice de stress dépend principalement des précipitations (courbe noire - $r=0,97$). La substitution de l'humidité relative, de la vitesse du vent, des températures moyennes de l'air ou du rayonnement global incident n'améliore pas significativement l'indice de stress hydrique.

Pour évaluer la qualité des données WRF, deux corrélations ont été réalisées entre l'indice de croissance du douglas et (i) l'indice de stress hydrique utilisant les observations Météo-France, et (ii) un indice de stress utilisant les températures moyennes, vitesse du vent, humidité relative, rayonnement global incident WRF et les précipitations Météo-France (Fig. 4d). Les variations interannuelles de l'indice de croissance des 30 peuplements de Douglas calculé à partir des données WRF où ont été substituées les précipitations par les observations Météo-France sont fortement corrélées avec les variations interannuelles de l'intensité du déficit hydrique du sol (WRF + Météo-France ; $r=-0.77$, SAFRAN ; $r=-0.80$; Météo-France, $r=-0.81$) au cours de la période 1989-2008 (Sergent et *al.*, 2012). A l'opposée, la corrélation entre l'indice de croissance radiale des Douglas et le SWDI calculé exclusivement à partir des données WRF est faible ($r=-0.21$) à cause de la surestimation de la REW qui empêche le modèle à produire un SWDI réaliste.

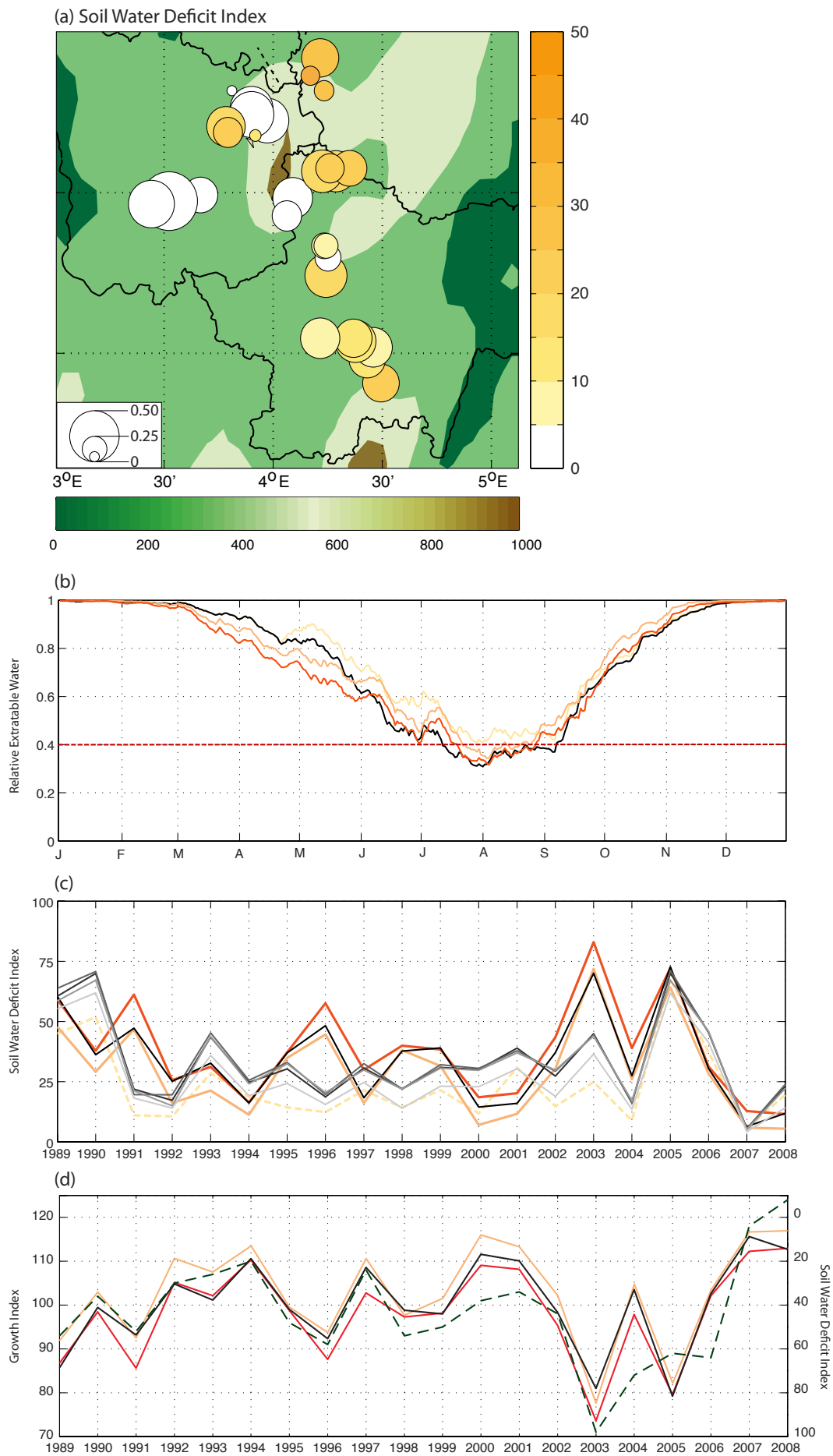


Fig. 4 a Différences en pourcentage (couleurs) et corrélations (taille du cerle) entre les SWDI calculés à partir de Biljou© utilisant les données WRF and les observations Météo-France pour les 30 placettes de Douglas. **b** Cycle annuel moyen (19 89-2008) moyenné sur l'ensemble des 30 placettes de Douglas de la quantité d'eau extractible calculée à partir des données Météo-France (rouge), SAFRAN (orange), WRF (jaune) et WRF + précipitations MF (noire). **c** Intensité moyenne du déficit hydrique du sol pour les 30 peuplements de Douglas calculée à partir des données Météo-France (rouge), SAFRAN (orange), WRF (pointillés jaunes) et des données WRF (courbes) pour les lesquelles une variables climatiques a été substituées. (Du plus foncé au plus clair : Précipitations – températures – vitesse du vent – humidité relative – rayonnement global incident). **d** Variations interannuelles de l'indice de croissance (pointillé vert) et de l'indice de déficit hydrique du sol calculée à partir des données Météo-France (rouge), SAFRAN (orange) et WRF + précipitations MF (noire).

Conclusion

La désagrégation dynamique du climat Bourguignon à haute résolution est un exercice de modélisation exigeant. Cette étude montre que l'estimation de l'évapotranspiration potentielle l'aide d'un modèle climatique régional est un exercice réalisable. Cependant, WRF et plus généralement les MCR montrent leurs limites pour des études d'impact relatives au cycle hydrologique. Les simulations des MCR sont connues pour présenter une surestimation systématique des précipitations, et nécessitent une étape de post-correction. De nombreuses études ont mis en évidence l'efficacité de certaine approche statistique de post-correction, telle que le Quantile-mapping (Thieme et al., 2011; Gudmundsson et al., 2012; Maraun 2013) permettant d'ajuster la distribution de données modélisées sur la distribution de données d'observation. La combinaison de précipitations corrigées ou observées et d'une évapotranspiration potentielle modélisée par un MCR peut d'ores et déjà permettre la régionalisation d'un indice de sécheresse.

Remerciements

Les auteurs remercient N. Bréda, A-S Sergent, A. Witterongel, A. Auffray, V. Badeau and D. Thevenin pour l'obtention des données d'observation. Les simulations ont été réalisées à partir des ressources des Centres de Calcul de l'Université de Bourgogne (DSI-CCUB).

Références bibliographiques

- Allen RG, Pereira LS, Raes D, Smith M (1998) Crop Evapo-transpiration Guidelines for Computing Crop Requirements. *FAO*: Rome, Italy. *Irrigation and Drainage Paper No. 56*
- Berrisford P, Dee DP, Fielding K, Fuentes M, Kållberg P, Kobayashi S, Uppala SM. (2009) The ERA-Interim Archive. ERA Report Series, No. 1 *ECMWF*: Reading, UK
- Friedl MA, McIver DK, Hodges JCF, Zhang XY, Muchoney D, Strahler AH, Woodcock CE, Gopal S, Schneider A, Cooper A, Baccini A, Gao F, Schaaf C (2002) Global land cover mapping from MODIS: algorithms and early results. *Remote Sens Environ* 83:287–302
- Granier A, Bréda N, Biron P, Villet S (1999) A lumped water balance model to evaluate duration and intensity of drought constraints in forest stands. *Ecol Mod* 116:269–283
- Gudmundsson L, Bremnes JB, Haugen JE, Engen Skaugen T (2012) Technical note: Downscaling RCM precipitation to the station scale using quantile mapping – a comparison of methods. *Hydrol Earth Syst Discuss*; 9:6185–201. doi: 10.5194/hessd-9-6185-2012
- Maraun D (2013) Bias Correction, Quantile Mapping, and Downscaling: Revisiting the Inflation Issue. *J. Clim.* 26:2137–2143. doi:10.1175/JCLI-D-12-00821.1
- Skamarock WC, Klemp JB, Dudhia J, Gill DO, Barker DM, Duda M, Huang XY, Wang W, Powers JG (2008) A description of the advanced research WRF version 3. NCAR technical note, NCAR/TN-475+STR, 123pp
- Thieme M, Gobiet A, Leuprecht A (2011) Empirical-statistical downscaling and error correction of daily precipitation from regional climate models. *Int J Climatol* 31:1531–1544. doi:10.1002/joc.2168
- Xu Y, Castel T, Richard Y, Cuccia C, Bois B (2012) Burgundy regional climate change and its potential impact on grapevines. *Clim Dyn* 39:1613–1626