



Et demain? Robustesse des stratégies innovantes de gestion des adventices face au changement climatique

Nicolas Cavan, Thierry Castel, Julien Pergaud, Frédérique Angevin, Nathalie Colbach

► To cite this version:

Nicolas Cavan, Thierry Castel, Julien Pergaud, Frédérique Angevin, Nathalie Colbach. Et demain? Robustesse des stratégies innovantes de gestion des adventices face au changement climatique. Innovations Agronomiques, 2020, 81, pp.209-225. 10.15454/fqye-3778 . hal-03105517v2

HAL Id: hal-03105517

<https://institut-agro-dijon.hal.science/hal-03105517v2>

Submitted on 16 Jun 2021

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

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



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0 International License

Et demain? Robustesse des stratégies innovantes de gestion des adventices face au changement climatique

Cavan N.¹, Castel T.², Pergaud J.², Angevin F.¹, Colbach N.³

¹ Eco-Innov, INRAE, F-78850 Thiverval-Grignon

² CRC UMR 6282 Biogéosciences CNRS, Univ. Bourgogne Franche-Comté, EPHE, F-21000 Dijon

³ Agroécologie, AgroSup Dijon, INRAE, Univ. Bourgogne, Univ. Bourgogne Franche-Comté, F-21000 Dijon

Correspondance : Nathalie.Colbach@inrae.fr

Résumé

Pour tester la robustesse des stratégies innovantes de gestion des adventices, le changement climatique a été abordé par une approche de simulations climatiques régionalisées. D'abord, nous avons vérifié que le protocole de régionalisation dynamique mimait correctement le climat observé sur la période 1980-2016. Ensuite, ce protocole a été appliqué à deux trajectoires de forçage radiatif (RCP4.5 et RCP8.5) définies pour l'exercice d'intercomparaison des modèles climatiques globaux (CMIP5) afin d'évaluer l'incertitude associée aux émissions de gaz à effet de serre attendue sur la deuxième moitié du 21^e siècle. Enfin, nous avons comparé des systèmes de culture existants et prospectifs, en terme de gestion de la flore adventice et de son impact sur la production agricole et la biodiversité, avec ces trajectoires climatiques. Pour cela, 44 systèmes de 5 régions ont été simulés avec le modèle de dynamique de la flore adventice FLORSYS. Nos résultats montrent que les températures de surface augmentent en moyenne de ~4°C en fin de siècle pour la trajectoire RCP8.5. Face à ces changements climatiques, trois types de systèmes de culture ont été identifiés : ceux dont la nuisibilité des adventices pour la production (1) diminue ; (2) augmente, particulièrement avec la trajectoire RCP8.5 sur la période 2069-2099 ; (3) est moyenne mais dont la contribution des adventices à la biodiversité augmente. Ces travaux identifient les leviers à prioriser pour définir des systèmes de culture innovants et robustes face au changement climatique.

Mots-clés : Changement climatique, Système de culture, Adventice, Modèle, Simulation

Abstract: Resilience to climate change of innovative weed management strategies

To evaluate the resilience of innovative weed management strategies, the impact of climate change was investigated with a regionalized simulation approach. First, we checked that the protocol for dynamic regionalisation correctly mimicked the climate observed over 1980-2016. Then, the protocol was applied to two periods (2010-2040 and 2069-2099). Finally, we compared existing and prospective cropping systems in terms of weed management and impacts on crop production and biodiversity, with these two climate trajectories. To do so, 44 cropping systems from 5 regions were simulated with the weed dynamics model FLORSYS. Our results show that surface temperature will increase in average by approx. 4°C at the end of the century with the RCP8.5 trajectory. Three cropping system types were identified in response to these climate changes, those whose weed harmfulness for crop production (1) decreased, (2) increased, particularly with trajectory RCP8.5 from 2069-2099, (3) was average but whose weed contribution to biodiversity increased. The study allowed identifying the management levers essential for innovative cropping systems that are robust relatively to climate change.

Keywords: Climate change, Cropping system, Weed, Model, Simulation

Introduction

Mettre au point des systèmes de culture innovants visant une gestion durable des adventices (voir notamment Cavan et al., ce numéro) nécessite aujourd'hui de prendre en compte les conditions climatiques actuelles et projetées. Avec le changement climatique qui s'accompagne d'une rupture de stationnarité (Milly et al., 2008) explorer différents scénarios d'adaptation est un problème épineux. Le couplage de modèles de cultures et de dynamiques adventices avec des modèles climatiques prédictifs pour quantifier les impacts et tester la résilience des modes de gestion en contexte changeant et incertain est alors essentiel (Vermeulen et al., 2013). Les modèles climatiques globaux se heurtent toutefois aux difficultés de reproduire les principaux traits de la variabilité climatique aux échelles spatiales et temporelles adaptées pour tenir compte des besoins des modèles de cultures (Boulard et al., 2016) et des découplages climatiques locaux (Daly et al., 2010).

Depuis 30 ans, des méthodes dynamiques sont développées pour permettre de désagréger le climat "large échelle" produit par les modèles de circulation générale (Giorgi, 2019). Ces méthodes reposent sur des modèles climatiques à aire limitée (i.e. Modèle Climatique Régional MCR) qui implémentent l'état de l'art de la dynamique et de la physique de l'atmosphère couplée en ligne avec des modèles de surface et, plus récemment, avec des modèles océaniques régionaux (Rummukainen, 2010). La valeur ajoutée de ces modèles est indéniable mais nécessite d'adapter le design expérimental au regard des objectifs, de la zone géographique et de la résolution cible. Outre qu'ils héritent des biais des modèles globaux, les modèles climatiques régionaux peuvent, selon la configuration du design, réduire ou amplifier les biais tout en dérivant par rapport aux champs climatiques de large échelle. Cela remet en cause la capacité des modèles climatiques régionaux à produire des champs climatiques de surface robustes et utiles pour des modèles de gestion des cultures.

Parallèlement au progrès réalisés (Giorgi, 2019) et suite à de nombreux résultats récents (ex., Rummukainen et al., 2015 ; Boulard et al., 2016), nous avons dans le cadre de ce travail utilisé un nouveau design de régionalisation climatique. Les objectifs visés sont 1) d'améliorer le réalisme du climat simulé à l'échelle des sites expérimentaux, 2) de caractériser les principaux traits de la variabilité climatique locale selon deux trajectoires de forçage radiatif (RCP4.5 et RCP8.5) et 3) alimenter le modèle FLORSYS qui simule la croissance et la dynamique des cultures et adventices dans les systèmes de culture (Colbach et al., 2019 ; Colbach et al., 2020). Ces simulations permettront d'une part d'évaluer la robustesse des stratégies innovantes de gestion des adventices face au changement climatique, et d'autre part de compléter l'évaluation du modèle climatique régional, en documentant les patrons de la variabilité climatique en contexte changeant à partir de 'métriques agronomiques'.

1. Matériel et méthodes

Notre étude est composée de plusieurs étapes: (1) régionalisation du climat pour plusieurs petites régions agricoles, (2) évaluation du modèle climatique à l'aide d'enregistrement climatique historique, (3) production de scénarios climatiques futurs, (4) simulation de la dynamique adventice et son impact sur la production pour des systèmes de culture existants et innovants de ces mêmes régions, avec les scénarios historique et futurs, (5) identification des déterminants techniques et floristiques de la robustesse des systèmes de culture face au changement climatique.

1.1 Régionalisation climatique

1.1.1 Protocole de désagrégation

La stratégie de régionalisation (i.e. descente d'échelle spatiale) reprend dans ses grandes lignes la démarche initiée dans Boulard et al. (2016) et utilisée pour le projet GICC HYCCARE-Bourgogne (Tissot et al., 2016). Elle s'appuie principalement sur le modèle climatique régional ARW/WRF (Weather

Research & Forecasting – Skamarock et al., 2019), sur les données Safran-Isba-Modcou (SIM – Habets et al., 2008) de Météo-France et sur les données stationnelles SYNOP (surface synoptic observations). Les données de forçage climatique "large échelle : réanalyses" ERA-INTERIM (Dee et al., 2011) ont été utilisées pour évaluer et valider le design de la désagrégation dynamique numérique basée sur l'utilisation de deux domaines (i.e. emprises géographiques pour la simulation du climat) emboîtés : un premier domaine à 48 km de résolution et un deuxième domaine situé à l'intérieur de ce premier domaine avec une résolution cible de 12km. Cette résolution a ensuite été ajustée à la maille de 8 km de la grille SIM pour permettre une comparaison directe à des fins d'évaluation et de débiaisage des champs de température et de pluie. On considère ici que les données climatique SIM constituent les champs de référence du climat pour la période historique (Quintana-Segui et al., 2008). Les champs de forçage pour les projections climatiques ont été produits par le modèle climatique global CCSM4 (Bruyère et al., 2014) dans le cadre du programme international CMIP5 (Taylor et al., 2009). Trois modifications majeures ont toutefois été apportées pour essayer d'améliorer la robustesse du climat simulé et plus particulièrement des pluies :

- L'utilisation de données de forçage large échelle provenant de projections climatiques débiaisées (Monaghan et al., 2014 ; Bruyère et al., 2014);
- La prise en compte des rétroactions entre les schémas radiatif et convectif (Herwehe et al., 2014; Alapaty et al., 2012);
- 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 du modèle global CCSM4.

1.1.2 Évaluation du modèle

Les simulations ont été produites au pas de temps journalier, à la résolution de 8 km pour la quasi-totalité de la France, sans intervention de données observées exogènes. Outre la température et les précipitations, le modèle simule également les principales variables de surface permettant de faire le bilan d'énergie et de calculer l'évapotranspiration potentielle (ETP).

Pour évaluer le modèle, les données climatiques observées SIM de 1980-2005 ont été comparées aux données climatiques simulées pour cette même période par le modèle ARW/WRF forcé toutes les 6h par les données ERA/INTERIM. Ces données seront nommées dans la suite : ERA/WRF. La comparaison a été conduite à l'échelle des 7 sites pour lesquels des systèmes de culture innovants ont été conçus par des agriculteurs et d'autres experts dans l'ANR CoSAC (Cavan et al., ce numéro). Ces sites (Berry, Picardie, Eure, Champagne, Brienne, Lauragais et Béarn) couvrent un gradient latitudinal et longitudinal qui permet d'explorer divers régimes de température, de pluie et d'ETP ainsi que des contextes pédo-climatiques variés. Ils permettent également de tenir compte de la possible expression contrastée du changement climatique en fonction des territoires. Les performances du modèle sont quantifiées au pas de temps mensuel et annuel, via le coefficient de détermination (R^2) et l'erreur quadratique moyenne (RMSE).

1.1.3 Simulation des scénarios climatiques futurs

Les données du climat projeté sont nommées dans la suite CCSM4/WRF. Le climat projeté est analysé pour deux périodes de 30 ans. Un futur proche (2010-2040) et un futur lointain (2069-2099) et selon deux trajectoires de forçage radiatif RCP4.5 et RCP8.5 (Radiative Concentration Pathways – van Vuuren et al., 2011). La trajectoire RCP4.5 qui est plus vertueuse que la RCP8.5 est celle qu'il conviendrait de respecter pour rester dans le cadre de l'accord de Paris (COP21). La trajectoire RCP8.5 moins vertueuse est celle qui est actuellement suivie en terme d'émission de gaz à effet de serre (Peters et al., 2013). La période 1980-2005 est considérée comme période historique de référence à laquelle les projections pour le futur proche et le futur lointain ont été comparées. Cela permet sous hypothèse de stationnarité de s'affranchir des biais du modèle afin de ne considérer que les variations climatiques relatives (i.e. anomalies).

1.2 Le modèle "parcelle virtuelle" FLORSYS

1.2.1 Les variables d'entrée

FLORSYS est un champ virtuel sur lequel de nombreux systèmes de culture contrastés peuvent être expérimentés, avec une large gamme de mesures virtuelles sur les états des cultures, des adventices et du sol (Colbach et al., 2019 ; Colbach et al., 2020). Les variables d'entrée de ce modèle comprennent (1) une description du champ simulé, avec la météo journalière (précipitation, évapotranspiration potentielle, rayonnement, températures minimale, moyenne et maximale), la latitude et le sol (texture, profondeur, ...), (2) toutes les cultures et opérations culturales dans le champ, avec les dates, outils et options, et (3) le stock semencier initial de la flore adventice estimé à partir de relevés floristiques régionaux. Le modèle est actuellement paramétré pour 26 espèces adventices annuelles et 30 espèces cultivées. À partir de la levée des plantes, le modèle représente le couvert en 3D, simulant chaque plante cultivée et adventice individuellement. Les processus pré-levée sont simulés verticalement en 1D, à partir de la surface du sol.

1.2.2 L'effet de la météo

Les variables d'entrée jouent sur le cycle de vie des adventices et cultures, avec un pas de temps journalier. De nombreux processus sont directement impactés par les variables météo, ou indirectement via les variables d'état du sol (Tableau 1).

Tableau 1: Effets des variables météo (par jour) sur les processus du cycle de vie des cultures et adventices dans le modèle FLORSYS (Colbach et al., 2019 ; Colbach et al., 2020)

Variable d'entrée	Effet sur le cycle de vie des cultures et adventices	Paramètre-clé des espèces dans FLORSYS
A. Effets directs		
Rayonnement (J/cm ²)	Augmente photosynthèse et production de biomasse	Efficiencia de conversión del rayonnement (g MS / MJ)
	Change la morphologie des plantes en réponse à l'ombrage	5 par stade
Température moyenne (°C)	Détermine le développement, les dates de début de floraison et maturité	Température de base (°C)
	Augmente photosynthèse et production de biomasse mais une température élevée les arrête	4 seuils de températures (°C) pour le démarrage, la plage optimale et l'arrêt de la photosynthèse
Température minimale (°C)	Perte de biomasse et plantes en cas de gel	3 seuils de températures (°C) par stade pour le démarrage des pertes de biomasse et de plantes ainsi que la perte totale des plantes
Précipitation (mm)	La neige réduit les dégâts par gel	Aucun
B. Effets indirects via les variables d'état du sol (par jour et cm de sol) influencées par la précipitation, l'évapotranspiration potentielle et la température		
Potentiel hydrique (MJ)	Une augmentation du potentiel déclenche des germinations après une période sèche, un assèchement arrête la germination	Potentiel hydrique de base (MJ)
	Augmente la vitesse de germination	
	Les plantules meurent si leur racine ne traverse que des horizons secs	
Température (°C)	Augmente la vitesse de germination	Température de base (°C) et 2 paramètres de germination
	Augmente la vitesse de croissance pré-levée	Température de base (°C) et 1 paramètre de croissance
	Augmente la vitesse de croissance du système racinaire avant et après levée	Température de base et optimale (°C)

Les stades pré-levée (semences viables, dormantes et en cours de germination, plantules non levées) dépendent de la structure, température et potentiel hydrique du sol. Les processus post-levée (ex. photosynthèse, respiration, croissance, réponse à l'ombrage) dépendent du rayonnement disponible et de la température de l'air. À la maturité des plantes, les semences adventices sont rajoutées au stock semencier dans le sol, les graines des cultures sont récoltées et le rendement calculé. La version actuelle de FLORSYS se focalise sur la compétition plante-plante pour la lumière, l'effet du stress hydrique n'est considéré que pour les processus pré-levée ; les autres stress abiotiques (ex., azote) sont négligés. L'effet des fortes températures est inclus, avec un arrêt de la photosynthèse.

1.2.3 L'effet des techniques culturales

Les processus du cycle de vie sont modulés en fonction des techniques culturales, des caractéristiques biologiques de chaque semence ou plante, et de leur environnement qui dépend lui-même du pédoclimat, des techniques culturales et de la présence de plantes voisines. Par exemple, les probabilités de survie des plantes adventices sont calculées en fonction des (1) opérations culturales (travail du sol, herbicides, désherbage mécanique, fauche, récolte) et de leurs options (ex. profondeur, outil et vitesse de travail du sol), (2) des états du milieu (ex. humidité du sol, densité du couvert), et (3) de la morphologie, du stade et, dans les cas des herbicides, du génotype de la plante. Ensuite, cette probabilité est comparée à une probabilité tirée au hasard pour déterminer si la plante meurt ou survit.

1.2.4 Des critères d'évaluation conçus avec les acteurs

L'approche mécaniste de FLORSYS permet de produire, pour chaque système de culture sur la durée de simulation, des sorties très détaillées (par jour et en 3D) semblables à des mesures réalisées sur des couverts réels dans des champs expérimentaux ou agricoles. Ces sorties sont essentielles pour comprendre le fonctionnement de l'agroécosystème et diagnostiquer la performance des systèmes de culture testés.

Pour simplifier la comparaison des systèmes de culture, ces sorties journalières 3D sont traduites en indicateurs d'impact annuels des adventices sur la production (ex. perte de rendement, contamination des récoltes par des semences et débris adventices...) et la biodiversité (ex. richesse spécifique de la flore sauvage, contribution à nourrir les abeilles domestiques...). Ces indicateurs ont été développés avec des différents acteurs (conseillers, agriculteurs, agronomes, écologues) (Mézière et al., 2015).

Ici, certains indicateurs ont été simplifiés pour accélérer les simulations. Par exemple, l'utilisation du ratio de biomasse adventice divisée par la biomasse des cultures au début de la floraison de la culture en tant que proxy de la perte de rendement (Colbach et Cordeau, 2018) évite de faire des simulations sans adventices pour estimer le rendement potentiel. Les différents indicateurs d'offre trophique par les adventices à différentes guildes (oiseaux, carabides, pollinisateurs) ont été agrégés en un seul indicateur de ressource trophique pour simplifier la présentation des résultats.

Dans le cadre de ce travail, nous avons de plus développé un nouvel indicateur LR avec les agriculteurs pour refléter le manque de résilience d'un système (Cavan et al., ce numéro). Il s'agit du produit de la fréquence des pics d'adventices et de la durée de chaque pic, sommé sur la durée N de la simulation:

$$LR = \sum_{y=1}^{30} p_y \cdot L_y$$

$$\forall y \in [2, N]^+ \begin{cases} p_y = 1 \text{ if } \begin{cases} BR_y > 1.01 \\ BR_y > BR_{y-1} \end{cases} \\ p_y = 0 \text{ otherwise} \end{cases}$$

Le début d'un pic est défini comme une année y où le proxy de perte de rendement (BR_y =ratio de biomasse adventices vs biomasse cultivée) dépasse à la fois un seuil critique (=1.01, correspondant à une perte de rendement > 50%) (Colbach et Cordeau, 2018) et la valeur du proxy de l'année précédente. La longueur d'un pic L_y est définie comme le nombre d'années depuis le début dont le proxy dépasse le seuil.

1.2.5 Domaine de validité

FLORSYS a été évalué ("validé") à dire d'experts et en comparaison à des observations de terrain d'adventices (densité, biomasse, stock semencier) et de cultures (densité, biomasse, rendement) dans une large gamme de systèmes et de pédoclimats (Colbach et al., 2016). Généralement, le rendement, les stocks semenciers et les densités adventices observés sont correctement prédits et classés en fonction des systèmes de culture et des espèces adventices, surtout à l'échelle de la rotation. Les pertes de rendement plus élevées en simulation que sur le terrain sont surtout dues au plan de simulation et non pas à une déficience du modèle. En effet, le plan de simulation n'adapte pas les pratiques aux flores simulées ni aux variations inter-annuelles de la météo (comme le feraient les agriculteurs) afin de dissocier l'effet des pratiques culturales sur les adventices de celui de la flore en place sur les décisions de gestion (Colbach et Cordeau, 2018).

1.3 Simulations avec le modèle FLORSYS

1.3.1 Origine des systèmes de culture simulés

Les systèmes innovants utilisés dans cette étude sont issus de trois démarches de conception différentes (Cavan et al., ce numéro):

- (i) *Les systèmes innovants du projet Syppre¹*: pour chaque plateforme expérimentale (Béarn, Berry, Champagne, Lauragais et Picardie), 10 à 15 personnes ont participé à la conception de systèmes de culture innovants, comprenant des agriculteurs, des acteurs des filières et des experts locaux. Le système innovant le plus prometteur a été sélectionné pour être mis en place sur la plateforme et testé ici en simulation, en plus d'un système témoin représentatif de la région (Toqué et al., ce numéro).
- (ii) *Ateliers de co-conception collective* : conception par un groupe d'agriculteurs (Aube) d'un ou plusieurs systèmes de culture innovant à partir d'un système de référence local, en mobilisant des apports de connaissances ponctuels par des experts et un outil d'aide à la conception (Van Inghelandt et al., 2019).
- (iii) *Co-conception de systèmes innovants pour chaque système pratiqué d'un groupe d'agriculteurs DEPHY Ferme (Eure)* : démarche similaire à celle du point (ii), mais s'inscrivant sur un temps plus long (plusieurs années) (Cavan et al., ce numéro).

Au total, les trois méthodes de conception ont abouti à 24 systèmes de culture innovants, en plus des 18 systèmes de culture initiaux.

1.3.2 Plan de simulation et analyses statistiques

Cinq séries de simulations ont été réalisées, une avec le climat passé (1980-2005), deux avec le climat de la période 2010-2040 et les trajectoires RCP4.5 et RCP 8.5, respectivement, et deux autres avec le climat 2069-2099 et ces mêmes deux trajectoires. Dans chaque série, chaque système de culture a été simulé sur 30 ans, et répété avec dix scénarios climatiques dont les données proviennent de la période (1980-2005, 2010-2040 ou 2069-2099) et la trajectoire (passé, RCP4.5 ou RCP 8.5) de la série.

Pour discriminer les effets du changement climatique de ceux des contextes agronomiques et pédoclimatiques très variés qui caractérisent notre échantillon de systèmes de culture, les analyses statistiques ont porté sur les évolutions des indicateurs entre la série de référence et les séries du futur. Au lieu d'analyser chaque indicateur d'impact de la flore adventice *I* (section 2.2.4), nous avons utilisé la

¹ Programme d'essais longue durée avec des systèmes de culture innovants répondant à trois objectifs : la productivité physique, la rentabilité économique et l'excellence environnementale. <https://syppre.fr/>

différence $d = I_{\text{futur}} - I_{\text{référence}}$. Pour décrire de manière synthétique chaque système de culture, 24 descripteurs ont été calculés, selon les grandes thématiques suivantes : (i) diversité de la succession des cultures ; (ii) opérations de travail du sol ; (iii) couverture du sol en interculture ; (iv) implantation de la culture de rente ; (v) désherbage mécanique et (vi) utilisation d'herbicides.

Les données ont été analysées en trois temps. Tout d'abord, une Analyse en Composantes Principales (ACP) a été réalisée pour identifier les corrélations entre indicateurs d'impact des adventices. Celle-ci était associée à une Classification Ascendante Hiérarchique (CAH) pour identifier les principales différences entre méthodes de conception du point de vue de la gestion des adventices (*FactoMineR* v1.36). Enfin, les descripteurs des systèmes de culture et de l'évolution du climat ont été projetés comme variables quantitatives supplémentaires dans l'ACP et la CAH pour décrire les principales différences de pratiques culturales entre les classes identifiées par la CAH.

2. Résultats et discussion

2.1 Performance et validation du modèle climatique

Comme espéré, les résultats montrent que ERA/WRF reproduit très bien la variabilité inter-annuelle des T_{min} et des T_{max} (Figure 1). L'alignement des données autour de la droite 1:1 indique que la géographie des températures est très bien reproduite et tient compte du gradient latitudinal avec des températures en moyenne plus chaudes pour les stations du sud de la France (Lauragais et Béarn) comparativement aux 5 stations situées plus au nord. Cela est confirmé par des valeurs de R² significatives entre 0,78 et 0,94 pour les T_{max} et entre 0,69 et 0,92 pour les T_{min}. Les performances sont systématiquement plus élevées pour les T_{max} que pour les T_{min}. Ces dernières sont plus dépendantes des conditions physiographiques locales (topographie, occupation du sol, encaissement etc.) que la résolution de 8km du modèle a du mal à appréhender. Les phénomènes d'inversion thermique sont par exemple mal reproduits ce qui peut expliquer cet écart. Les RMSE varient entre 0,2°C et 0,36°C pour les T_{max} et entre 0,19°C et 0,3°C pour les T_{min}. Les erreurs les plus élevées et les corrélations les plus faibles sont observées sur les stations du Lauragais et du Béarn.

Le modèle est moins performant pour prédire les cumuls annuels de pluie (R² entre 0,57 et 0,75, RMSE < 10% du volume annuel moyen des pluies) et de l'ETP (R² entre 0,38 et 0,72), mais avec une amélioration significative comparativement à des travaux précédents (Boulard et al., 2016). La prédiction de l'ETP est la pire pour les sites du Lauragais et du Béarn (R² entre 0,38 et 0,43, RMSE entre 118 mm et 202 mm). Pour ces deux sites, et particulièrement pour le Béarn, l'ETP SIM est fortement surestimée. L'analyse des différents processus simulés par le modèle a permis d'identifier les causes de cette faible qualité de prédiction mais pas encore de solution pour améliorer cette qualité.

Pour chaque site, le cycle annuel des températures calculées au pas de temps mensuel est également très bien reproduit (R² > 0,95). La RMSE montre des valeurs plus élevées (entre 0,5°C et 1°C pour les T_{max} et entre 0,8°C et 1,7°C pour les T_{min}) qu'au pas de temps annuel traduisant une sous-estimation des T_{max} pour les mois les plus chauds et une surestimation des T_{min} pour les mois les plus froids. Pour la pluie la répartition annuelle est également bien prédite (R² entre 0,56 et 0,72). C'est pour le site du Lauragais que le score est le plus faible. Ceci est en lien avec la part plus importante des pluies convectives (i.e. orages) qui sont plus difficiles à simuler. La RMSE des pluies et de l'ETP est comprise entre 19 mm et 33 mm et entre 8 mm et 20 mm respectivement. Les valeurs les plus élevées sont observées comme pour l'échelle annuelle sur les deux stations du sud de la France (Béarn et Lauragais).

Ce panorama montre que la descente d'échelle climatique permet de reproduire fidèlement le climat pour chacun des sites. Même si des performances plus contrastées sont observées pour l'ETP, le design du modèle ARW/WRF utilisé pour ces simulations améliorent significativement, tant pour l'ETP que pour la pluie, la robustesse du climat produit. Les traits du climat nécessaires pour les simulations avec le modèle FLORSys sont correctement reproduits.

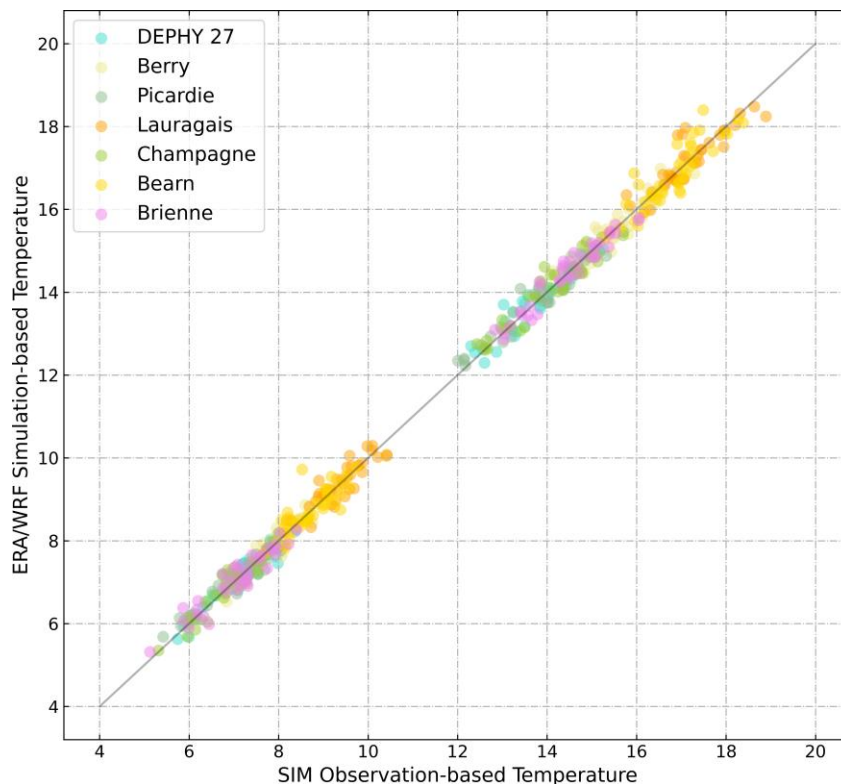


Figure 1 : Comparaison des moyennes annuelles des températures maximales et minimales observées SIM vs. simulées ERA/WRF pour la période 1980-2016 et 7 sites. Chaque point correspond à une année pour une station et pour une maille de 8km x 8km. La droite représente la première bissectrice ($y=x$)

2.2 Amplitude et patrons de l'évolution régionalisée du climat sont plus marqués dans la deuxième partie du 21^e siècle

2.2.1 A l'échelle inter-annuelle et de chaque site d'étude

La Figure 2 présente les résultats des projections de l'évolution des T_{min} et des T_{max} selon la trajectoire RCP85. Les résultats pour la RCP45 sont similaires pour le futur proche et différent pour le futur éloigné principalement sur l'amplitude des modifications. Les résultats montrent un réchauffement généralisé. Pour les T_{min}, peu de différences sont observables entre les sites. Les valeurs médianes sont positives et sont comprises entre +0,6°C et +0,8°C. Les sites de Brienne, de Champagne et du Lauragais ont un réchauffement légèrement plus important comparativement aux autres sites. Ces sites sont moins sous l'influence océanique ; Brienne et Champagne ont aussi des hivers plus frais. En moyenne les T_{max} se sont plus réchauffées sur cette période que les T_{min}. Les 2 sites du sud de la France (Bearn et Lauragais) ont le réchauffement des T_{max} le plus marqué (+1°C pour la médiane) alors que les 5 autres sites montrent un réchauffement entre +0,6°C et +0,8°C similaire à celui des T_{min}.

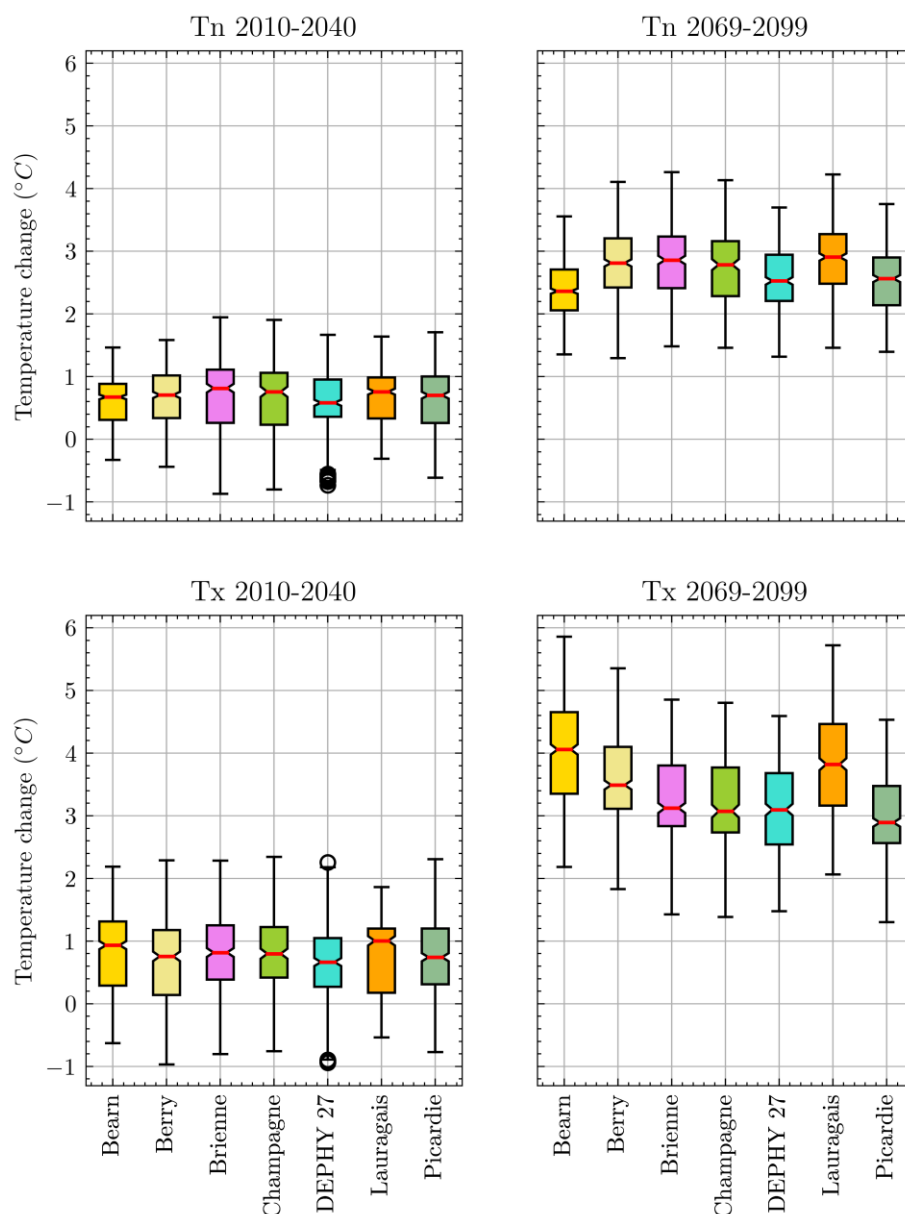


Figure 2 : Boîtes à moustaches des anomalies des moyennes annuelles des températures minimales (Tmin) et maximales (Tmax) pour les 7 sites, pour le futur proche (2010-2040) et le futur lointain (2069-2099) selon la trajectoire de forçage radiatif RCP85. Le trait rouge indique la médiane.

L'amplitude et les contrastes du réchauffement sont beaucoup plus marqués pour le futur lointain. Là aussi les Tmax se réchauffent plus que les Tmin. Pour ces dernières se sont également les sites du Lauragais, de la Brienne et de la Champagne qui montrent le réchauffement le plus marqué avec environ +3°C. Le réchauffement est plus contrasté sur les Tmax. Excepté pour les sites du Béarn et du Lauragais le réchauffement des Tmax est plus important de quelques dixièmes de degrés comparativement aux Tmin. Pour les deux sites du sud de la France, ce différentiel est plus important puisqu'il atteint +1°C par rapport aux Tmin. Ces résultats montrent que pour les Tmax on observe un gradient thermique marqué Nord-Sud (latitudinal) du réchauffement alors que pour les Tmin, se dégage, mais moins nettement, un gradient thermique Est-Ouest (i.e. méridien) (Terray et Boé, 2013). Pour les Tmax la variabilité est également accentuée pour le futur lointain. Globalement, et à l'échelle annuelle, on se situe sur un réchauffement d'environ +4°C en fin de siècle. Ce réchauffement s'exprime principalement dans la deuxième partie du 21^e siècle et il est fortement dépendant de la trajectoire de forçage radiatif. Sur la

première partie il n'y a pas un 'effet trajectoire' et les incertitudes sont principalement portées par la variabilité interne et la physique des modèles (Lehner et al., 2020). Pour la pluie (résultats non montrés) il n'y a pas une tendance significative pour le futur proche. Les médianes sont légèrement au-dessus de 0 (plus de pluie) pour les 5 sites au nord de la France alors qu'elles se situent légèrement en dessous de 0 (moins de pluie) pour les 2 sites du sud de la France. On observe par contre une très forte variabilité inter-annuelle en particulier pour les sites du Béarn et du Lauragais. Pour le futur lointain, un assèchement de l'ordre de -250 mm de pluie par an est net pour les sites du Béarn et Lauragais. La même tendance est observée également pour les sites du Berry et de DEPHY27 (Eure) mais d'amplitude moins forte (~-100 mm). Pour les sites de Brienne, de Champagne et de Picardie, aucune tendance n'est observée. Cela s'accompagne pour tous les sites d'une réduction de la variabilité inter-annuelle. En lien avec le réchauffement, on observe une augmentation de la demande évaporative (i.e. augmentation de l'ETP) sur tous les sites. Outre que l'augmentation est plus marquée pour le futur lointain (> +100mm) on observe également une plus forte variabilité entre sites. Ainsi les sites du Berry, du Béarn et du Lauragais montrent une augmentation de l'ETP de respectivement +160 mm, +180 mm et +210 mm avec une plus grande variabilité inter-annuelle. Combiné avec l'évolution des pluies cela va mécaniquement conduire à une modification du cycle de l'eau (i.e. accélération) et à une mise en tension plus importante (Milly et al., 2008).

2.2.2 A l'échelle du cycle annuel tous sites confondus

A l'échelle du cycle annuel, le réchauffement des Tmax par exemple (Figure 3) fait apparaître pour le futur proche une augmentation pour la quasi-totalité des mois exceptés janvier et novembre. Si sur cette période le mois d'août est celui qui se réchauffe le plus, aucun patron particulier de changement sur le cycle annuel n'est observable. Ce n'est pas le cas pour le futur lointain où, outre un réchauffement généralisé, un patron net apparaît. En effet les mois de mai à octobre sont plus fortement impactés et plus particulièrement juillet, août et septembre où le réchauffement atteint pour cette période + 5°C. Pour les Tmin on observe les mêmes tendances que pour les Tmax mais d'amplitude et avec un motif moins marqué. Ces résultats confirment, comme cela a été observé sur le passé récent et suite à la rupture de 1987/1988, que le réchauffement est principalement porté par les Tmax (Brulebois et al., 2015). Par contre nos résultats montrent que ce sont les étés qui se réchauffent plus que les printemps alors que pour le réchauffement observé au cours des 60 dernières années c'est le contraire qui a été observé. Avec l'humidité relative et le rayonnement, les Tmax sont une des variables climatiques à laquelle l'ETP est la plus sensible. Cette dernière montre une évolution similaire à celle des températures. On observe l'augmentation de la demande évaporative qui débute à partir du mois de mai dans le futur proche et est présente dès janvier pour le futur lointain avec une augmentation significative dès mars. Outre que l'augmentation qui peut atteindre +30 mm par mois pour juillet et août c'est l'étendue de la période où la demande évaporative augmente qui est significativement élargie. Ainsi la végétation et les cultures en particulier seront soumises très tôt et plus tardivement à des contraintes hydriques qui seront amplifiées au printemps et surtout en été. Parallèlement à cela, le cycle annuel des pluies montre une stabilité dans le futur proche (Figure 4) avec un léger assèchement pour juillet, août et septembre et plus de pluie sur novembre, décembre et janvier.

Pour le futur lointain on observe une tendance moyenne globale à moins de pluie. Si les mois de décembre et janvier affichent un peu plus de pluie, on observe à partir d'avril et jusqu'au mois de novembre moins de pluie. Le déficit se creuse sur les mois de juillet, août et septembre, mois pour lesquels la demande évaporative augmente.

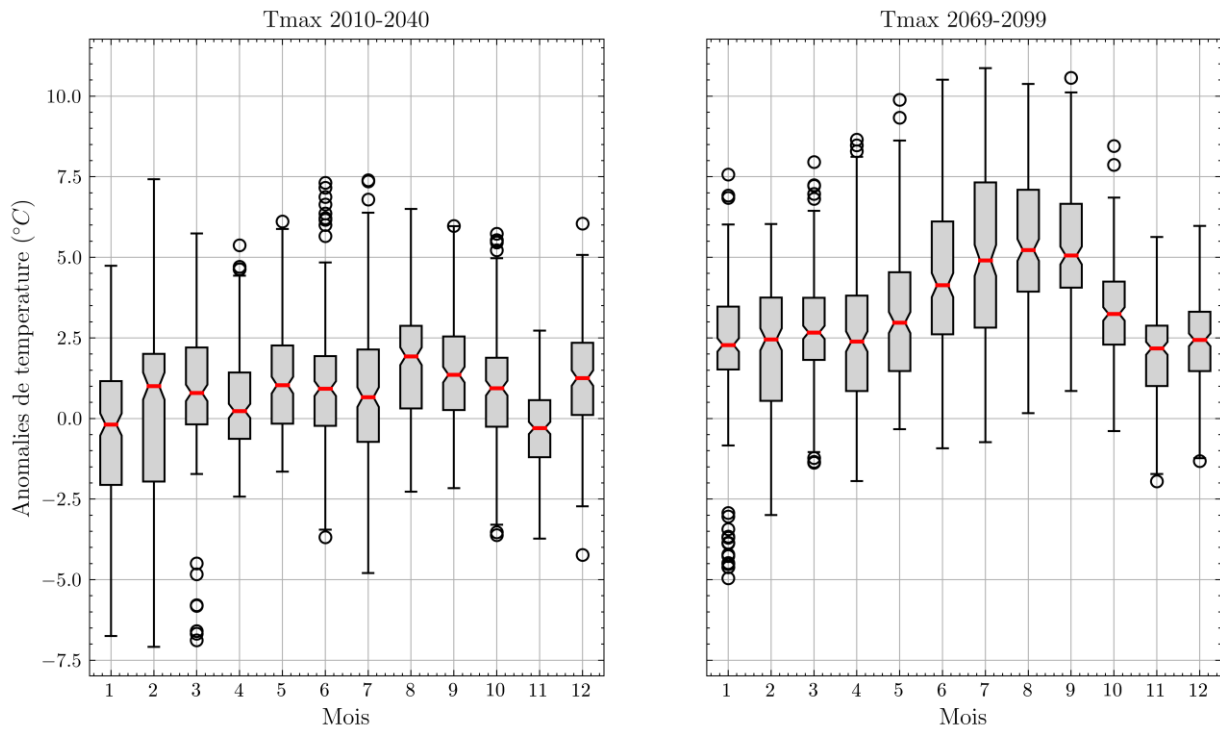


Figure 3 : Boîtes à moustaches du cycle annuel des anomalies des températures maximales (Tmax) calculées au pas de temps mensuel pour toutes les années et tous les sites confondus. Futur proche (gauche) et le futur lointain (droite). Le trait horizontal rouge indique la médiane.

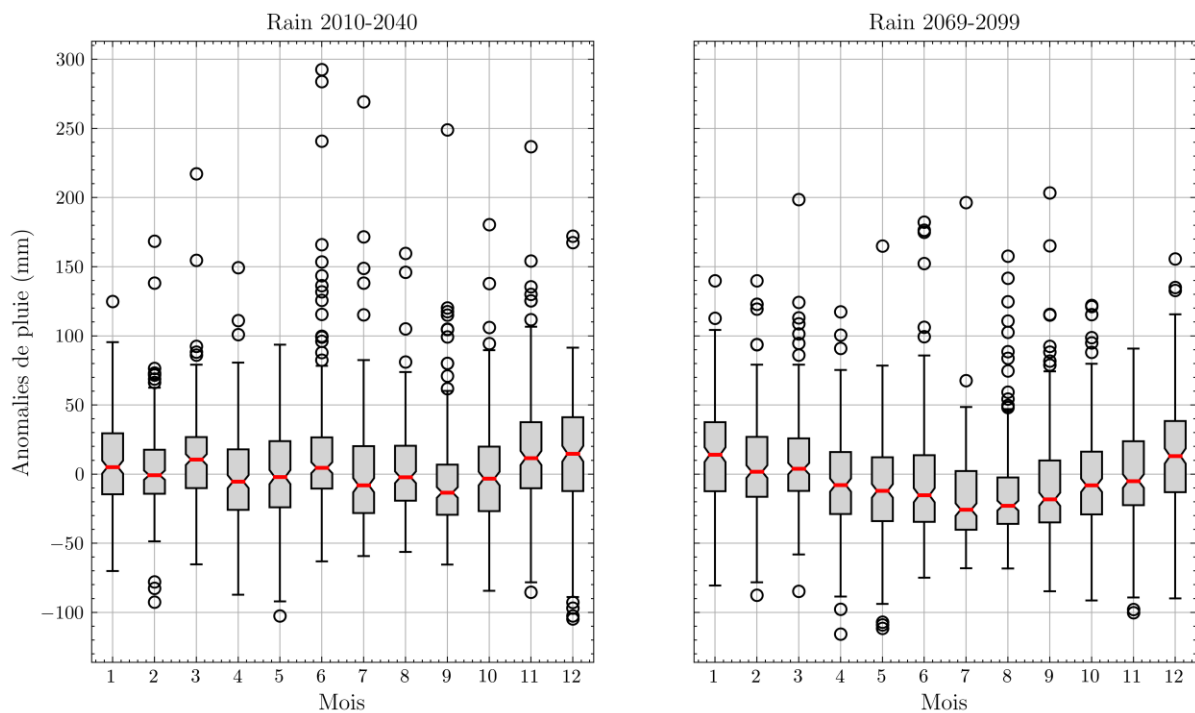


Figure 4 : Boîtes à moustaches du cycle annuel des anomalies de la pluviométrie calculées au pas de temps mensuel pour toutes les années et tous les sites confondus. Futur proche (gauche) et le futur lointain (droite). Le trait horizontal rouge indique la médiane.

Cette superposition de moins de pluie et plus d'évapotranspiration va exacerber les contraintes sur l'eau et possiblement le stress hydrique des cultures. A cela va s'ajouter les coups/vagues de chaleur (Figure 3) avec plus de la moitié des mois de juillet et d'août qui auront des Tmax plus chaudes de plus de +5°C. A contrario, nos résultats montrent que les excès d'eau sont plus nombreux que les forts déficits. Cela suggère la survenue d'événements extrêmes tant sur les températures (vagues de chaleur, coups de chaud) que sur les pluies (orages intenses, crues). Pour les pluies et sur le climat du passé récent il n'y a pas de cycle marqué. En contexte de changement et pour le futur lointain un cycle annuel plus prononcé est à attendre selon la trajectoire RCP85 et la projection réalisée par le modèle CCSM4. Ce cycle est en opposition avec le renforcement du cycle des températures et surtout de l'ETP. Ces conditions climatiques plus contrastées nécessitent d'être analysées pour chacun des sites afin d'intégrer ce contexte changeant dans la conception de systèmes de culture innovants et adaptés aux nouvelles conditions de ces territoires.

2.3 La nuisibilité des adventices pour la production augmente avec le changement climatique

En cas de changement climatique, la perte de rendement due aux adventices augmente globalement (Figure 5.A). Alors qu'avec le climat historique, l'essentiel des systèmes de culture x répétitions climatiques présentait une biomasse adventice plus faible que la biomasse cultivée, environ la moitié des systèmes dépassaient le seuil de 1 pour le ratio de biomasse adventice vs cultivée pendant la première moitié du 21^e siècle, indépendamment de la trajectoire climatique utilisée. L'augmentation est bien plus forte pendant la deuxième moitié du siècle où l'ensemble des situations dépassent ce seuil, avec une augmentation significativement plus élevée avec la trajectoire climatique la plus pessimiste, c'est-à-dire la RCP8.5.

L'évolution du manque de résilience est similaire (Figure 5.B). L'augmentation de cet indicateur est négligeable pendant la première moitié du siècle, indépendamment de la trajectoire climatique utilisée. L'augmentation est bien plus forte pour la deuxième moitié, avec un doublement de l'indicateur pour la trajectoire la moins pessimiste (RCP4.5) et presque'un triplement pour la trajectoire la plus pessimiste (RCP8.5).

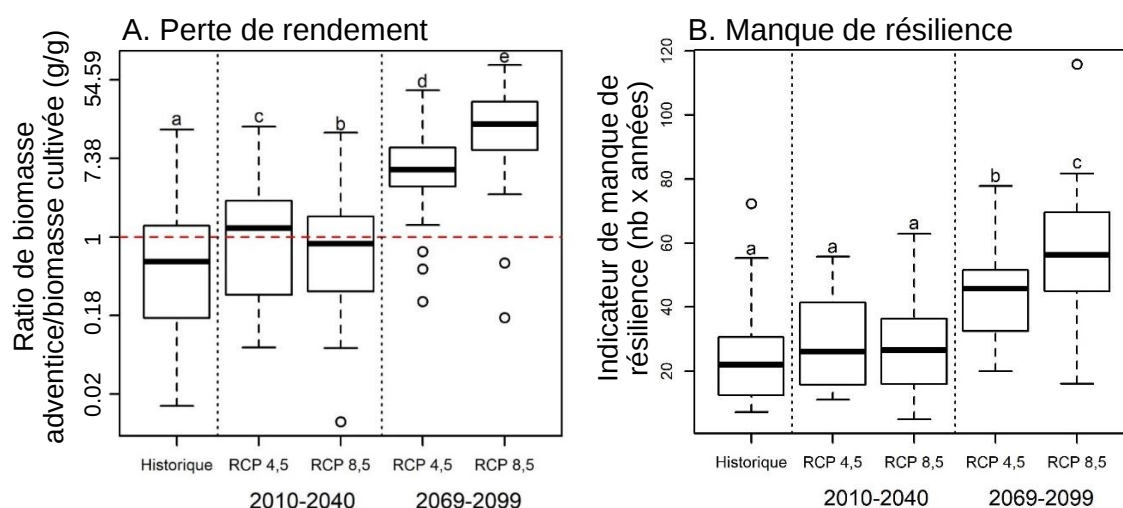


Figure 5 : Évolution de la nuisibilité de la flore adventice pour la production simulée avec FLORSYS en cas de changement climatique, en fonction de la trajectoire de changement (RCP4.5 ou RCP8.5) et du temps (première ou deuxième moitié du 21^e siècle). Boîtes à moustaches montrant la distribution du (A) proxy de la perte de rendement en moyenne sur la rotation, (B) manque de résilience, i.e. le cumul du nombre et durée des pics d'adventices sur la rotation. Les moyennes des boîtes d'un graphique, superposées des mêmes lettres ne sont pas significativement différentes à $p=0.05$.

2.4 L'augmentation de la nuisibilité des adventices due au changement climatique s'accompagne d'une augmentation d'offre trophique à la faune sauvage mais pas de biodiversité végétale

Pendant la première moitié du siècle, les systèmes de culture avec une forte augmentation de perte de rendement en cas de changement climatique (PR dans la Figure 6.A) sont aussi ceux dont la contamination de récolte (CR) augmente fortement avec le changement climatique. Ces systèmes tendent aussi à avoir un plus grand manque de résilience (MR) et une meilleure offre trophique pour la faune sauvage (OT). Par contre, l'évolution de la biodiversité végétale (RS et EF) n'est pas corrélée à cette augmentation de nuisibilité de la flore adventice. Dans la deuxième moitié du siècle, les corrélations entre augmentations de la nuisibilité et de l'offre trophique se resserrent encore (Figure 6.C). Les trajectoires de biodiversité restent toujours indépendantes de celles de la nuisibilité.

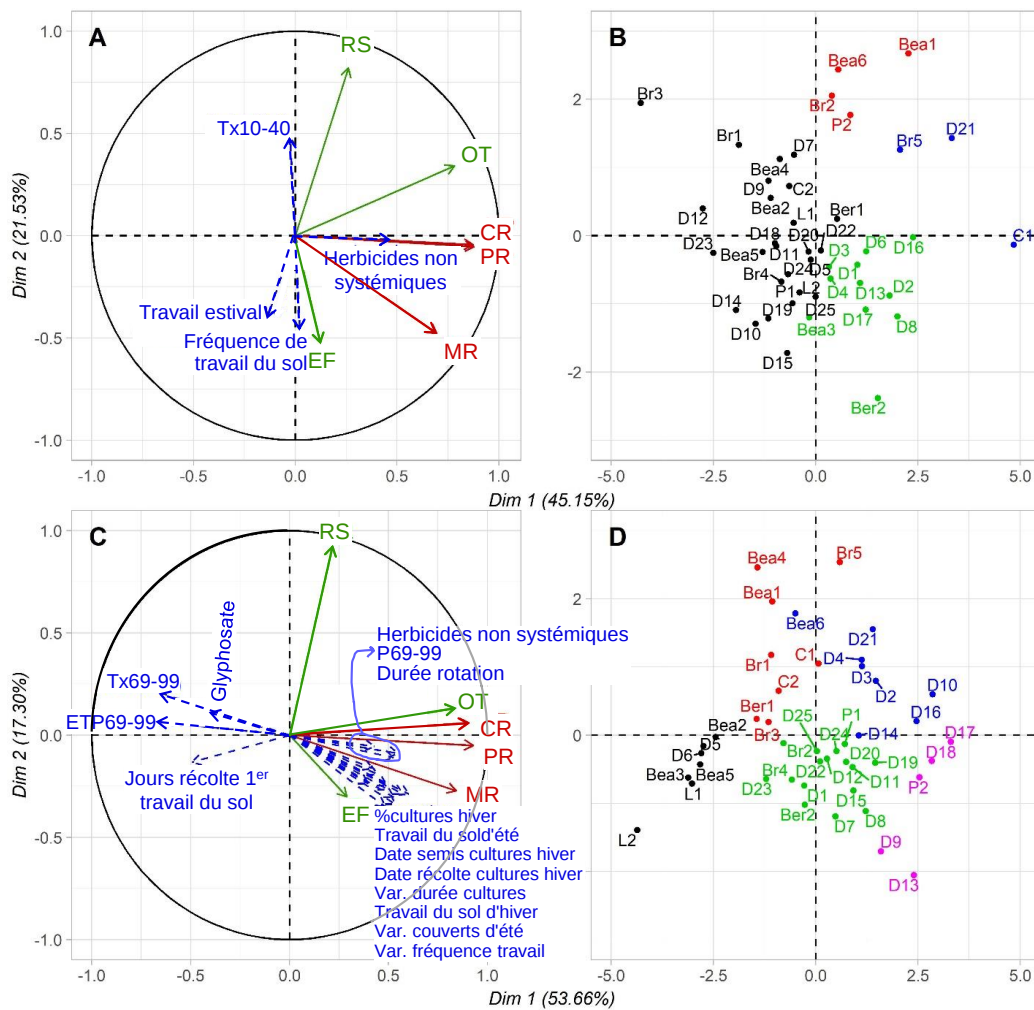


Figure 6 : Impact du changement climatique (trajectoire RCP 8.5) sur l'impact de la flore adventice sur la production (PR = perte de rendement, CR = contamination de récolte, MR = manque de résilience du système) et la biodiversité (RS = richesse spécifique de la flore, EF = équitabilité de la flore, OT = offre trophique pour faune sauvage). Analyse en Composantes Principales sur la différence entre les valeurs des indicateurs des simulations sous changement climatique (A et B, 2010-2040 ; C et D, 2069-2099) et des simulations avec climat passé, associée à une Classification Ascendante Hiérarchique (B et D). Les couleurs des figures B et D représentent les clusters issus de la classification (1=noir, 2=rouge, 3=vert, 4=bleu, 5=violet), en distinguant les méthodes de conception et régions (D: groupe d'agriculteurs DEPHY de l'Eure, Br=groupe d'agriculteurs de l'Aube, Bea, Ber, C, L et P=SYPPRE du Béarn, Berry, Champagne, Lauragais, Picardie). Les flèches bleues représentent des variables supplémentaires décrivant les pratiques culturales et les évolutions principales des variables climatiques entre climat futur et passé (Tx=température maximale, ETP=évapotranspiration potentielle, P=précipitation)

2.5 L'effet du changement climatique est associé à différentes anomalies climatique au fil du siècle

L'impact du changement climatique sur les trajectoires de nuisibilité et biodiversité liées à la flore adventice ne peut pas être lié à une origine particulière des systèmes de culture. En effet, les clusters des Figures 6.B et 6.D sont tous constitués par des systèmes provenant de différentes régions et/ou méthodes de conception de systèmes de culture.

Pendant la première moitié du siècle, l'augmentation de la température maximale pendant cette même période est l'anomalie climatique clé liée aux évolutions de l'impact de la flore adventice (Tx10-40 sur la Figure 6.A). Cette anomalie est le plus fortement corrélée à l'augmentation de la richesse spécifique, mais sans lien à l'évolution de la nuisibilité de la flore. Les plus fortes températures favorisent l'installation d'adventices printanières et estivales au dépend des espèces hivernales. Celles-ci étaient jusqu'à présent dominantes, grâce à leur période de croissance plus longue, mais leur photosynthèse est maintenant plus fréquemment limitée par la chaleur (Tableau 1).

L'effet de l'augmentation de la température maximale pendant la deuxième moitié du siècle n'est plus le même (Figure 6.C). Il n'y a plus de corrélation avec la richesse spécifique. Par contre, l'augmentation de la température, associée à une augmentation de l'évapotranspiration (ETP69-99) et une réduction de la précipitation (P69-99) réduit la nuisibilité des adventices et leur contribution à nourrir la faune sauvage. En effet, les conditions plus sèches limitent la levée des adventices, surtout celle des printanières et estivales (même si elles sont plus adaptées aux températures plus élevées), qui ont souvent un besoin plus élevé d'eau pour germer et lever (Gardarin et al., 2010).

2.6 Travail du sol et herbicides modulent l'effet du changement climatique

Le travail du sol et les herbicides sont les deux techniques culturales qui modulent l'effet du changement climatique sur les adventices dès la première moitié du siècle (Figure 6.A). Une fréquence élevée d'herbicides non systémiques (dont l'efficacité est fortement amoindrie sur des couverts denses) est associée à une forte augmentation de la nuisibilité de la flore adventice. Une fréquence élevée de travail du sol, notamment en été, est par contre associée à une réduction de la richesse spécifique de la flore.

Pendant la deuxième moitié du siècle, les herbicides non-systèmeux avec leur efficacité plus faible continuent à promouvoir l'augmentation de la nuisibilité liée au changement climatique tandis que le très efficace glyphosate tend à réduire cette augmentation (Figure 6.C). Il en est de même pour le retard du premier travail du sol qui améliore l'efficacité du faux semis (Labreuche et al., ce numéro). Que l'allongement de la rotation soit associé à une augmentation de la nuisibilité est contre-intuitif à première vue. Cependant, cette relation est ici tirée par le passage de nombreux systèmes de monocultures de maïs du Béarn à des rotations plus diversifiées incluant des cultures hiver (voir aussi la corrélation entre % de cultures d'hiver dans la rotation et la variabilité des durées des cultures avec l'augmentation du manque de résilience MR). Or, ces dernières sont moins adaptées au changement climatique, particulièrement puisque la flore adventice glisse d'une flore dominée par des hivernales vers une flore plus estivale. L'augmentation du manque de résilience avec le retard des dates de semis et de récolte des cultures d'hiver va dans ce même sens.

L'autre corrélation surprenante est l'augmentation du manque de résilience en cas de travail du sol, que ce soit en été ou en hiver. Cela pourrait indiquer que le travail du sol est un levier de gestion des adventices moins efficace dans un contexte de changement climatique. En effet, son effet est très sensible à la date, notamment en relation avec l'humidité du sol : un travail du sol en conditions humides va lever des dormances et stimuler des germinations, deux processus impossibles lorsque le sol est sec (Gardarin et al., 2012) ; le travail du sol arrache aussi plus d'adventices en sol humide que sec (Colbach et al., 2010).

Conclusion

La descente d'échelle dynamique avec ARW/WRF mise en œuvre dans ce travail a permis de produire une régionalisation climatique robuste et utile pour tenir compte des spécificités des territoires. A ces échelles s'opèrent des découplages climatiques locaux (Daly et al., 2010) pouvant amplifier ou atténuer les caractéristiques du changement climatique dont il convient de tenir compte. Nos résultats montrent pour les trajectoires RCP45 et RCP85 un réchauffement plus important des Tmax que des Tmin. Ce réchauffement est plus marqué pour la deuxième moitié du 21^e siècle selon le RCP85. Cela s'accompagne d'une plus forte demande évaporative alors que les pluies ne montrent pas de tendance nette haussière ou baissière dans le futur proche. Pour le futur lointain, une diminution globale des pluies est à attendre avec une augmentation de l'ETP. Pour cette dernière cela recouvre un élargissement de la période qui se double d'une forte augmentation de l'ETP sur la fin du printemps et les mois d'été. Ce double phénomène qui s'accompagne de moins de pluie, en moyenne, va amplifier les contraintes hydriques et probablement le stress pour les plantes et les cultures en particulier. La variabilité géographique de la modification des patrons du cycle annuel doit être analysée plus avant ainsi que les biais dans les simulations. La conception de systèmes innovants nécessite donc de prendre en compte ce contexte changeant pour tester leur résilience. Le travail de simulation avec le modèle FLORSys a montré que globalement la nuisibilité des adventices devrait augmenter en cas de changement climatique. Les premiers résultats indiquent que ce ne seront plus les mêmes leviers agronomiques qui permettront de contrôler la nuisibilité de la flore adventice. Ceci est particulièrement vrai pour les cultures de printemps et d'été qui sont actuellement implantées pour diversifier les rotations et "casser" le cycle des adventices. En effet, ces cultures sélectionnent des adventices particulièrement adaptées au réchauffement climatique. Cependant, ces simulations devront encore être complétées, notamment en intégrant le stress hydrique qui deviendra aussi plus fréquent. Ce type de stress sélectionnera certainement d'autres types d'adventices, et d'autres leviers de gestion devront être mobilisés.

Remerciements

Le présent travail a été financé par INRAE, le projet PSDR Prosys, le projet ANR CoSAC (ANR-15-CE18-0007). Les simulations climatiques régionales ont été effectuées en utilisant les ressources HPC de DNUM CCUB (Centre de Calcul de l'Université de Bourgogne).

Références bibliographiques

- Alapaty K., Herwehe J.A., Otte T.L., Nolte C.G., Bullock O.R., Mallard M.S., Kain J.S., Dudhia J., 2012. Introducing subgrid-scale cloud feedbacks to radiation for regional meteorological and climate modeling. *Geophys. Res. Lett.*, 39, n/a–n/a, <https://doi.org/10.1029/2012GL054031>.
- Boé J., Terray L., Habets F., Martin E., 2007. Statistical and dynamical downscaling of the Seine basin climate for hydro-meteorological studies. *Int. J. Climatol.*, 27, 1643–1655, <https://doi.org/10.1002/joc.1602>.
- Boulard D., Castel T., Camberlin P., Sergent A.-S., Bréda N., Badeau V., Rossi A., Pohl B., 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>.
- Brulebois E., Castel T., Richard Y., Chateau-Smith C., Amiotte-Suchet P., 2015. Hydrological response to an abrupt shift in surface air temperature over France in 1987/88. *J. Hydrol.*, 531, 892–901, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.10.026>.
- Bruyère C.L., Done J.M., Holland G.J., Fredrick S., 2014. Bias corrections of global models for regional climate simulations of high-impact weather. *Clim. Dyn.*, 43, 1847–1856, <https://doi.org/10.1007/s00382-013-2011-6>.

- Cavan N., Omon B., Tailleur A., Dubois S., Queyrel W., Van Ingheland B., Colbach N., Angevin F., 2020. Comparaison de méthodes de conception de systèmes de culture innovants pour la gestion durable des adventices. *Innovations Agronomiques* 81, 189-200
- Colbach N., Kurstjens D.A.G., Munier-Jolain N.M., Dalbiès A., Doré T., 2010. Assessing non-chemical weeding strategies through mechanistic modelling of blackgrass (*Alopecurus myosuroides* Huds.) dynamics. *European Journal of Agronomy* 32, 205-218.
- Colbach N., Bertrand M., Busset H., Colas F., Dugué F., Farcy P., Fried G., Granger S., Meunier D., Munier-Jolain N.M., Noilhan C., Strbik F., Gardarin A., 2016. Uncertainty analysis and evaluation of a complex, multi-specific weed dynamics model with diverse and incomplete data sets. *Environmental Modelling & Software* 86, 184-203.
- Colbach N., Cordeau S., 2018. Reduced herbicide use does not increase crop yield loss if it is compensated by alternative preventive and curative measures. *European Journal of Agronomy* 94, 67-78.
- Colbach N., Cordeau S., Queyrel W., Maillot T., Villerd J., Moreau D., 2019. Du champ virtuel au champ réel - ou comment utiliser un modèle de simulation pour diagnostiquer des stratégies de gestion durables des adventices? *Agronomie, Environnement et Sociétés* 9, 111-128.
- Colbach N., Colas F., Cordeau S., Maillot T., Queyrel W., Villerd J., Moreau D., 2020. The FLORSYS crop-weed canopy model, a tool to investigate and promote agroecological weed management. *Field Crops Research*, in press.
- Daly C., Conklin D.R., Unsworth M.H., 2010. Local atmospheric decoupling in complex topography alters climate change impacts. *Int J Clim.*, <https://doi.org/10.1002/joc.2007>.
- Dee D.P., 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>.
- Gardarin A., Dürr C., Colbach N., 2012. Modelling the dynamics and emergence of a multispecies weed seed bank with species traits. *Ecological Modelling* 240, 123-138.
- Gardarin A., Guillemin J.P., Munier-Jolain N.M., Colbach N., 2010. Estimation of key parameters for weed population dynamics models: base temperature and base water potential for germination. *European Journal of Agronomy* 32, 162-168.
- Giorgi F., 2019. Thirty Years of Regional Climate Modelling: Where Are We and Where Are We Going next? *J. Geophys. Res. Atmospheres*, 124, 5696–5723, <https://doi.org/10.1029/2018JD030094>.
- Habets F., et al., 2008. The SAFRAN-ISBA-MODCOU hydro meteorological model applied over France. *J. Geophys. Res. Atmospheres*, 113, <https://doi.org/10.1029/2007JD008548>.
- Herwehe J.A., Alapaty K., Spero T.L., Nolte C.G., 2014. Increasing the credibility of regional climate simulations by introducing subgrid-scale cloud-radiation interactions. *J. Geophys. Res. Atmospheres*, 119, 5317–5330, <https://doi.org/10.1002/2014JD021504>.
- Labreuche J., Métais P., Vuillemin F., Bonin L., Colbach N., 2020. Le faux semis : identifier les clés du succès. *Innovations Agronomiques* 81, 51-67
- Lehner F., Deser C., Maher N., Marotzke J., Fischer E.M., Brunner L., Knutti R., Hawkins E., 2020. Partitioning climate projection uncertainty with multiple large ensembles and CMIP5/6. *Earth Syst. Dyn.*, 11, 491–508, <https://doi.org/10.5194/esd-11-491-2020>.
- Liu P., Tsimpidi A.P., Hu Y., Stone B., Russell A.G., Nenes A., 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>.
- Marteau R., Richard Y., Pohl B., Smith Chateau C., Castel T., 2015. High-resolution rainfall variability simulated by the WRF RCM: application to eastern France. *Clim. Dyn.*, 44, 1093–1107, <https://doi.org/10.1007/s00382-014-2125-5>.
- Mézière D., Petit S., Granger S., Biju-Duval L., Colbach N., 2015. Developing a set of simulation-based indicators to assess harmfulness and contribution to biodiversity of weed communities in cropping systems. *Ecological Indicators* 48, 157-170.

Milly P.C.D., Betancourt J., Falkenmark M., Hirsch R.M., Kundzewicz Z.W., Lettenmaier D.P., Stouffer R.J., 2008. Stationarity Is Dead: Whither Water Management? *Science*, 319, 573–574, <https://doi.org/10.1126/science.1151915>.

Monaghan A., Steinhoff D., Bruyere C., Yates D., 2014. NCAR CESM Global Bias-Corrected CMIP5 Output to Support WRF/MPAS Research. <https://doi.org/10.5065/D6DJ5CN4>.

Peters G.P., et al., 2013. The challenge to keep global warming below 2 °C. *Nat. Clim. Change*, 3, 4–6, <https://doi.org/10.1038/nclimate1783>.

Quintana-Segui P., 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>.

Rocheta E., Evans J.P., Sharma A., 2020. Correcting lateral boundary biases in regional climate modelling: the effect of the relaxation zone. *Clim. Dyn.*, 55, 2511–2521, <https://doi.org/10.1007/s00382-020-05393-1>.

Rummukainen M., 2010. State-of-the-art with regional climate models. *WIREs Clim. Change*, 1, 82–96, <https://doi.org/10.1002/wcc.8>.

Rummukainen M., Rockel B., Bärring L., Christensen J. H., Reckermann M., 2015. Twenty-First-Century Challenges in Regional Climate Modeling. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 96, ES135–ES138, <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-14-00214.1>.

Skamarock C., et al., 2019. A Description of the Advanced Research WRF Model Version 4. <https://doi.org/10.5065/1dfh-6p97>.

Taylor K.E., Stouffer R.J., Meehl G.A., 2009. A summary of the CMIP5 experimental design. Macmillan Publishers Limited.

Terray L., Boé J., 2013. Quantifying 21st-century France climate change and related uncertainties. *Comptes Rendus Geosci.*, 345, 136–149, <http://dx.doi.org/10.1016/j.crte.2013.02.003>.

Tissot A.-C., et al., 2016. HYdrologie, Changement Climatique, Adaptation, Ressource en Eau en Bourgogne (HYCCARE). Ministère de l'Environnement, de l'Energie et de la Mer.

Toqué C., Angevin F., Aliaga C., Cadoux S., Cavan N., De Cordoue A.-L., Dubois S., Tauvel P., Jouy L., Sauzet G., Tailleur A., 2020. Combiner expertise, expérimentation et simulation pour une gestion durable des adventices : les plateformes prospectives Syppre. *Innovations Agronomiques* 81, 173–187

Van Inghelandt B., Queyrel W., Cavan N., Colas F., Guyot B., Colbach N., 2019. Combiner expertise et modèles en ateliers de co-conception de systèmes de culture pour une gestion durable des adventices: apports méthodologiques et perspectives. In: N. Colbach, F. Angevin, C. Bockstaller, B. Chauvel, C. Denieul, D. Moreau, B. Omon, D. Pellet, A. Rodriguez, L. Trannoy, S. Volan et F. Vuillemin, editors. *Gestion des adventices dans un contexte de changement - Séminaire CoSAC Paris, France*, 39–41

Van Vuuren D.P., et al., 2011. The representative concentration pathways: an overview. *Clim. Change*, 109, 5, <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0148-z>.

Vermeulen S.J., et al., 2013. Addressing uncertainty in adaptation planning for agriculture. *Proc. Natl. Acad. Sci.*, 110, 8357–8362, <https://doi.org/10.1073/pnas.1219441110>.

Cet article est publié sous la licence Creative Commons (CC BY-NC-ND 3.0).



<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/fr/>

Pour la citation et la reproduction de cet article, mentionner obligatoirement le titre de l'article, le nom de tous les auteurs, la mention de sa publication dans la revue « *Innovations Agronomiques* », la date de sa publication, et son URL ou DOI).