

REGARD : RechErche d'analOGues climAtiques pour sélectionneR Demain

Jean-Charles DESWARTE¹, Olivier DEUDON², Marie LAUNAY³, Renan LE ROUX³, Marie-Odile BANCAL⁴,
Meije GAWINOWSKI⁴, Nathalie DE NOBLET⁵, Burak BULUT⁵, Karine CHENU⁶, Alan SEVERINI⁶,
Gaetan TOUZY⁷, Henri BLANDINIERE⁷

1 - ARVALIS - Station de Villiers-le-Bâcle - ZA des Gravières, Route de Châteaufort, 91190 Villiers-le-Bâcle

2 - ARVALIS - Station de Recherche et d'Expérimentation de Boigneville, 91720 Boigneville

3 - INRAE Unité Agroclim - 228 route de l'Aérodrome, 84914 Avignon

4 - INRAE UMR EcoSys - 22 place de l'Agronomie, 91120 Palaiseau

5 - LSCE Institut Pierre-Simon Laplace - Orme des Merisiers, Bat. 714, 91190 Saint-Aubin

6 - QAAFI University of Queensland - Leslie Research Facility, 13 Holberton Street, Toowoomba, QLD 4350, AUSTRALIA

7 - RAGT 2n - 1 route de Moyrazes, 12510 Druelle Balsac

*Coordinateur du projet : Jean-Charles DESWARTE, jc.deswarte@arvalis.fr

INTRODUCTION

Il est désormais globalement reconnu que le climat de la planète évolue rapidement depuis près d'un siècle à cause d'un effet de serre accru causé par les activités humaines et qu'il continuera d'évoluer tant que le contenu en gaz à effet de serre de l'atmosphère ne sera pas stabilisé (IPCC, 2019).

Sur le passé récent, de nombreuses études se sont intéressées à cette évolution climatique, et à son impact sur la production agricole (Supit *et al.*, 2010; Lobell *et al.*, 2011; Moore and Lobell, 2015; Mbow *et al.*, 2019). Si la contribution exacte du réchauffement climatique à la stagnation de rendements agricoles dans de nombreuses régions du globe est mal cernée (Lin and Huybers, 2012), le lien de causalité est fréquemment admis, et démontré notamment à l'aide de modèles, qui permettent de séparer les effets du climat de ceux des pratiques agricoles (Olesen and Bindu, 2002; Brisson *et al.*, 2010; Oury *et al.*, 2012). L'amélioration variétale permet notamment de contrecarrer en partie les effets délétères du changement climatique sur les rendements des cultures (Oury *et al.*, 2012).

Pour que le progrès génétique puisse proposer des solutions pertinentes vis-à-vis du changement climatique, il est nécessaire de donner de la visibilité à ses acteurs sur les conditions climatiques pour lesquelles ils doivent sélectionner. Certains travaux académiques réalisent des projections climatiques et suggèrent des pistes d'adaptation ou des profils d'idéotypes (Parent *et al.*, 2018; Hammer *et al.*, 2020). Différentes méthodes existent pour permettre de mieux décrire les conditions de cultures futures, et afin guider les axes de sélection. **Le projet REGARD visait donc à aborder 3 méthodes distinctes, contribuer à leur amélioration, et évaluer leur potentielle utilisation par les entreprises de sélection.**

► Les analogues climatiques : se transporter dans le climat de demain

La méthode des analogues climatiques consiste à rechercher un climat qui existe *aujourd'hui dans un lieu donné* pour illustrer le climat qu'il fera *ultérieurement à un autre endroit*. Dans le cas des cultures, un analogue climatique est l'équivalent d'une niche climatique d'une zone de production et vise à regrouper les sites non

plus selon leur géographie mais selon la similarité des conditions climatiques que connaît la culture considérée (Agarwal and Sinha, 2019). Utilisés dès les années 90, les modèles écologiques de niche ont permis de prédire ou analyser les déplacements de cultures ou de leurs contraintes à large échelle. Si cette approche globale fournit des enveloppes climatiques potentielles pour les cultures dans le futur, leur transférabilité reste interrogée pour comprendre les évolutions locales en particulier quand on s'éloigne des environnements de leur calibration (Bos *et al.*, 2015; Qiao *et al.*, 2019). La recherche d'analogues climatiques à des échelles spatio-temporelles plus fines que l'année et le monde, à savoir tout ou partie du cycle de culture et la zone géographique voire le pays ou les régions semble ouvrir des pistes d'intérêt pour mieux cerner les déplacements de cultures et leurs facteurs limitants (Wu *et al.*, 2019) sous réserve d'avoir accès aux données nécessaires. Ainsi l'usage de modèles phénologiques, pour cibler les périodes sensibles aux stress climatiques majeurs (Caubel *et al.*, 2018), pour intégrer puis regrouper les analogues éco-climatiques et leurs impacts permettrait d'élaborer des adaptations dans le futur proche.

► Les variables écoclimatiques : cerner les stress climatiques probables

Pour mieux appréhender les effets du climat futur sur le déroulement du cycle cultural d'une espèce, des indicateurs écoclimatiques ont été développés (Caubel *et al.*, 2015) ; à la différence d'indicateur climatiques voire agroclimatiques, ces indicateurs écoclimatiques sont calculés sur une phase phénologique, ce qui permet intégrer l'évolution naturelle de la phénologie causée par la hausse des températures. Ils permettent de caractériser les effets du climat sur les conditions de cultures et les processus écophysologiques d'une espèce donnée, selon les stades phénologiques sensibles à cet effet. De précédents travaux ont déjà permis de décrire de façon plus circonstanciée les impacts de l'évolution climatique sur les cultures (Brisson *et al.*, 2010; Gouache *et al.*, 2012; Caubel *et al.*, 2018). Les indicateurs écoclimatiques présentent l'intérêt double de pouvoir être calculés sans émettre de nombreuses hypothèses a priori (comme c'est le cas pour les modèles de culture qui requièrent des paramètres détaillés de sol et d'itinéraire technique), et de pouvoir quantifier la fréquence d'aléas climatiques peu fréquents et dont l'impact sur la production est mal cerné.

► Les modèles de culture : simuler la culture dans sa globalité

Les modèles « sol-culture » sont des modèles basés sur les processus qui simulent la croissance des cultures, la dynamique de l'eau et de l'azote dans le sol en réponse à la variabilité environnementale et aux pratiques agricoles. Ces modèles sont utilisés à des fins diverses, telles que la prévision des rendements (Chenu *et al.*, 2017), le soutien à la sélection des cultures (Chenu *et al.*, 2017; Cooper *et al.*, 2021) et l'évaluation/prédiction des impacts du changement climatique (Lobell and Asseng, 2017). L'incertitude dans les simulations des modèles de cultures est principalement due à la structure du modèle (c'est-à-dire les formalismes choisis pour les différents processus) et aux valeurs des paramètres (Wallach and Thorburn, 2017; Chapagain *et al.*, 2022).

L'élévation de la teneur atmosphérique en CO₂ ($e[CO_2]_{atm}$) est une source majeure de modification de la photosynthèse et donc du potentiel de croissance des cultures (Ainsworth and Long, 2005, 2021; Long *et al.*, 2006). Cependant, l'exploration expérimentale des impacts de l' $e[CO_2]_{atm}$ reste délicate car elle requiert l'usage de dispositifs spécifiques qui limitent la production de données d'observation abondantes et la possibilité d'explorer l'interaction entre ce facteur et d'autres variables climatiques ou culturelles. Aussi, la réponse à l' $e[CO_2]_{atm}$ reste encore mal cernée (Toreti *et al.*, 2020), ce qui se traduit par des divergences de réponse entre modèles de culture (Durand *et al.*, 2018).

Le projet FSOV REGARD a ainsi exploré différentes méthodes permettant de mieux appréhender l'évolution des risques climatiques et les conséquences physiologiques pour la culture du blé tendre, telle qu'une entreprise de sélection peut avoir besoin de se les approprier pour anticiper le travail d'amélioration variétale (les publications issues de ce projet sont indiquées entre parenthèses) :

- L'approche des analogues climatiques a été initiée pour repérer des avant-postes potentiels de sélection en Europe en cartographiant les translations de niches climatiques (Bulut *et al.*, 2025).
- Les indicateurs climatiques ont été utilisés à l'échelle française pour quantifier l'intensification et la simultanéité de stress hydriques et thermiques (Le Roux *et al.*, 2024).
- Les modèles de culture STICS et APSIM ont été étudiés et mis en œuvre sur des jeux de données multistress impliquant les teneurs en [CO₂] atmosphérique majorées (Gawinowski *et al.*, 2025a, 2025c, 2025b; Severini *et al.*, 2025, in prep.).
- La mise en œuvre partielle sur un réseau expérimental de sélection (simulation de stades, envirotypage à l'aide d'indicateurs phénoclimatiques, projection dans le futur à l'aide de données DRIAS) a été testée.

► MATÉRIEL ET MÉTHODE

► Calculs d'analogues climatiques

L'identification d'analogues climatiques requiert d'évaluer la similarité entre les conditions climatiques d'une localisation donnée à un moment spécifié avec

celles d'une autre localisation à une autre période. Pour réaliser cela, des projections climatiques ont été mobilisées, issues du projet ISIMIP d'intercomparaison de modèles climatiques : 5 modèles climatiques (CMIP6) ont été recoupés avec 3 scénarios d'émissions (SSP1-2.6, SSP3-7.0, SSP5-8.5), générant 15 jeux de données différents représentant l'ensemble des terres émergées hors Antarctique, à l'échelle d'un point de grille de 0.5° (env. 50*50km au niveau de la France). Les projections sont élaborées pour 4 périodes de 30 ans consécutives (1981-2010 : référence historique ; 2011-2040 : futur proche ; 2041-2070 : futur intermédiaire ; 2071-2100 : futur lointain). 4 variables climatiques (T_{min} , T_{max} , T_{moy} , P) sont calculées pour chaque saison (T_{min} et T_{max} : extrêmes saisonniers ; T_{moy} et P : moyennes journalières saisonnières), générant aussi un ensemble de 1920 (4 variables * 4 saisons * 30 ans * 4 périodes) données décrivant le climat et son évolution par site et par jeu de modélisation climatique.

Les calculs de similarité ou « distance » ont été réalisés selon 3 méthodes distinctes : distance euclidienne (DE), distance de Mahalanobis (DM) et distance de Wasserstein (DW). Ces trois méthodes se distinguent sur l'utilisation de valeurs moyennes (DE, DM) ou de l'ensemble des valeurs (DW) ; de plus, DW intègre la corrélation entre variables.

Un premier niveau d'analyse a été d'explorer les analogues climatiques de Paris (passé récent) dans le futur. Un second niveau d'analyse a été d'identifier pour l'Europe quelles étaient les translations (directions, distances) entre situations de références et analogues climatiques futurs.

► Indicateurs phénoclimatiques

Les données climatiques utilisées proviennent du portail DRIAS (<https://www.drias-climat.fr/>) ; 3 modèles de circulation globale et régionalisation ont été utilisés : CNRM-Aladin63, CNRM-Racmo, and EC-Earth Racmo (ils sont les seuls à inclure les données de rayonnement nécessaires au calcul de certains indicateurs). 3 périodes temporelles ont été sélectionnées : le passé proche (référence : 1991-2020), les futurs proche (2041-2070) et lointain (2071-2100) ; les scénarii d'émission RCP 4.5 et 8.5 ont été retenus. L'échelle géographique retenue est le territoire métropolitain, y compris les zones non-productrices de blé ; la résolution est la maille SAFRAN de 8km de coté.

Les stades phénologiques sont calculés à l'aide d'un modèle basé sur du temps thermique modifié (intégration de facteurs de vernalisation et de durée du jour) ; il s'agit du stade Levée (Z10), Epi 1cm (Z30), Dernière feuille étalée (Z39), floraison (Z65) et maturité du grain (Z89). Un idéotype de variété précoce (type Talent) est simulé, avec une date homogène de semis (15 octobre). L'évaluation du modèle est réalisée sur la base des données observées Epiphyt.

Un ensemble de 22 indicateurs phénoclimatiques sont calculés au total : ils concernent les manques et excès d'eau, les températures trop froides ou trop élevées (seuil ajusté par phénophase), les effets de faibles rayonnements ponctuels, les conditions de vernalisation. Les manques et excès d'eau sont estimés à partir de paramètres climatiques uniquement (P-ETP cumulés au cours de la phénophase). Pour chaque

indicateur, une fonction d'impact normalisé est estimée ; celle-ci permet de convertir une occurrence d'accident en un facteur de stress (1 : non stressé ; 0 : stress maximal). Lorsque le facteur de stress chute en dessous de 0.7 pour une phase donnée au cours d'une année, l'année est classée à risque pour l'indicateur considéré ; la fréquence d'apparition d'un risque donné peut donc être estimée. Les indicateurs sont par ailleurs regroupés par catégorie de risque : froid, chaud, excès et manque d'eau ; pour chacune d'entre elles, la fréquence d'apparition (seuil < 0.7) est calculée.

Sur la base des valeurs d'indicateurs phénoclimatiques calculées pour la période de référence (1991-2020), une clusterisation est réalisée. L'évolution des risques climatiques pour chacun de ces clusters est ensuite étudiée pour le futur proche et le futur lointain, par rapport à la référence historique.

► Consolidation et évaluation des modèles STICS et APSIM dans un contexte de changement climatique

La mise en œuvre de modèles de cultures dans un contexte de changement climatique requiert un ensemble de paramétrages et de validations préalables, étapes qui ont été menées de manière parallèle : synthèse bibliographique des effets observés de $e[CO_2]_{atm}$ en interaction avec des stress hydriques et thermiques, exploration des formalismes des modèles vis-à-vis de l'élévation de la teneur en CO_2 , et comparaison avec des jeux de données FACE (Free-Air CO_2 enrichment).

Analyse bibliographique des interactions entre $e[CO_2]_{atm}$, élévation de température et stress hydrique : synthèse expérimentale

66 publications scientifiques portant des expérimentations sur le blé et impliquant une modulation de $[CO_2]_{atm}$ et hautes températures et/ou stress hydrique ont été analysées ; elles regroupaient des expérimentations en pots ou en pleine terre, en chambres de culture, en chambres ouvertes (OTC) ou en dispositifs d'enrichissement en plein champ (FACE). Les variables étudiées ont été regroupées en 2 catégories :

- Les variables associées à la productivité des plantes (rendement, biomasse, photosynthèse par unité de surface)
- Les variables associées à l'eau (conductance stomatique, transpiration, efficacité d'utilisation de l'eau)

La réponse des variables d'intérêt a été analysée graphiquement en représentant leur réponse en fonction des variations d'environnement ($e[CO_2]_{atm}$, intensité de déficit hydrique, accroissement de température).

Intercomparaison des effets de $[CO_2]_{atm}$ dans différents modèles de culture

En collaboration avec une initiative AgMip, une enquête auprès des modélisateurs a permis de recenser les formalismes de prise en compte des effets du CO_2 dans 21 modèles de culture. L'analyse a donc porté sur l'identification des processus modélisés impactés par la modification de $[CO_2]_{atm}$ (photosynthèse et conductance dans le cas de formalismes inspirés de Farquhar (Farquhar *et al.*, 1980), ou directement sur la

RUE et la transpiration pour les modèles inspirés de Monteith (Monteith, 1972)), et sur la gamme de validité supposée des modèles.

Évaluation de modèles de cultures pour des scénarii futurs : aptitude des modèles STICS et APSIM à prévoir les rendements sous les effets combinés du CO_2 , des températures et du stress hydrique

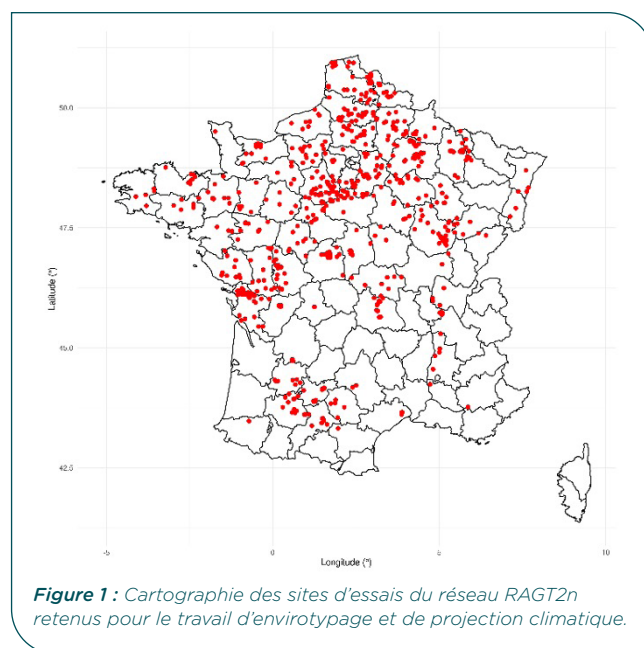
Les modèles de culture STICS et APSIM ont été confrontés à des jeux de données expérimentaux en plein champ explorant la réponse du blé tendre à une élévation de $[CO_2]_{atm}$ (dispositifs FACE) combinée à un stress hydrique et/ou un stress thermique chaud :

- Maricopa (USA), 92-93 et 93-94 (Kimball *et al.*, 1995)
- Braunschweig (All), 13-14 et 14-15 (Manderscheid *et al.*, 2020)
- Horsham (Aus.) (Fitzgerald *et al.*, 2016), 07, 08 et 09.

Les modèles ont été préalablement calibrés sur les traitements témoins, avant d'être utilisés pour simuler les conditions de $e[CO_2]_{atm}$ et les stress thermiques et/ou hydriques sur des critères de phénologie, d'indice foliaire, de biomasse et de rendement.

► Application de modèles et d'indicateurs écoclimatiques à une entreprise de sélection : envirotypage d'un réseau d'essais

Cette tâche visait à permettre à une entreprise de sélection de s'approprier les concepts de modèles de culture, d'indicateurs écoclimatiques et de projections climatiques afin d'envirotypier un réseau d'essai actuel et d'évaluer sa pertinence au regard des perspectives climatiques futures. Pour cela, les données du réseau d'essais du programme de sélection Blé Tendre -zone France- de RAGT2n pour la période 2018 à 2024 ont été mobilisées (Figure 1). Les données Plantes observées (rendement, épiaison) complétées de données météorologiques journalières spatialisées (MeteoBlue) ont été collectées, constituant un jeu de données comprenant 716 sites et 1191 scénarii cultureux (un scénario consistant en une combinaison unique d'année, de site et de date de semis).



Un modèle phénologique adapté de Weir (Weir *et al.*, 1984) a été mis en œuvre et optimisé sur la base des données observées (2018-2024) pour permettre les estimations des stades non observés et les simulations de phénologie dans le futur. Une liste de variables écoclimatiques représentatives d'aléas et de stress climatiques (Le Roux *et al.*, 2024) a été calculée pour l'ensemble de ces situations pour identifier les variables les mieux corrélées au rendement. Les projections climatiques DRIAS (période de référence : période 2018-2024 selon les scénarii RCP 4.5 et 8.5, et données futures : période 2031-2045, scénarii RCP 4.5 et 8.5) ont été mobilisées pour les 716 sites expérimentaux. Les variables écoclimatiques calculées sur le jeu de données réelles ont été calculées dans le futur, afin d'évaluer l'évolution des risques climatiques ; au préalable, une correction des biais a été réalisée en comparant les variables écoclimatiques sur le passé réel (données MétéoBlue, 2018-2024) et sur le passé simulé (données DRIAS, 2018-2024). Pour chacune des deux comparaisons et chaque covariable, une fonction de correction par cartographie des quantiles est ajustée à partir des paires de valeurs obtenues pour chaque environnement pour les données météorologiques historiques et simulées. Ces deux ensembles de modèles de cartographies des quantiles ont ensuite été utilisés pour corriger les ensembles de covariables calculées d'après les simulations réalisées en utilisant les jeux de données DRIAS RCP4.5 et DRIAS RCP8.5 de 2031 à 2045. Les cartographies de correction des quantiles ont été obtenues en utilisant le package R qmap (v. 1.0.6.), en utilisant la fonction fitQmap (méthode PTF).

RÉSULTATS

Analogues climatiques

Par rapport à la situation initiale (climat de Paris pendant la période de référence 1981-2010), la quasi-totalité des analogues climatiques aux échéances de 2011-2040 et 2041-2070 se situent en Europe (Espagne, Italie, Grèce) voire en France (Figure 2). Il y a convergence des simulations pour tous les scénarii d'émission au cours du futur proche (2011-2040) et dans l'hypothèse à moyen terme (2041-2070) d'émissions très restreintes : le Sud-Ouest de la France (vallée de la Garonne) représente dès maintenant le climat moyen prévu à Paris par les différentes projections climatiques.

A l'inverse, avec l'hypothèse d'émissions plus élevées et à échéance du futur intermédiaire, les analogues climatiques représentatifs de Paris sont en péninsule ibérique, en Italie, voire en Grèce ou dans le Nord de l'Afrique ; cependant, si les modèles s'accordent globalement à les positionner dans ces régions au Sud-Ouest et Sud-Est de la France, il y a divergence sur les localités représentatives du climat de Paris demain.

L'exploration des analogues a été étendue à l'échelle européenne (Figure 3). Par rapport à la situation initiale (passé récent 1981-2010), il y a un éloignement croissant au cours du temps qui témoigne de la dérive climatique. Cet éloignement n'est cependant pas homogène à échéance de 2071-2100 : il s'avère plus élevé à l'intérieur des terres, en Europe Centrale et de l'Est ; proportionnellement la façade atlantique est moins bouleversée.

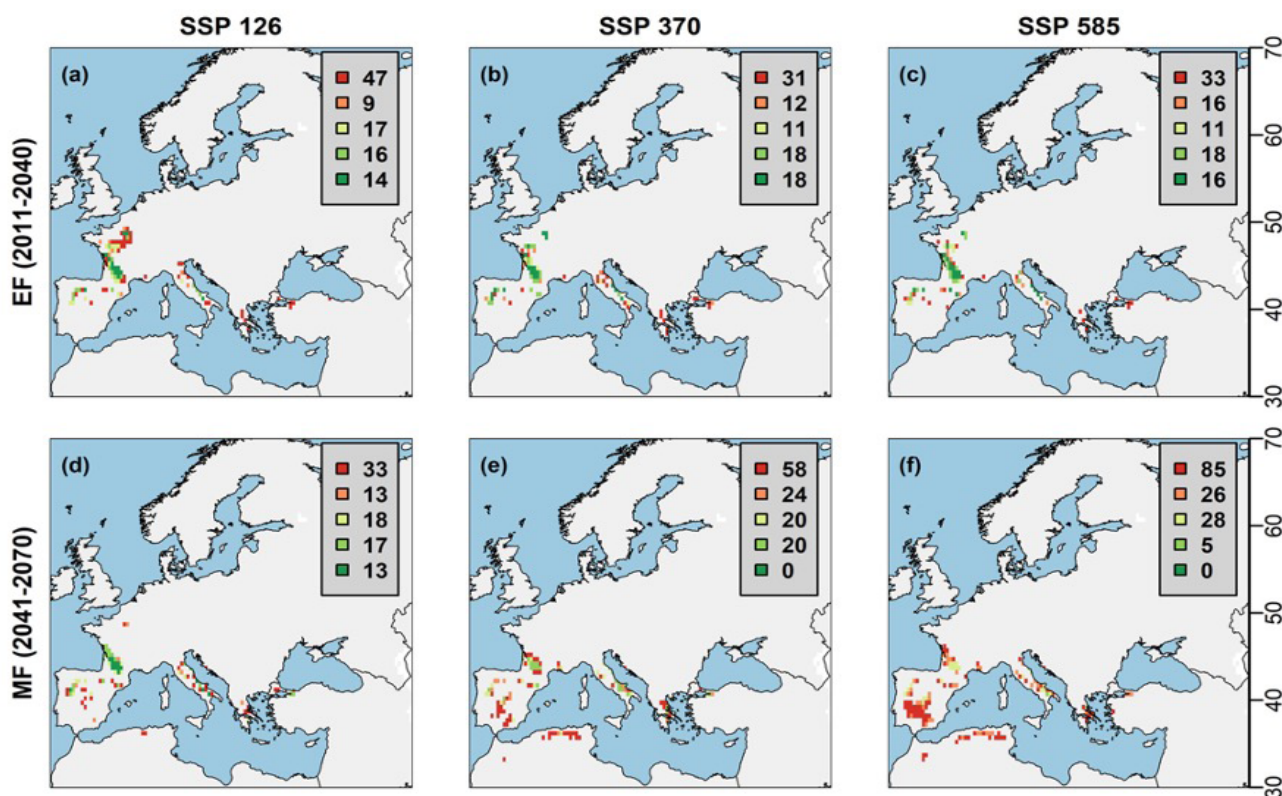
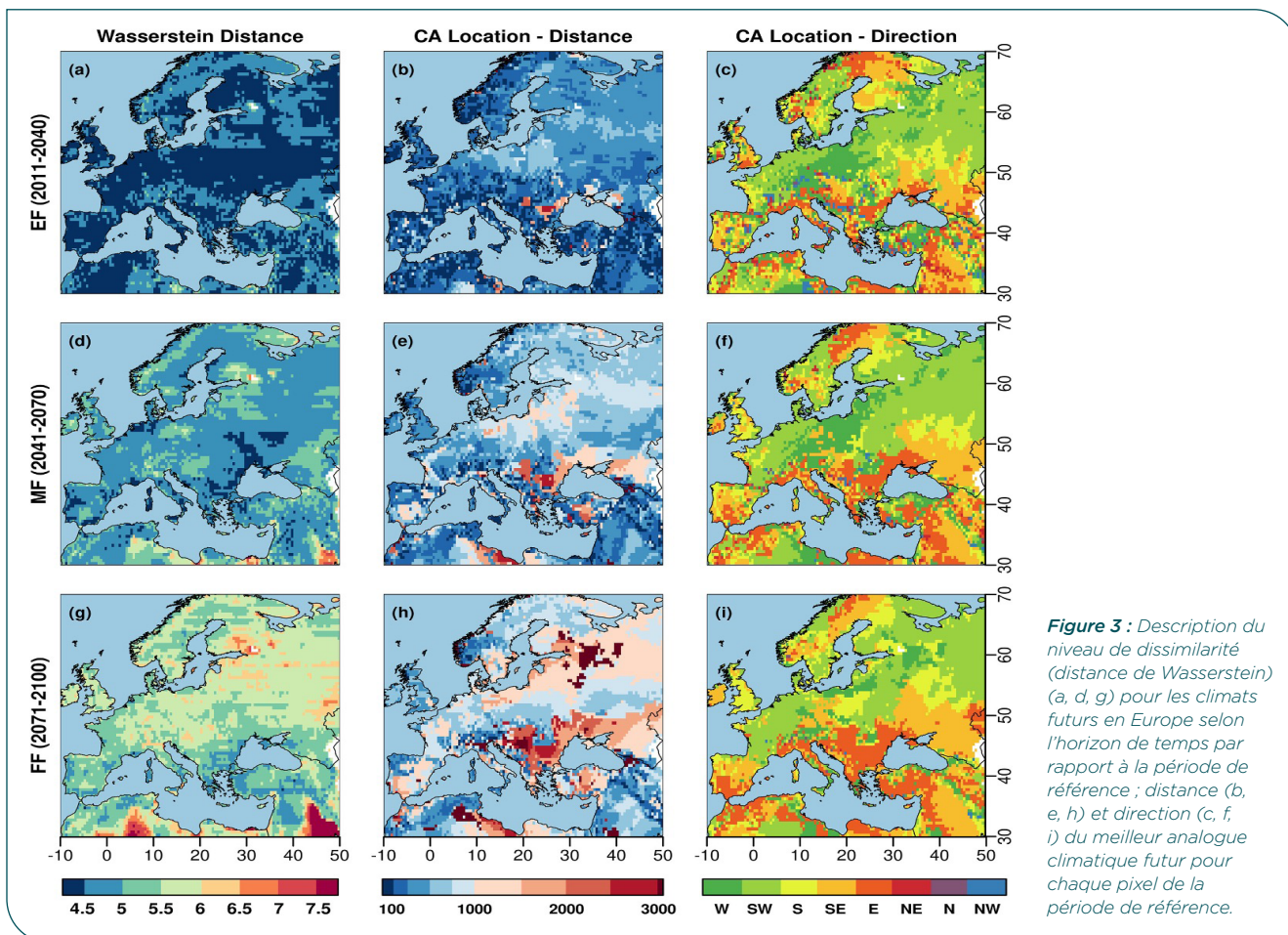


Figure 2 : Identification et convergence des 5 modèles climatiques pour le rattachement des 50 meilleurs analogues climatiques de Paris en fonction de l'échéance de temps et du scénario climatique. La couleur des pixels renseigne sur le nombre de modèles pointant vers ce pixel comme analogue climatique retenu



La dérive climatique ne se traduit pas systématiquement par une translation du sud vers le nord : les analogues climatiques d'une grande moitié Est de la France sont orientés vers le Sud-Ouest, alors qu'ils sont orientés vers l'Est pour le pourtour méditerranéen. Certaines zones de production d'Allemagne et de Pologne voient au contraire leurs analogues être orientés vers l'Ouest, se rapprochant ainsi des conditions climatiques du Bénélux.

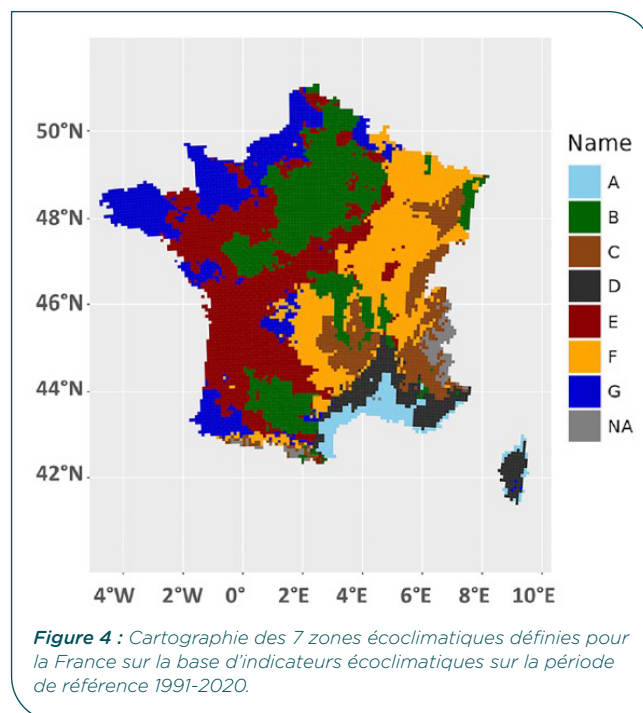
► Évolution des risques à travers le calcul d'indicateurs écoclimatiques

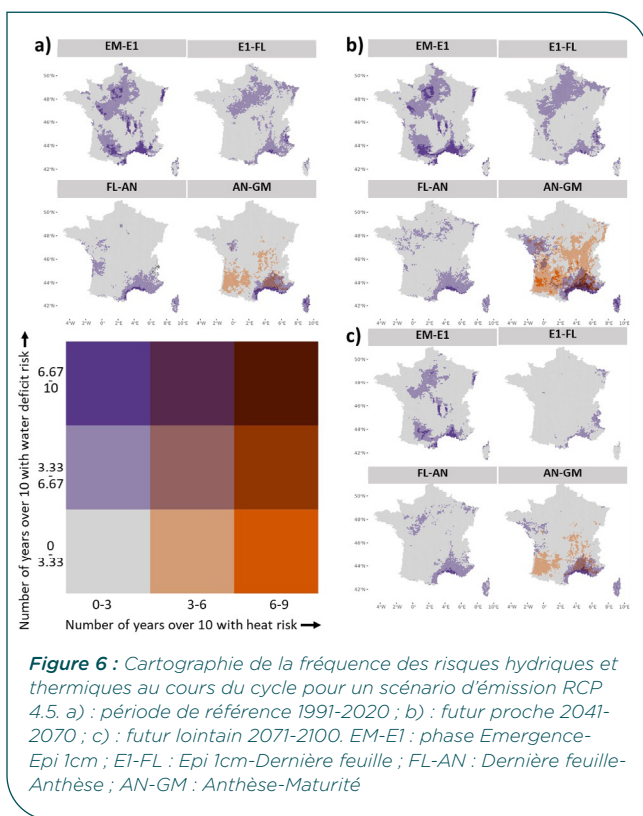
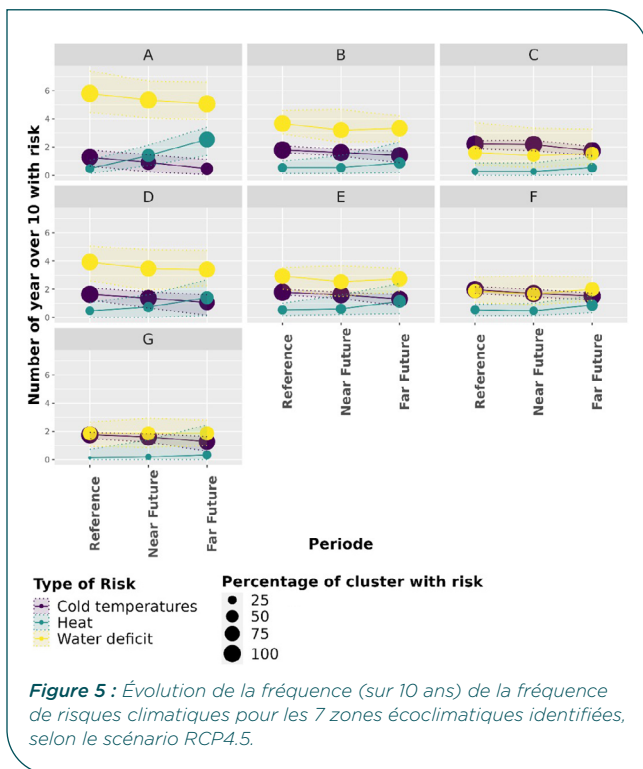
Les simulations du modèle phénologique ont été comparées aux observations de la base Epiphyt (2012-2021) : les RMSE pour les stades Z30, Z39 et Z65 sont respectivement de 13,1, 8,1 et 7,6 jours.

Sur la base du passé récent, 7 zones écoclimatiques ont été définies (Figure 4) ; elles se caractérisent par une combinaison de fréquences de stress spécifiques. Projetées dans le futur, toutes présentent une précocification des stades ; on peut néanmoins noter que cette précocification est plus importante pour les zones historiquement tardives (façade Est notamment) alors qu'elle évolue peu pour le pourtour méditerranéen.

Selon le scénario RCP 4.5, les fréquences de risques évoluent de manière similaire entre zones, avec toutefois des niveaux d'origine très différents (Figure 5) : le risque de froid diminue, alors que le risque de stress thermique chaud augmente. Les

tendances pour le stress hydrique sont plutôt stables ou à la baisse entre le passé récent et le futur proche, pour légèrement augmenter sur le futur lointain. Ce résultat peut être la combinaison de phases phénologiques plus courtes, et d'une prise en compte trop simple du bilan hydrique.



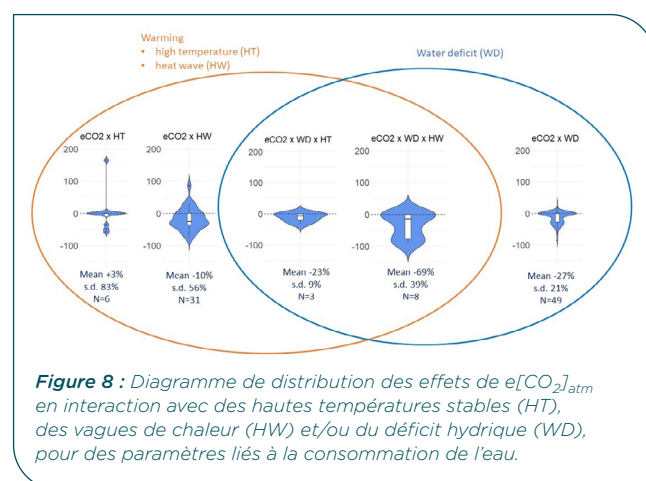
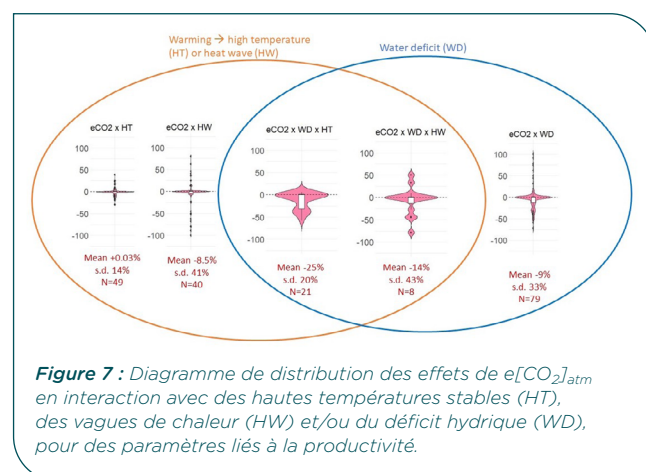


La cartographie des catégories de risques climatiques en fonction des phénophases (Figure 6) présente une relative stabilité des stress hydriques pendant les phases végétatives (semis à floraison). Par contre, le stress thermique se développe sur les deux tiers sud de la France en phase de remplissage à l'échéance du futur proche. Il tend cependant à se réduire dans le futur lointain, sans doute en lien avec la forte précocification des stades. Il est à noter que les résultats sont sensiblement différents avec un scénario RCP 8.5.

► Consolidation et évaluation des modèles STICS et APSIM dans un contexte de changement climatique

Analyse bibliographique des interactions entre $e[CO_2]_{atm}$, élévation de température et stress hydrique

Des expérimentations quantifiant les effets des interactions entre $e[CO_2]_{atm}$ et hautes températures et/ou stress hydrique ont été analysées pour des traits liés à la productivité (Figure 7) et la consommation en eau (Figure 8). Les hautes températures correspondant à une augmentation moyenne des températures sur l'ensemble de la croissance ont été distinguées des vagues de chaleur correspondant à des événements extrêmes donc plus ponctuels et plus intenses. Des indices de plasticité relatifs ont été calculés pour rendre compte des compensations et interactions entre ces différents facteurs climatiques. Les résultats montrent une diminution de la productivité et de la consommation en eau des cultures de blé dans les conditions climatiques futures stressantes expérimentées, indiquant que l'effet fertilisant du CO_2 sur la photosynthèse ne compense donc pas les effets adverses des hautes températures, vagues de chaleurs et déficits hydriques (Figure 7). De même, l'effet négatif du CO_2 et du déficit hydrique sur la transpiration est plus fort que l'effet antagoniste des hautes températures (Figure 8).



Toutefois, ces niveaux de compensation sont très variables en raison d'une diversité de conditions expérimentales (dispositifs, niveaux de stress, concentrations de CO_2 , géotypes, variables mesurées) et du peu d'expérimentations réalisées

pour certaines combinaisons de facteurs. Comme attendu, l'effet délétère d'un stress sur la productivité augmente avec son intensité, même si l'utilisation de variétés plus ou moins tolérantes introduit de la variabilité dans cette réponse. De même, le timing des stress est important, indiquant que les vagues de chaleur pré-floraison sont les plus délétères sur la productivité (avec de possibles effets confondants de la tolérance des variétés utilisées). Ces données ont également montré que l'interaction entre $e[CO_2]_{atm}$ et déficit hydrique sur la productivité est variable ; en effet, l'hypothèse selon laquelle l'effet fertilisant de l'augmentation du CO_2 est plus important en conditions sèches qu'en conditions humides n'est vérifiée que dans 54% des cas recensés. Par ailleurs, même lorsque l'effet du CO_2 est plus fort en conditions sèches, cela ne permet pas systématiquement de compenser les effets délétères du déficit hydrique sur la productivité.

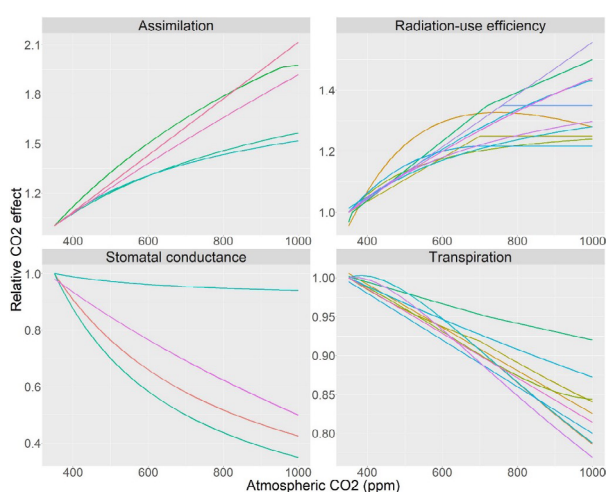


Figure 9 : Évolution de l'effet relatif de $[CO_2]_{atm}$ (par rapport à la concentration de référence de 350 ppm) en fonction de la concentration atmosphérique de CO_2 (ppm) pour différentes variables impactées : assimilation, efficacité biologique (RUE), conductance stomatique et transpiration. Les différentes couleurs correspondent aux différents modèles anonymisés.

Intercomparaison des effets de $[CO_2]_{atm}$ dans différents modèles de culture

En fonction des formalismes utilisés par les modèles, les variables physiologiques influencées par $e[CO_2]_{atm}$ sont distinctes (Figure 9). Les modèles basés sur Farquhar divergent dans leur prise en compte du CO_2 sur l'assimilation, mais reposent sur un faible échantillon de modèles. A contrario, les modèles basés sur la RUE ont des réponses similaires jusqu'à 700 ppm ; au-delà de cette concentration, les réponses divergent néanmoins avec des réponses tantôt saturantes tantôt linéaires. Il est toutefois important de noter qu'une grande majorité de modélisateurs a estimé que la gamme de validité de leurs modèles était de 300-750 ppm. L'effet négatif du CO_2 est relativement plus sévère sur la conductance que sur la transpiration, assertion reposant néanmoins sur un faible échantillon de modèles pour la conductance. La variabilité de réponse de la transpiration augmente avec le CO_2 , mais moins que celle de la RUE.

Évaluation de modèles de cultures pour des scénarii futurs : aptitude des modèles STICS et APSIM à prévoir les rendements sous les effets combinés de $[CO_2]_{atm}$, des températures et du stress hydrique

Après calibration préalable des modèles sur les modalités témoins (irrigué, sans addition de CO_2 ni de stress thermique), les modèles ont été testés sur les modalités à une ou deux modifications environnementales.

Les effets observés sur la phénologie sont assez modérés (de -1 à -7%) à Maricopa, et nuls à Braunschweig. Cependant, les modèles peinent à capter systématiquement ces évolutions, que ce soit à floraison ou à maturité. Les impacts mesurés sur la biomasse sont proportionnellement plus importants : de +30% (Horscham, avec $e[CO_2]_{atm}$) à -60% (Horscham, en cas de semis tardif), et les prévisions des modèles sont cohérentes à Maricopa et Braunschweig, à la différence d'Horscham où les simulations peuvent être totalement divergentes avec les observations (modalité irriguée notamment) et sous-estimer les effets. Sur ce site en particulier, on peut constater une faible réponse effective de la biomasse à l'irrigation et à $e[CO_2]_{atm}$. Le constat est assez similaire pour le rendement.



Figure 10 : Diagramme des effets relatifs observés (points) et simulés (barres) pour différentes variables descriptives de la physiologie du couvert, selon les essais, modèles, années d'expérimentation et modalités, en % de la modalité témoin (irriguée, sans stress thermique supplémentaire et à $[CO_2]_{atm}$ naturelle).

Il est cependant important de noter que les conditions environnementales effectivement rencontrées lors des expérimentations ne sont pas forcément conformes aux stress escomptés : Braunschweig a présenté des températures dépassant rarement 30°C malgré la mise en œuvre de chauffage, et Maricopa a à l'inverse subi des pics de chaleur à 40°C. A Horsham, l'effet dominant semble être la date de semis, alors que les effets de $e[CO_2]_{atm}$ et d'irrigation sont limités. Les modèles semblent donc capter partiellement les effets de $e[CO_2]_{atm}$ en interaction avec d'autres stress, sous réserve que ces autres conditions environnementales soient elles-mêmes bien caractérisées et retranscrites.

► Application de modèles et d'indicateurs écoclimatiques à une entreprise de sélection : envirotypage d'un réseau d'essais

La première étape de la caractérisation des environnements des sites d'essais visait à obtenir un paramétrage global de la phénologie des génétiques utilisées sur les sites d'essais RAGT2n, afin de pouvoir obtenir des covariables les plus précises possibles. L'optimisation des paramètres de durée intrinsèque et de photopériode de base de l'intervalle Levée-Transition florale a bien permis de limiter les solutions multiples pour trouver un paramétrage représentant l'ensemble de la génétique RAGT testée sur les lieux d'essais. Le NRMSE moyen sur l'ensemble des calibrations était de 0.097, pour un RMSE de 88.15 ± 6.44 °Cd sur l'accumulation de temps thermique entre le semis et l'anthèse (Figure 11).

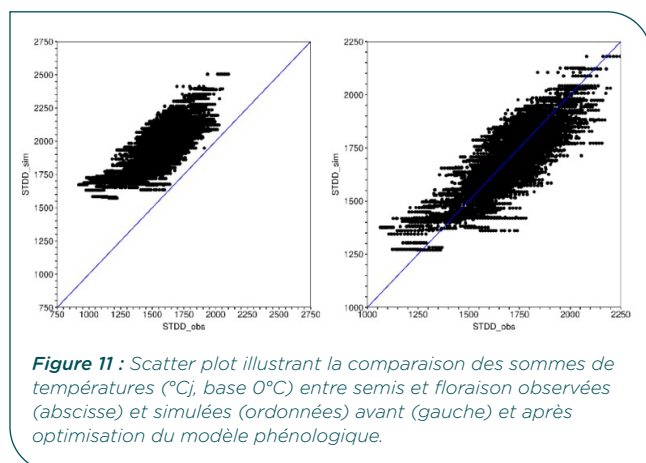


Figure 11 : Scatter plot illustrant la comparaison des sommes de températures (°Cj, base 0°C) entre semis et floraison observées (abscisse) et simulées (ordonnées) avant (gauche) et après optimisation du modèle phénologique.

Les covariables les plus importantes dans l'établissement du modèle explicatif du rendement sont essentiellement liées à trois catégories de facteurs limitant : la vernalisation, la disponibilité hydrique et dans une moindre mesure le stress froid (Figure 12). La covariable ayant le plus d'importance correspond au nombre de jours entre l'émergence et le stade épi 1 cm où la température moyenne journalière est comprise entre 0 et 13 °C, et est une covariable quantifiant des conditions vernalisantes. Les covariables liées à la disponibilité hydrique ayant une importance relative dans l'établissement du rendement sont essentiellement liées à la disponibilité hydrique avec (i) l'accumulation de différentiel entre précipitations et évapotranspiration entre l'émergence et le stade épi 1 cm et (ii) entre le stade épi 1 cm et le stade dernière feuille étalée, puis (iii) la somme de précipitation entre les dix jours préalables au semis et l'émergence. Enfin, seule une covariable caractérisant un stress froid a présenté un

gain supérieur à 5% lors de l'établissement du modèle : le nombre de jours où la température moyenne journalière est inférieure à 5 °C lors de la période vernalisante. Dans une moindre mesure, le manque d'ensoleillement autour de la méiose (non précisément simulée) semble également être lié au rendement.

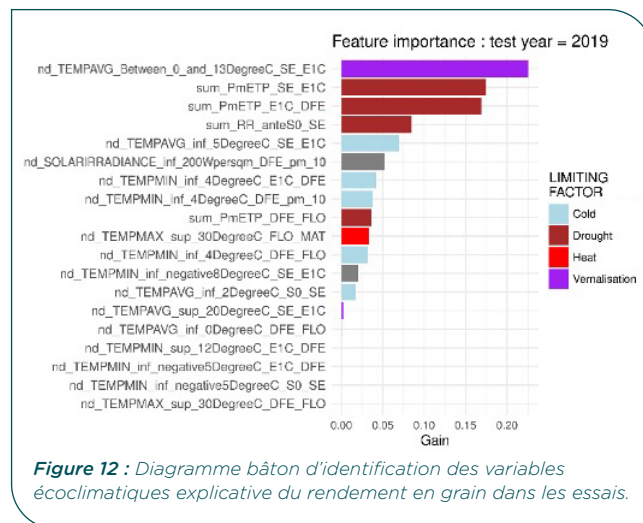


Figure 12 : Diagramme bâton d'identification des variables écoclimatiques explicative du rendement en grain dans les essais.

L'étape de correction de variables pour la projection climatique n'identifie pas de biais majeur et généralisé sur les températures, à la différence avec le paramètre P-ETP, pour lequel les données DRIAS sont plus élevées.

En calculant les variables écoclimatiques sur la période future (2031-2045), on constate que les valeurs obtenues en moyenne sur l'ensemble des sites de simulation divergent très peu des situations déjà expérimentées entre 2018 et 2024.

DISCUSSION

Le changement climatique bouleverse profondément la physiologie des cultures, en modifiant la phénologie et la fréquence et l'intensité des aléas climatiques. L'élévation de la concentration atmosphérique de CO_2 en est pour partie la cause, mais elle interagit par ailleurs sur la physiologie des plantes en stimulant la photosynthèse et en limitant la conductance stomatique. Ainsi, à l'échelle d'une culture, les effets du changement climatiques sont multiples ; ils peuvent se superposer de façon tantôt antagoniste, tantôt synergique. De plus, les projections climatiques sont entachées de multiples sources d'erreurs qui complexifient la visualisation globale des conséquences du changement climatique, et donc des adaptations nécessaires.

► Intérêts et limites des analogues climatiques pour anticiper la sélection variétale

Les analogues climatiques se veulent avant tout une méthode de visualisation globale des translations climatiques et par la suite écologiques probables sous l'effet du changement climatique. Ils permettent une prise de conscience aisée et très concrète des évolutions probables du climat et donc plus globalement du milieu. Pour cela, ils ont été utilisés pour la sensibilisation des populations aux évolutions nécessaires ou possibles, et aux opportunités (Mihailescu and Bruno Soares, 2020; Chaudhary *et al.*, 2023).

L'étude présentée ici et publiée (Bulut *et al.*, 2025) a notamment cherché à développer des méthodes statistiques qui prennent mieux en compte l'interdépendance des variables climatiques (distance de Wasserstein). En ne se focalisant que sur des paramètres climatiques très généraux (températures, précipitations), à l'échelle de saisons calendaires, elle ne produit des résultats qu'à usage limité pour identifier d'abord les conséquences sur les cultures, et ensuite les éventuels avant-postes de sélection pertinents pour anticiper la dérive climatique. Il serait cependant possible de prolonger la démarche en travaillant sur des périodes ajustée à la phénologie (recalculée au préalable) ou en appliquant des indicateurs de faisabilité de culture à la suite de l'identification a priori d'analogues, enrichissant dès lors la pertinence de la comparaison et identifiant les points de divergence/convergence entre la cible actuelle et l'analogue futur (Allaman *et al.*, 2026).

► Des indicateurs écoclimatiques pour identifier aisément des risques d'accident

Les indicateurs écoclimatiques, parce qu'ils s'appuient sur la phénologie (effective ou simulée) et intègrent de *facto* l'esquive naturelle observée sur les cultures face à l'élévation de températures sont des outils relativement aisés à utiliser en agronomie et en sélection variétale depuis l'accès élargi aux données météorologiques, et au développement progressif de l'envirotypage requis pour mieux comprendre les interactions Genotype x Environnement. Ils répondent également au raisonnement intuitif des sélectionneurs de définir des idéotypes en fonction des accidents climatiques fréquents dans une zone de marché donnée. Le choix des indicateurs à étudier peut d'ailleurs faire l'objectif d'une analyse statistique *a posteriori* des principaux facteurs impactant le rendement, sous réserve d'explorer suffisamment de scénarii climatiques, pédologiques et culturels, pour ne garder que les variables qui influencent fortement la culture (Nóia Júnior *et al.*, 2023). L'analyse réalisée dans le projet REGARD (Le Roux *et al.*, 2024) met en exergue la précocification des stades induite par la hausse des températures, la réduction progressive des risques de froid et au contraire la hausse des stress thermiques chauds, de même que la co-occurrence de stress thermiques et hydriques en fin de cycle. Cependant, l'utilisation d'un indicateur purement climatique de stress hydrique (P-ETP) efface l'importance primordiale des caractéristiques du sol et lisse sur des phases phéno-climatiques longues les alternances de manque et d'excès d'eau. L'intégration d'une normalisation des indicateurs permet une relative pondération des aléas climatiques pour tendre vers des niveaux d'impact réels ; cependant, ils se heurtent à la complexité d'intégrer la succession des aléas et la capacité de compensation des cultures. Ainsi, l'effet d'une sécheresse temporaire au semis ne peut être comparé à celle apparaissant pendant la montaison. De plus, les indicateurs écoclimatiques comptabilisent le plus souvent le franchissement de seuils (cas des variables de température ou de rayonnement), rendant les sorties très dépendantes de la justesse, en valeur absolue, des simulations climatiques ; le plus souvent, le biais potentiellement présent dans ces dernières est contourné en présentant les projections par rapport à une période de référence simulée, sans pour autant

résoudre totalement les effets de seuil. Enfin, les indicateurs écoclimatiques n'intègrent pas, par nature, l'élévation de $[\text{CO}_2]_{\text{atm}}$, qui apparaît cependant comme un déterminant majeur de la photosynthèse et de la conductance stomatique ; les effets du changement climatiques captés par l'évolution des indicateurs retenus peuvent donc être sur- ou sous-estimés selon l'effet de l'e $[\text{CO}_2]_{\text{atm}}$ sur la physiologie des cultures.

► Des modèles de culture pour décrire la réponse globale du blé au changement climatique

En intégrant simultanément l'ensemble des caractéristiques attendues du changement climatique (élévation tendancielle des températures, de l'évapotranspiration et de $[\text{CO}_2]_{\text{atm}}$, modification des cumuls et de la saisonnalité des pluies, voire du rayonnement), les modèles sont des outils adaptés pour identifier les adaptations nécessaires vis-à-vis du changement climatique. Cependant, pour permettre des simulations fiables, il est nécessaire d'avoir étayé ces modèles sur des formalismes et des jeux de données robustes. Les travaux menés dans la tâche de modélisation du projet REGARD se sont intéressés 1) aux évidences expérimentales, 2) aux réponses des modèles à l'e $[\text{CO}_2]_{\text{atm}}$ en interaction avec les autres stress climatiques pressentis.

Les résultats expérimentaux mettent en premier lieu en évidence la variabilité des réponses à ces variations environnementales sur des processus basaux, avec au global une tendance globale à la baisse de production. Ceci indique notamment que l'effet fertilisant de l'e $[\text{CO}_2]_{\text{atm}}$ ne compense pas totalement les effets des conditions stressantes futures (hautes températures, vagues de chaleur ou stress hydrique).

L'effet de l'e $[\text{CO}_2]_{\text{atm}}$ est diversement traduit dans les modèles : à travers des formalismes d'une part, et des intensités de réponse d'autre part, avec parfois des domaines de validité vis-à-vis de la gamme de $[\text{CO}_2]_{\text{atm}}$ trop limitants. La mise en œuvre sur de (rares) données FACE disponibles a démontré cependant que la retranscription fiable des effets de stress hydriques et/ou thermiques s'avère tout aussi cruciale que la simulation performante des effets du CO_2 .

► Application de modèles et d'indicateurs écoclimatiques à une entreprise de sélection : retour d'expérience

L'exercice de mise en application de certaines sorties du projet par une entreprise de sélection permet d'analyser la transférabilité de certains travaux académiques vers des usages professionnels et routiniers. L'utilisation de variables écoclimatiques s'intègre très bien dans des démarches d'envirotypage de plus en plus déployées sur les réseaux : les données météorologiques sont désormais aisément accessibles ainsi que quelques repères phénologiques principaux. Cependant, la composante Sol est plus délicate à renseigner et à valoriser ; en l'absence d'une prise en compte d'un bilan hydrique, les aléas d'excès ou de manque d'eau deviennent très difficiles voire impossibles à capter à l'échelle d'un réseau, ce qui explique sans doute pourquoi les paramètres hydriques ne ressortent pas comme déterminants principaux du rendement dans les essais. Il est également important de prendre du recul sur la signification des variables écoclimatiques retenues, et

leur possible intercorrélation avec d'autres indicateurs. En particulier, le nombre de jours vernalisants pendant la phase hivernale ne se relie sans doute pas à l'impact phénologique en tant que tel, mais plutôt à une durée globale du cycle et à un gradient géographique au sein du réseau. Enfin, l'appropriation de projections climatiques requiert une formation préalable, en lien avec la quantité de données à traiter, avec les spécificités des modèles climatiques mis à disposition (biais intrinsèques, variables simulées, validité géographique, etc).

PUBLICATIONS LIÉES AU PROJET

Bulut, B., Vrac, M., and De Noblet-Ducoudré, N. (2025). What Will the European Climate Look Like in the Future? A Climate Analog Analysis Accounting for Dependencies Between Variables. *Earths Future* 13, e2024EF004972. doi: 10.1029/2024EF004972

Gawinowski, M., Aubry, M., Buis, S., Garcia, C., Deswarte, J.-C., Bancal, M.-O., et al. (2025a). Selecting crop variables and parameters for the calibration of a new cultivar in a crop model: A case study of winter wheat for STICS. *Eur. J. Agron.* 168, 127677. doi: 10.1016/j.eja.2025.127677

Gawinowski, M., Aubry, M., Buis, S., Garcia, C., Deswarte, J.-C., Bancal, M.-O., et al. (2025b). Varietal parameterization of eleven modern French wheat cultivars in the STICS crop model. doi: 10.57745/FDPIXY

Gawinowski, M., Chenu, K., Deswarte, J.-C., Launay, M., and Bancal, M.-O. (2025c). Plant plasticity in the face of climate change – CO₂ offsetting effects to warming and water deficit in wheat. A review. *Environ. Exp. Bot.* 232, 106113. doi: 10.1016/j.envexpbot.2025.106113

Le Roux, R., Furusho-Percot, C., Deswarte, J.-C., Bancal, M.-O., Chenu, K., De Noblet-Ducoudré, N., et al. (2024). Mapping the race between crop phenology and climate risks for wheat in France under climate change. *Sci. Rep.* 14, 8184. doi: 10.1038/s41598-024-58826-w

Severini, A., Gawinowski, M., Bancal, M. O., Launay, M., Deswarte, J.-C., and Chenu, K. (in prep.). Evaluating crop models for future climate scenarios: wheat yield predictions using STICS and APSIM under combined CO₂, temperature and water stress conditions.

Severini, A., Gawinowski, M., Launay, M., Bancal, M. O., Deswarte, J.-C., and Chenu, K. (2025). Assessing crop model adequacy for future climates., (La Serena, Chile).

Références bibliographiques

Agarwal, N., and Sinha, A. (2019). Future Climate Analogues of Current Wheat Production Zones in India. *Curr. Sci.* 116, 264. doi: 10.18520/cs/v116/i2/264-271

Ainsworth, E. A., and Long, S. P. (2005). What have we learned from 15 years of free-air CO₂ enrichment (FACE)? A meta-analytic review of the responses of photosynthesis, canopy properties and plant production to rising CO₂. *New Phytol.* 165, 351–372. doi: 10.1111/j.1469-8137.2004.01224.x

Ainsworth, E. A., and Long, S. P. (2021). 30 years of free-air carbon dioxide enrichment (FACE): What have we learned about future crop productivity and its potential for adaptation? *Glob. Change Biol.* 27, 27–49. doi: 10.1111/gcb.15375

Allaman, H., Goyette, S., Dubuis, P.-H., and Kasparian, J. (2026). Future viability of European vineyards using bioclimatic climate analogues. *Agric. For. Meteorol.* 378, 110978. doi: 10.1016/j.agrformet.2025.110978

Bos, S. P. M., Pagella, T., Kindt, R., Russell, A. J. M., and Luedeling, E. (2015). Climate analogs for agricultural impact projection and adaptation—a reliability test. *Front. Environ. Sci.* 3. doi: 10.3389/fenvs.2015.00065

Brisson, N., Gate, P., Gouache, D., Charmet, G., Oury, F.-X., and Huard, F. (2010). Why are wheat yields stagnating in Europe? A comprehensive data analysis for France. *Field Crops Res.* 119, 201–212. doi: 10.1016/j.fcr.2010.07.012

Bulut, B., Vrac, M., and De Noblet-Ducoudré, N. (2025). What Will the European Climate Look Like in the Future? A Climate Analog Analysis Accounting for Dependencies Between Variables. *Earths Future* 13, e2024EF004972. doi: 10.1029/2024EF004972

Caubel, J., García De Cortázar-Atauri, I., Launay, M., De Noblet-Ducoudré, N., Huard, F., Bertuzzi, P., et al. (2015). Broadening the scope for ecoclimatic indicators to assess crop climate suitability according to ecophysiological, technical and quality criteria. *Agric. For. Meteorol.* 207, 94–106. doi: 10.1016/j.agrformet.2015.02.005

Caubel, J., García De Cortázar-Atauri, I., Vivant, A. C., Launay, M., and De Noblet-Ducoudré, N. (2018). Assessing future meteorological stresses for grain maize in France. *Agric. Syst.* 159, 237–247. doi: 10.1016/j.agry.2017.02.010

Chapagain, R., Remenyi, T. A., Harris, R. M. B., Mohammed, C. L., Huth, N., Wallach, D., et al. (2022). Decomposing crop model uncertainty: A systematic review. *Field Crops Res.* 279, 108448. doi: 10.1016/j.fcr.2022.108448

Chaudhary, S., Rajagopalan, K., Kruger, C. E., Brady, M. P., Fraisse, C. W., Gustafson, D. I., et al. (2023). Climate analogs can catalyze cross-regional dialogs for US specialty crop adaptation. *Sci. Rep.* 13, 9317. doi: 10.1038/s41598-023-35887-x

Chenu, K., Porter, J. R., Martre, P., Basso, B., Chapman, S. C., Ewert, F., et al. (2017). Contribution of Crop Models to Adaptation in Wheat. *Trends Plant Sci.* 22, 472–490. doi: 10.1016/j.tplants.2017.02.003

Cooper, M., Powell, O., Voss-Fels, K. P., Messina, C. D., Gho, C., Podlich, D. W., et al. (2021). Modelling selection response in plant-breeding programs using crop models as mechanistic gene-to-phenotype (CGM-G2P) multi-trait link functions. *Silico Plants* 3, diaa016. doi: 10.1093/insilicoplants/diaa016

Durand, J.-L., Delusca, K., Boote, K., Lizaso, J., Manderscheid, R., Weigel, H. J., et al. (2018). How accurately do maize crop models simulate the interactions of atmospheric CO₂ concentration levels with limited water supply on water use and yield? *Eur. J. Agron.* 100, 67–75. doi: 10.1016/j.eja.2017.01.002

Farquhar, G. D., Von Caemmerer, S., and Berry, J. A. (1980). A biochemical model of photosynthetic CO₂ assimilation in leaves of C3 species. *Planta* 149, 78–90. doi: 10.1007/BF00386231

Fitzgerald, G. J., Tausz, M., O'Leary, G., Mollah, M. R., Tausz-Posch, S., Seneweera, S., et al. (2016). Elevated atmospheric [CO₂] can dramatically increase wheat yields in semi-arid environments and buffer against heat waves. *Glob. Change Biol.* 22, 2269–2284. doi: 10.1111/gcb.13263

- Gawinowski, M., Aubry, M., Buis, S., Garcia, C., Deswarte, J.-C., Bancal, M.-O., *et al.* (2025a). Selecting crop variables and parameters for the calibration of a new cultivar in a crop model: A case study of winter wheat for STICS. *Eur. J. Agron.* 168, 127677. doi: 10.1016/j.eja.2025.127677
- Gawinowski, M., Aubry, M., Buis, S., Garcia, C., Deswarte, J.-C., Bancal, M.-O., *et al.* (2025b). Varietal parameterization of eleven modern French wheat cultivars in the STICS crop model. doi: 10.57745/FDPIXY
- Gawinowski, M., Chenu, K., Deswarte, J.-C., Launay, M., and Bancal, M.-O. (2025c). Plant plasticity in the face of climate change – CO₂ offsetting effects to warming and water deficit in wheat. A review. *Environ. Exp. Bot.* 232, 106113. doi: 10.1016/j.envexpbot.2025.106113
- Gouache, D., Le Bris, X., Bogard, M., Deudon, O., Pagé, C., and Gate, P. (2012). Evaluating agronomic adaptation options to increasing heat stress under climate change during wheat grain filling in France. *Eur. J. Agron.* 39, 62–70. doi: 10.1016/j.eja.2012.01.009
- Hammer, Graeme, L., McLean, G., Van Oosterom, E., Chapman, S., Zheng, B., Wu, A., *et al.* (2020). Designing crops for adaptation to the drought and high-temperature risks anticipated in future climates. *Crop Sci.* 60, 605–621. doi: 10.1002/csc2.20110
- IPCC (2019). “Climate Change and Land An IPCC Special Report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems.”
- Kimball, B. A., Pinter, P. J., Garcia, R. L., LaMORTE, R. L., Wall, G. W., Hunsaker, D. J., *et al.* (1995). Productivity and water use of wheat under free-air CO₂ enrichment. *Glob. Change Biol.* 1, 429–442. doi: 10.1111/j.1365-2486.1995.tb00041.x
- Le Roux, R., Furusho-Percot, C., Deswarte, J.-C., Bancal, M.-O., Chenu, K., De Noblet-Ducoudré, N., *et al.* (2024). Mapping the race between crop phenology and climate risks for wheat in France under climate change. *Sci. Rep.* 14, 8184. doi: 10.1038/s41598-024-58826-w
- Lin, M., and Huybers, P. (2012). Reckoning wheat yield trends. *Environ. Res. Lett.* 7, 024016. doi: 10.1088/1748-9326/7/2/024016
- Lobell, D. B., and Asseng, S. (2017). Comparing estimates of climate change impacts from process-based and statistical crop models. *Environ. Res. Lett.* 12, 015001. doi: 10.1088/1748-9326/aa518a
- Lobell, D. B., Schlenker, W., and Costa-Roberts, J. (2011). Climate Trends and Global Crop Production Since 1980. *Science* 333, 616–620. doi: 10.1126/science.1204531
- Long, S. P., Ainsworth, E. A., Leakey, A. D. B., Nösberger, J., and Ort, D. R. (2006). Food for Thought: Lower-Than-Expected Crop Yield Stimulation with Rising CO₂ Concentrations. *Science* 312, 1918–1921. doi: 10.1126/science.1114722
- Manderscheid, R., Dier, M., Erbs, M., Luig, A., Oldenburg, E., Sickora, J., *et al.* (2020). Experimental data from the Braunschweig FACE studies on wheat growth responses to elevated CO₂ in combination with nitrogen supply or infrared warming during grain filling. *Open Data J. Agric. Res.* 6, 28–33. doi: 10.18174/odjar.v6i0.16397
- Mbow, C., Rosenzweig, C., Barioni, L. G., Benton, T. G., Herrero, M., Krishnapillai, M., *et al.* (2019). “Food Security,” in *Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems*, eds. P. R. Shukla, J. Skea, E. Calvo Buendia, V. Masson-Delmotte, H. O. Pörtner, D. C. Roberts, *et al.*
- Mihailescu, E., and Bruno Soares, M. (2020). The Influence of Climate on Agricultural Decisions for Three European Crops: A Systematic Review. *Front. Sustain. Food Syst.* 4, 64. doi: 10.3389/fsufs.2020.00064
- Monteith, J. L. (1972). Solar Radiation and Productivity in Tropical Ecosystems. *J. Appl. Ecol.* 9, 747. doi: 10.2307/2401901
- Moore, F. C., and Lobell, D. B. (2015). The fingerprint of climate trends on European crop yields. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 112, 2670–2675. doi: 10.1073/pnas.1409606112
- Nóia Júnior, R. D. S., Deswarte, J., Cohan, J., Martre, P., Van Der Velde, M., Lecerf, R., *et al.* (2023). The extreme 2016 wheat yield failure in France. *Glob. Change Biol.* 29, 3130–3146. doi: 10.1111/gcb.16662
- Olesen, J. E., and Bindi, M. (2002). Consequences of climate change for European agricultural productivity, land use and policy. *Eur. J. Agron.* 16, 239–262. doi: 10.1016/S1161-0301(02)00004-7
- Oury, F.-X., Godin, C., Mailliar, A., Chassin, A., Gardet, O., Giraud, A., *et al.* (2012). A study of genetic progress due to selection reveals a negative effect of climate change on bread wheat yield in France. *Eur. J. Agron.* 40, 28–38. doi: 10.1016/j.eja.2012.02.007
- Parent, B., Leclerc, M., Lacube, S., Semenov, M. A., Welcker, C., Martre, P., *et al.* (2018). Maize yields over Europe may increase in spite of climate change, with an appropriate use of the genetic variability of flowering time. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 115, 10642–10647. doi: 10.1073/pnas.1720716115
- Qiao, H., Feng, X., Escobar, L. E., Peterson, A. T., Soberón, J., Zhu, G., *et al.* (2019). An evaluation of transferability of ecological niche models. *Ecography* 42, 521–534. doi: 10.1111/ecog.03986
- Severini, A., Gawinowski, M., Bancal, M. O., Launay, M., Deswarte, J.-C., and Chenu, K. (in prep.). Evaluating crop models for future climate scenarios: wheat yield predictions using STICS and APSIM under combined CO₂, temperature and water stress conditions.
- Severini, A., Gawinowski, M., Launay, M., Bancal, M. O., Deswarte, J.-C., and Chenu, K. (2025). Assessing crop model adequacy for future climates., in *InterDrought VIII*, (La Serena, Chile).
- Supit, I., van Diepen, C. A., de Wit, A. J. W., Kabat, P., Baruth, B., and Ludwig, F. (2010). Recent changes in the climatic yield potential of various crops in Europe. *Agric. Syst.* 103, 683–694. doi: 10.1016/j.agsy.2010.08.009
- Toreti, A., Deryng, D., Tubiello, F. N., Müller, C., Kimball, B. A., Moser, G., *et al.* (2020). Narrowing uncertainties in the effects of elevated CO₂ on crops. *Nat. Food* 1, 775–782. doi: 10.1038/s43016-020-00195-4
- Wallach, D., and Thorburn, P. J. (2017). Estimating uncertainty in crop model predictions: Current situation and future prospects. *Eur. J. Agron.* 88, A1–A7. doi: 10.1016/j.eja.2017.06.001
- Weir, A. H., Bragg, P. L., Porter, J. R., and Rayner, J. H. (1984). A winter wheat crop simulation model without water or nutrient limitations. *J. Agric. Sci.* 102, 371–382. doi: 10.1017/S0021859600042702
- Wu, Y., Gong, Z., Bebbler, D. P., Miao, J., Zhao, Z., Jiang, Y., *et al.* (2019). Phenological matching drives wheat pest range shift under climate change. doi: 10.1101/614743