

APPORT D'UN NOUVEAU PROTOCOLE DE RÉGIONALISATION DYNAMIQUE DU CLIMAT POUR L'ESTIMATION DU BILAN HYDRIQUE DE DOUGLASAIES

**Valentin BLANCHET¹, Philippe AMIOTTE-SUCHET¹, Nathalie BRÉDA³, Vincent BADEAU³,
Thierry CASTEL^{1,2}**

¹Université de Bourgogne, Faculté des Sciences de la Terre, Unité Mixte de Recherche (UMR) —Biogéosciences, 21000 Dijon, France (valentin_blanchet@etu.u-bourgogne.fr)

²Département Agronomie-Environnement, AgroSup, 21000 Dijon, France.

³Université de Lorraine, AgroParisTech, INRAE, UMR Silva, 54000 Nancy, France
nathalie.breda@inrae.fr, vincent.badeau@inrae.fr

Résumé – La quantification des impacts régionalisés du changement climatique sur les forêts est un enjeu majeur, tant écologique que socio-économique. Le dépérissement des douglasiaies (*Pseudotsuga menziesii*) est observé depuis une vingtaine d'années et pourrait s'accélérer. Des travaux récents montrent que l'estimation régionalisée du bilan hydrique sous couvert forestier se heurte à la capacité des modèles climatiques régionaux à simuler correctement la quantité et le cycle saisonnier des précipitations. Nous évaluons ici la capacité d'un nouveau protocole de régionalisation du climat à simuler un régime de précipitations réaliste nécessaire au calcul de bilan hydrique forestier.

Mots-clés : Bilan Hydrique, Climat, Désagrégation dynamique, Quantile-mapping

Summary – Quantifying the regionalized impacts of climate change on forests is a major ecological and socio-economic issue. The decline of Douglas-fir (*Pseudotsuga menziesii*) has been observed for about 20 years and should be accelerated. Recent work shows that regionalized estimation of water balance under forest canopy is hampered by the ability of regional climate models to correctly simulate precipitation amount and seasonal cycle. Here we evaluate the ability of a new climate regionalization protocol to simulate a realistic precipitation regime required for the calculation of forest soil water balance.

Key words: Water-balance, Climate, Dynamical Downscaling, Quantile-mapping

Introduction

Depuis le début du 21^{ème} siècle, la productivité des douglasiaies (*Pseudotsuga menziesii*) de Bourgogne-Franche-Comté (3^{ème} région nationale de production) est affectée par l'accélération du changement climatique, en particulier par la fréquence et la récurrence d'épisodes de sécheresse intense. L'assèchement des sols forestiers dégrade la productivité et l'état sanitaire des peuplements. La quantification des impacts régionalisés du changement climatique sur ces forêts revêt donc pour la région Bourgogne-Franche-Comté des enjeux écologiques et socio-économiques majeurs pour la filière forêt-bois. Des études récentes soulignent que l'estimation régionalisée des bilans hydriques sous couvert forestier en moyenne montagne est contrainte par la capacité des modèles climatiques régionaux à simuler correctement les quantités et la saisonnalité des précipitations (Boulard et al. 2016, 2017). Nous évaluons ici l'apport d'un nouveau protocole de régionalisation dynamique du climat prenant en compte des rétroactions entre les schémas radiatif et convectif, introduites dans les versions récentes du modèle climatique régional ARW/WRF

(Skamarock et al. 2021). Ce protocole utilise un guidage entre les données de forçage large échelle ERA-INTERIM (Dee et al. 2011) et le premier des deux domaines emboîtés définis pour la descente d'échelle. La simulation ERAINT/WRF produit un climat au pas de temps journalier et à une résolution cible de 8 km. Ce climat ainsi simulé sur la région Bourgogne-Franche Comté a, dans un premier temps, été comparé au climat reconstitué par les données de référence Safran-Isba-Modcou (SIM, Habets et al. 2008). Ensuite, les données SIM et ERAINT/WRF ont servi à alimenter le modèle de bilan hydrique forestier BILJOU© (Granier et al. 1999) sur 30 peuplements de douglas (Sergent et al. 2014). Les métriques des contraintes hydriques ont enfin été comparées et analysées afin d'évaluer la performance du nouveau protocole de régionalisation pour la quantification des contraintes hydriques. L'objectif de ce travail est (i) d'apprécier la capacité du protocole de régionalisation à produire un régime de précipitation cohérent, (ii) d'évaluer la robustesse du climat régionalisé à partir des sorties d'un modèle de bilan hydrique sous couvert forestier et (iii) de mesurer l'apport d'une post-correction des précipitations.

1. Matériel et méthode

1.1 Protocole de régionalisation climatique

La désagrégation numérique du climat (Cavan et al. 2020) s'appuie sur le modèle climatique régional ARW/WRF et sur les données de forçage ERA-INTERIM. Les données SIM de Météo-France constituent la référence climatique pour la période commune 1980-2005 (Quintana-Seguí et al. 2008). La descente d'échelle numérique est basée sur l'utilisation de deux domaines emboîtés : un premier domaine de 48 km de résolution et un deuxième domaine situé à l'intérieur de ce premier domaine à 12 km centré sur la France. Cette résolution a ensuite été rééchantillonnée linéairement à 8 km sur la grille SIM.

Deux modifications majeures ont été apportées comparativement au protocole proposé par Boulard et al. (2016). La première modification concerne la prise en compte des rétroactions entre les schémas radiatif et convectif (Alapaty et al. 2012). La seconde est l'application d'un guidage spectral au-dessus de la couche limite planétaire (Liu et al. 2012) afin que la dynamique climatique du premier domaine se cale sur celle des ré-analyses. Le climat a été simulé en continu sur la période 1979-2005. Notons que l'année 1979 est utilisée comme spin-up du modèle et n'est pas utilisée dans les analyses.

1.2 Calcul du bilan hydrique sous-peuplement de douglas

Le modèle de bilan hydrique forestier [BILJOU©](#) (Granier et al. 1999) requiert des variables climatiques quotidiennes (précipitation, température, rayonnement global (RGL), vent, humidité relative), des paramètres édaphiques (par couche de sol : profondeur, texture, densité apparente, pourcentage de racines fines, humidité pondérale au point de flétrissement permanent) et relatif au peuplement forestier (type fonctionnel, indice foliaire, date de débourrement/chute de feuille du peuplement). Les flux d'eau élémentaires entrants et sortants de l'écosystème sont calculés puis le contenu en eau du sol sous couvert forestier est simulé. À partir de la réserve relative en eau du sol modélisée, BILJOU© détermine les caractéristiques des épisodes de sécheresse : durée, précocité, intensité, définis lorsque le contenu en eau du sol chute en dessous de 0,4 (i.e. 40%). En dessous de ce seuil, les échanges gazeux (transpiration et photosynthèse) sont réduits par régulation stomatique et la croissance radiale des troncs s'arrête. Ce fonctionnement générique à effet de seuil en fait un

outil pertinent pour évaluer la robustesse du nouveau protocole de régionalisation à l'échelle journalière.

Les données pédoforestières utilisées dans ce travail proviennent de 30 peuplements de douglas sélectionnés sur différentes stations forestières (Sergent 2011). Ces dernières sont majoritairement situées au centre (Morvan) et au sud (Mâconnais) de la Bourgogne (figure 1A). À chacun de ces peuplements est associé le point de maille SIM et WRF/ERAINT le plus proche. La figure 1B montre un régime de précipitation assez homogène sur l'année avec des cumuls mensuels de pluie un peu plus faible de février à avril et pour juillet-août. Pour ces deux derniers mois, les températures moyennes journalières sont les plus élevées et sont accompagnées par un fort rayonnement global, ce qui a pour conséquence une ETP élevée (figure 1B).

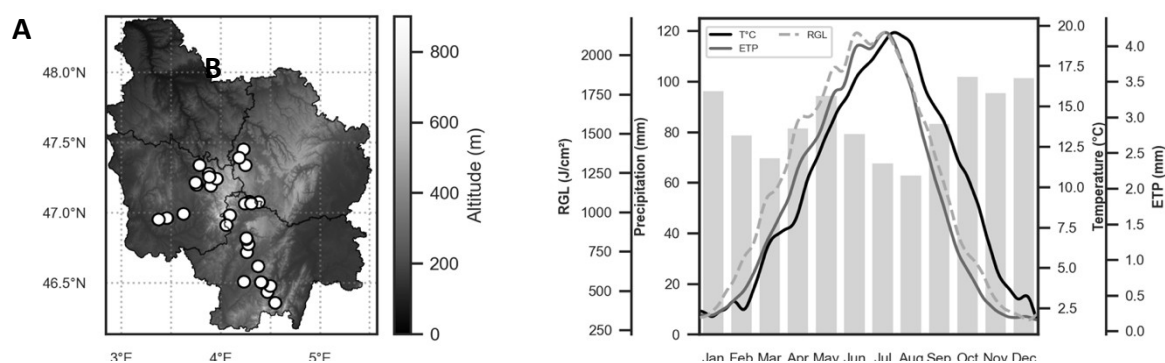


figure 1 : Localisation des 30 peuplements de Douglas mobilisés ; fond de carte modèle numérique de terrain (MNT) BD Alti, IGN(A), Cumul mensuel interplacette moyen de précipitation et courbes de température, évapotranspiration potentielle Penman (ETP) et rayonnement global (RGL) journaliers moyens inter-placette pour la période 1980-2005 (B)

2. Résultats

2.1 Évaluation de la régionalisation

Les résultats pour les 30 points de mailles les plus proches des 30 peuplements de douglas montrent que les températures sont très bien reproduites, tant leur cycle annuel (R^2 de 0.997 et RMSE de 0.4), que leur évolution interannuelle ($R^2 = 0.82$, RMSE = 0.33). Le rayonnement global journalier moyen est également bien reproduit ($R^2 = 0.98$, RMSE = 251) avec néanmoins un biais de surestimation par WRF/ERAINT pour les mois les plus chauds. Enfin, l'humidité relative et le vent moyen mensuel interannuel sont moins bien reproduits avec respectivement un léger biais d'air sec de ERAINT/WRF ($R^2 = 0.74$, RMSE = 4.07) et une vitesse de vent systématiquement plus élevée dans les simulations ($R^2 = 0.31$, RMSE = 0.5). Le modèle reproduit dans l'ensemble, tant en interannuel qu'au niveau du cycle annuel et au niveau du point de grille de la station, correctement la quantité et la variabilité ces variables climatiques.

2.2 Reproduction de la variabilité et du cumul interannuel des pluies

La reproduction des pluies est un des points faibles des simulations climatiques et un verrou majeur pour le calcul du bilan hydrique. L'analyse des cumuls de précipitation interannuels et inter peuplement montre une amélioration significative des simulations de la pluie avec la disparition de la surestimation systématique des cumuls annuels et une très bonne reproduction de la variabilité interannuelle ($R^2=0.76$, RMSE=67). Toutefois, les cumuls WRF/ERAINT présentent un biais sec

régulier sur leur 3^{ème} quartile. Les résultats de l'analyse des cumuls interannuels inter-peuplement sont satisfaisants (R^2 Pearson=0.42, RMSE = 166). Le cycle annuel est également bien reproduit dans sa structure globale (figure A). On observe néanmoins un biais humide significatif des précipitations moyennes mensuelles de mars à août, suivi d'un biais sec de septembre à février. Nos résultats montrent que ces biais secs et humides se compensent à l'échelle annuelle. Il est attendu que la présence de ces biais affecte le bilan hydrique et la capacité à reproduire correctement les contraintes hydriques des douglasaies. L'analyse spatiale indique que la géographie des précipitations est bien reproduite ($R^2=0.58$, RMSE=32). On constate un biais localisé dans les zones à relief plus marqué (nord Morvan et sud Bourgogne) où les précipitations sont moins bien reproduites (figure 2B). En effet, le Morvan avec son orientation nord-sud entraîne un forçage orographique du flux dominant ouest/sud-ouest qui conduit à une dynamique plus complexe (e.g. onde de gravité) et des précipitations plus importantes que les schémas convectifs paramétrés ont du mal à modéliser correctement (Erreur : source de la référence non trouvée B). Ces résultats démontrent cependant la capacité du nouveau protocole de régionalisation à reproduire des précipitations plus réalistes que celui utilisé par Boulard et al. (2016). Se pose alors la question de savoir si ces améliorations sont suffisantes pour simuler correctement le bilan hydrique des douglasaies.

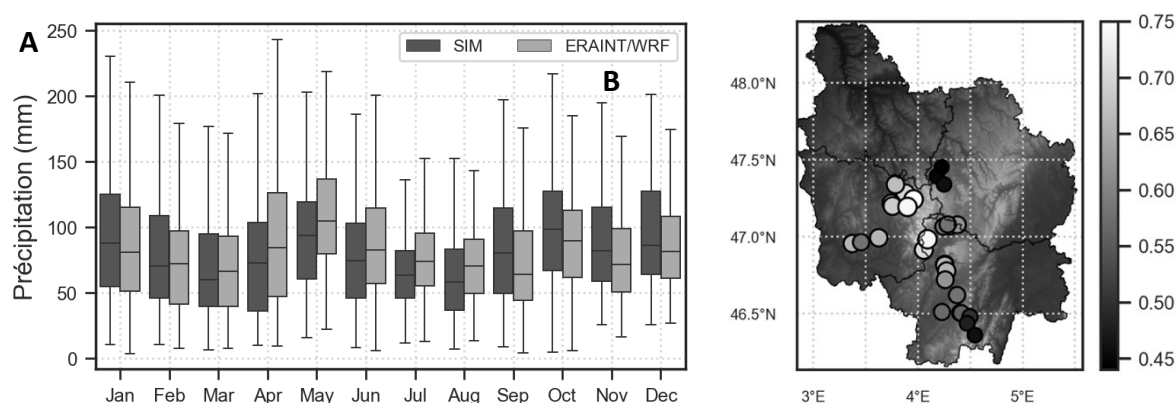


figure 2 : Boxplot des précipitations moyennes mensuelles sur la période 1980-2005 pour les 30 placettes de douglas (A), Carte du R2 des précipitations mensuelles WRF/ERA-Interim par rapport à SAFRAN sur la période 1980-2005 ; fond de carte MNT BD Alti, IGN, voir légende figure 1A (B)

2.3 Reproduction du bilan hydrique des peuplements de douglas

Les réserves relatives journalières en eau du sol (REW) ont été modélisées par BILJOU© pour chaque peuplement puis moyennées pour les 30 peuplements de douglas. La figure 3A compare les profils pour les deux jeux de données climatiques. L'évolution de la REW obtenue à partir des données ERA-Interim/WRF non post-corrigées est bien corrélée au profil de REW obtenu avec les données SIM ($R^2 = 0.98$, RMSE = 0.04). On observe également des corrélations significatives en inter-peuplement ($R^2=0.95$, RMSE = 0.05). La REW calculée à partir des données simulées présente un biais sec en juillet et sur la période septembre-décembre. La présence d'un biais en juillet est surprenante en raison d'un biais humide sur les précipitations à la même période (cf. figure 2A). La plus lente recharge de la REW de septembre à décembre par ERA-Interim/WRF peut être expliquée par le biais sec du jeu de données simulées sur la même période (figure 2A et 3A). Malgré ces résultats encourageants sur les profils de REW, les distributions du nombre de jours de déficit hydrique issu des bilans

hydriques « WRF/ERAINT » et « SIM » sont significativement différentes (test de Wilcoxon, p -value = $2.5e-16$). D'autre part, WRF/ERAINT produit en moyenne plus de jours de déficit hydrique que SIM (figure 3B). Ceux-ci restent tout de même bien corrélés ($R^2 = 0.66$, $RMSE=25$). L'intensité du déficit hydrique suit la même évolution que le nombre de jours de sécheresse (donnée non-montrée), ($R^2 = 0.58$, $RMSE=18$). Enfin, la date de 1er jour de déficit hydrique est bien reproduite et semble ici peu affectée (figure 3C).

Bien que ces résultats soient encourageants, nous avons cherché à voir si l'application d'une post-correction des pluies et des températures par quantile-mapping était susceptible d'améliorer ces scores. Bien que les données de précipitations post-corrigées soient très proches de SIM, le profil de REW produit (WRF/ERAINTqmap) s'écarte significativement du profil SIM avec un biais sec systématique et très précoce sur la quasi-totalité de l'année (figure 3A). Cela induit mécaniquement des sécheresses plus longues, plus intenses et plus précoces. Le fait que la correction du cycle annuel des pluies dégrade de façon inattendue la reproduction du cycle hydrique des sols par BILJOU© suggère que les résultats initiaux encourageants sont la conséquence d'une compensation de biais qui masque les faiblesses persistantes de la régionalisation climatique tant pour les pluies que pour les autres variables. Dans le cas présent, la post-correction des pluies dégrade les résultats en augmentant le déficit hydrique.

Une analyse de la sensibilité des métriques de sécheresse aux biais des variables climatiques d'entrées du modèle BILJOU© a montré l'impact de la surestimation systématique du rayonnement en été dans le modèle régional WRF (Ruiz-Arias et al. 2016). L'application d'une post-correction seulement sur le rayonnement (WRF/ERAINT_rgl, figure 3A) engendre une sur estimation systématique des valeurs de REW concordant avec le biais humide mesuré sur les pluies WRF/ERAINT de mars à septembre. La correction du rayonnement permet de mettre en évidence l'effet de la mauvaise reproduction du cycle annuel de pluies, qui était initialement compensé par la surestimation du rayonnement et donc de l'évapotranspiration potentielle. Enfin, l'application d'une post-correction à la fois sur le rayonnement et sur les pluies (WRF/ERAINTQmap_rgl, figure 3A) produit un profil de REW proche de la référence. Cette amélioration des résultats par la post-correction est également constatée dans les métriques de sécheresse, puisque la distribution du nombre de jours de déficit hydrique SIM n'est pas significativement différente de celle de ERAINT/WRF (test de Wilcoxon, p -value = 0.24).

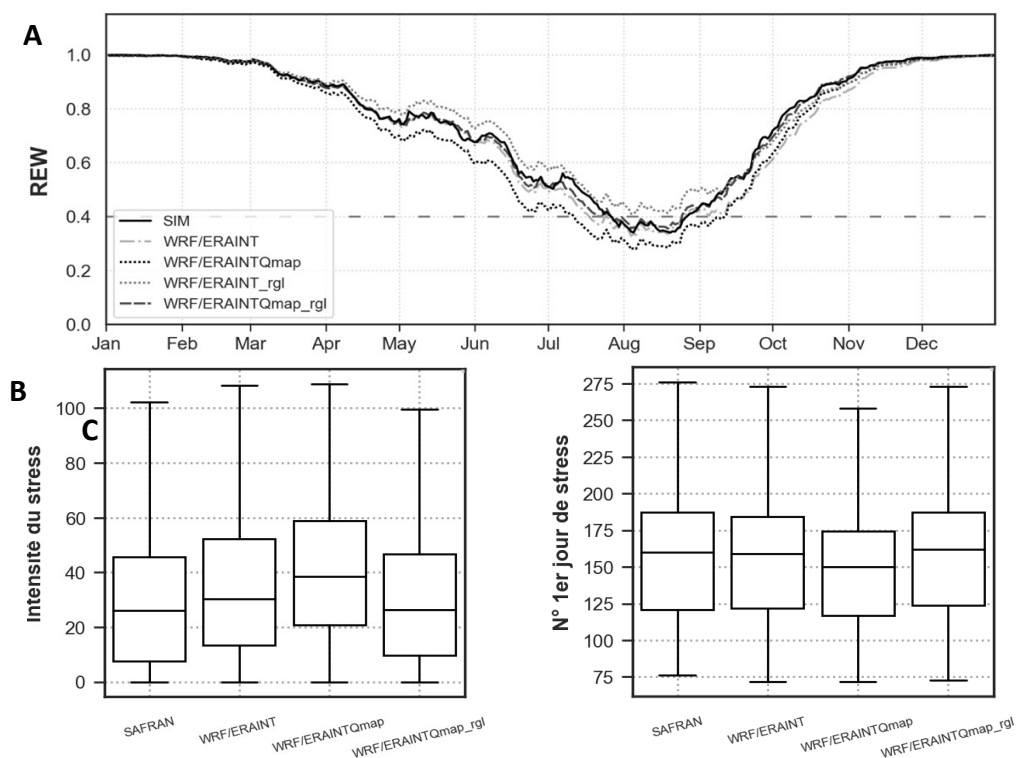


figure 3 : Pour la période 1980 – 2005 interplacette ; proportion d'eau extractible du sol journalière moyenne (A), boxplot interannuel de la durée du stress hydrique (nombre de jours (B), boxplot interannuel de la précocité de sécheresse (jour julien du franchissement du seuil REW = 0.4 (C)

Conclusion

Ces résultats décrivent un nouveau protocole de désagrégation numérique du climat et confirment sa capacité à reproduire à l'échelle régionale et de façon plus robuste la variabilité climatique interannuelle. Ces améliorations masquent pour la pluie, et par un effet de compensation les biais persistant à l'échelle du cycle annuel. Ces biais sont doublés d'un biais positif sur le rayonnement pour les mois chauds. Nous avons pu montrer qu'une deuxième compensation impacte le calcul du bilan hydrique et conduit à une amélioration « artificielle » des métriques de déficits hydriques des peuplements de douglas. L'application d'une post-correction sur les pluies par quantile-mapping qui a paradoxalement produit une dégradation des résultats, a permis de révéler cette deuxième compensation d'erreurs. Le biais sur les pluies est attribuable aux schémas convectifs utilisés dans le protocole de régionalisation dont la paramétrisation sous maille est une source d'incertitude majeure. Conséquemment, une mauvaise représentation des nuages est par le jeu des rétroactions avec le schéma radiatif une source d'erreur sur le rayonnement simulé. Même s'il a été montré que WRF réduisait les biais sur le rayonnement comparativement aux modèles forceurs, cela reste insuffisant. Si les données SIM peuvent être considérées comme la référence pour les données de pluie et de température, ce n'est pas aussi documenté pour le rayonnement. Pour ce dernier, les données SIM n'utilisent pas de données d'observation et ne prennent pas suffisamment en compte la nébulosité sur les reliefs comme le Morvan. Il en ressort que pour obtenir des résultats cohérents, l'usage d'une post-correction statistique, semble être nécessaire pour réduire les biais et corriger les

compensations d'erreurs. Cependant, l'usage d'une correction statistique indépendante est discutable, en particulier sous l'hypothèse de la stationnarité du biais pour un climat projeté (Ehret et al. 2012).

Bibliographie

Alapaty K, Herwehe JA, Otte TL, et al (2012) Introducing subgrid-scale cloud feedbacks to radiation for regional meteorological and climate modeling. *Geophys Res Lett* **39**: <https://doi.org/10.1029/2012GL054031>

Boulard D, Castel T, Camberlin P, et al (2016) Capability of a regional climate model to simulate climate variables requested for water balance computation: a case study over northeastern France. *Clim Dyn* **46**:2689–2716. <https://doi.org/10.1007/s00382-015-2724-9>

Boulard D, Castel T, Camberlin P, et al (2017) Bias correction of dynamically downscaled precipitation to compute soil water deficit for explaining year-to-year variation of tree growth over northeastern France. *Agric For Meteorol* **232**:247–264. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2016.08.021>

Cavan N, Castel T, Pergaud J, et al (2020) Et demain? Robustesse des stratégies innovantes de gestion des adventices face au changement climatique. *Innov Agron* **81**:209–225

Dee DP, Uppala SM, Simmons AJ, et al (2011) The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system. *Q J R Meteorol Soc* **137**:553–597. <https://doi.org/10.1002/qj.828>

Ehret U, Zehe E, Wulfmeyer V, et al (2012) HESS Opinions “Should we apply bias correction to global and regional climate model data?” *Hydrol Earth Syst Sci* **16**:3391–3404. <https://doi.org/10.5194/hess-16-3391-2012>

Granier A, Bréda N, Biron P, Villette S (1999) A lumped water balance model to evaluate duration and intensity of drought constraints in forest stands. *Ecol Model* **116**:269–283. [https://doi.org/10.1016/S0304-3800\(98\)00205-1](https://doi.org/10.1016/S0304-3800(98)00205-1)

Habets F, Boone A, Champeaux JL, et al (2008) The SAFRAN-ISBA-MODCOU hydrometeorological model applied over France. *J Geophys Res Atmospheres* **113**. <https://doi.org/10.1029/2007JD008548>

Liu P, Tsimpidi AP, Hu Y, et al (2012) Differences between downscaling with spectral and grid nudging using WRF. *Atmospheric Chem Phys* **12**:3601–3610. <https://doi.org/10.5194/acp-12-3601-2012>

Quintana-Seguí P, Moigne PL, Durand Y, et al (2008) Analysis of Near-Surface Atmospheric Variables: Validation of the SAFRAN Analysis over France. *J Appl Meteorol Climatol* **47**:92–107. <https://doi.org/10.1175/2007JAMC1636.1>

Ruiz-Arias JA, Arbizu-Barrena C, Santos-Alamillos FJ, et al (2016) Assessing the Surface Solar Radiation Budget in the WRF Model: A Spatiotemporal Analysis of the Bias and Its Causes. *Mon Weather Rev* **144**:703–711. <https://doi.org/10.1175/MWR-D-15-0262.1>

Sergent A-S (2011) Diversité de la réponse au déficit hydrique et vulnérabilité au dépérissement du douglas. Phdthesis, Université d'Orléans

Sergent A-S, Rozenberg P, Bréda N (2014) Douglas-fir is vulnerable to exceptional and recurrent drought episodes and recovers less well on less fertile sites. *Ann For Sci* **71**:697–708. <https://doi.org/10.1007/s13595-012-0220-5>

Skamarock WC, Klemp JB, Dudhia J, et al (2021) A Description of the Advanced Research WRF Model Version 4.3. UCAR/NCAR