

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 Moyraze, 12510 Druelle Balsac

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

- Le changement climatique fait évoluer les conditions de culture des céréales à paille vers des scénarii météorologiques et culturaux nouveaux.
- Au-delà de l'élévation de températures qui va générer une anticipation phénologique et une probable hausse des stress thermiques, l'occurrence d'accidents climatiques divers au cours du cycle est mal cernée.
- L'augmentation de la concentration en CO₂ dans l'atmosphère va influencer le fonctionnement photosynthétique des plantes, avec des effets tantôt antagonistes, tantôt synergiques.

► Le projet REGARD visait à explorer et consolider des méthodes de description des conditions de croissance futures du blé tendre à l'aide d'outils et de méthodes déployables par des entreprises de sélection pour anticiper le changement climatique : faire évoluer des idéotypes et valoriser des réseaux expérimentaux.

ILLUSTRER ET
CARACTÉRISER
LE CHANGEMENT
CLIMATIQUE

ANALOGUES CLIMATIQUES

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.

Des données de projections climatiques à l'échelle mondiale (ISIMIP) ont été mobilisées (5 modèles * 3 scénarios) ; 4 périodes de 30 ans ont été considérées (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). Les calculs de similarité ont été réalisés à l'aide de la méthode de Wasserstein.

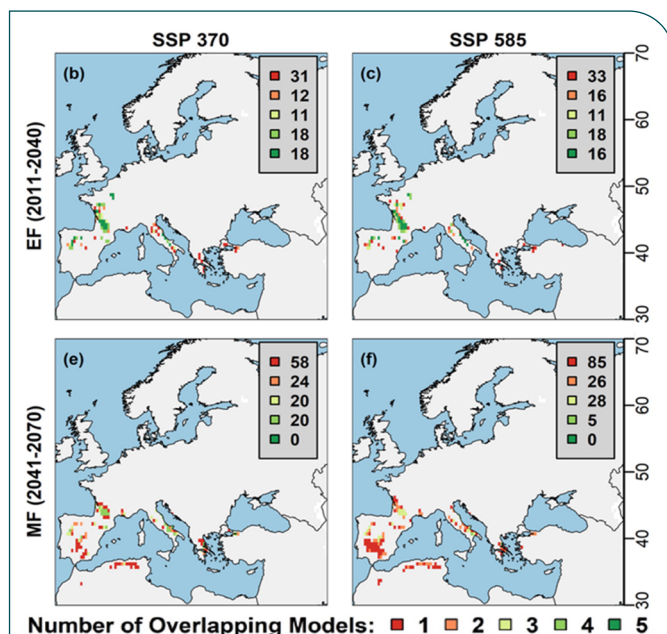


Figure 1 : Identification et convergence des 5 modèles climatiques pour le rattachement des 50 meilleurs analogues climatiques de Paris. La couleur des pixels renseigne sur le nombre de modèles pointant vers ce pixel comme analogue climatique retenu

L'application des analogues climatiques à l'échelle de la France et de l'Europe indique que:

- À échéances relativement proches (futurs proche et intermédiaire), des analogues sont identifiés de manière convergente en Europe
- À échéance plus lointain (futur lointain), les analogues deviennent moins similaires, plus éloignés géographiquement, et les modèles moins convergents.

De plus, en Europe, les analogues climatiques ne sont pas systématiquement au sud.

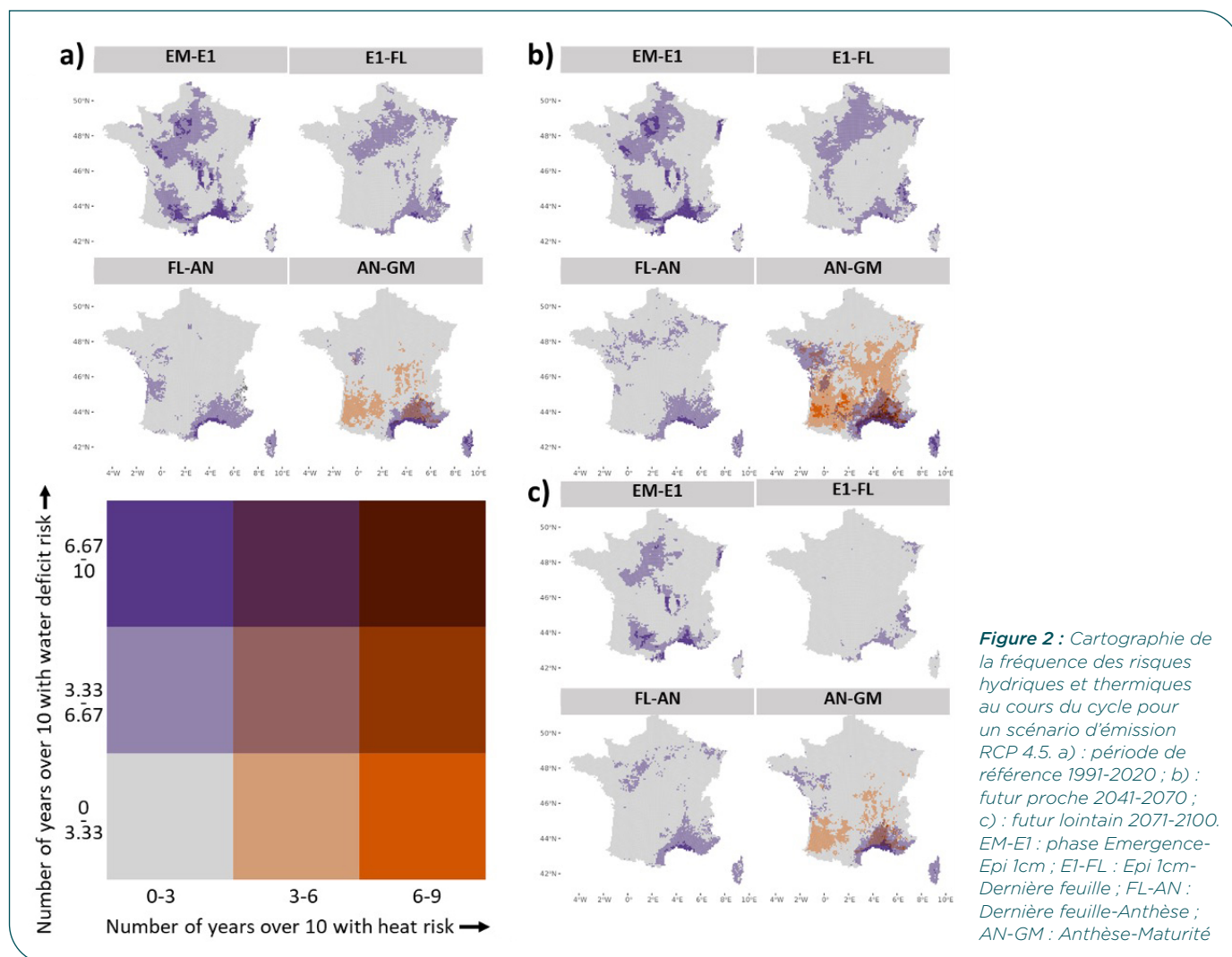
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

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

INDICATEURS ÉCOCLIMATIQUES

Les indicateurs écoclimatiques sont des indicateurs de climat ou d'aléas adossés à la phénologie des cultures pour intégrer l'évolution des périodes de sensibilité et la dérive phénologique liée au réchauffement climatique.

A partir de 3 modèles climatiques issus deDRIAS, 22 indicateurs concernant les manques et excès d'eau, les températures trop froides ou trop élevées, les effets de faibles rayonnements ponctuels et les conditions de vernalisation (indicateurs ajustés par phénophase) sont calculés pour le blé tendre sur le territoire français (maille 8x8km) pour différentes échéances de temps.



Les indicateurs écoclimatiques confirment la hausse des stress thermiques chauds et la réduction générale des stress froids, malgré l'évolution phénologique qui conduit à des stades anticipés. Le recours à des indicateurs de climat sans prise en compte du sol à travers un bilan hydrique limite cependant fortement l'estimation précise des aléas hydriques (conditions de semis et de levée, excès d'eau hivernal, stress hydrique printanier).

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

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

MODÈLES DE CULTURE

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.

Un travail bibliographique initial a été réalisé sur les évidences expérimentales des effets du $e[CO_2]_{atm}$ en interaction avec des stress hydriques et/ou thermiques, ainsi qu'une analyse des formalismes de réponse au $[CO_2]$ dans un ensemble de modèles. Les modèles de culture STICS et APSIM ont été testés sur des jeux de données publiés (USA, All, Aus), comprenant un enrichissement en CO_2 combiné à d'autres stress: thermiques ou hydriques.

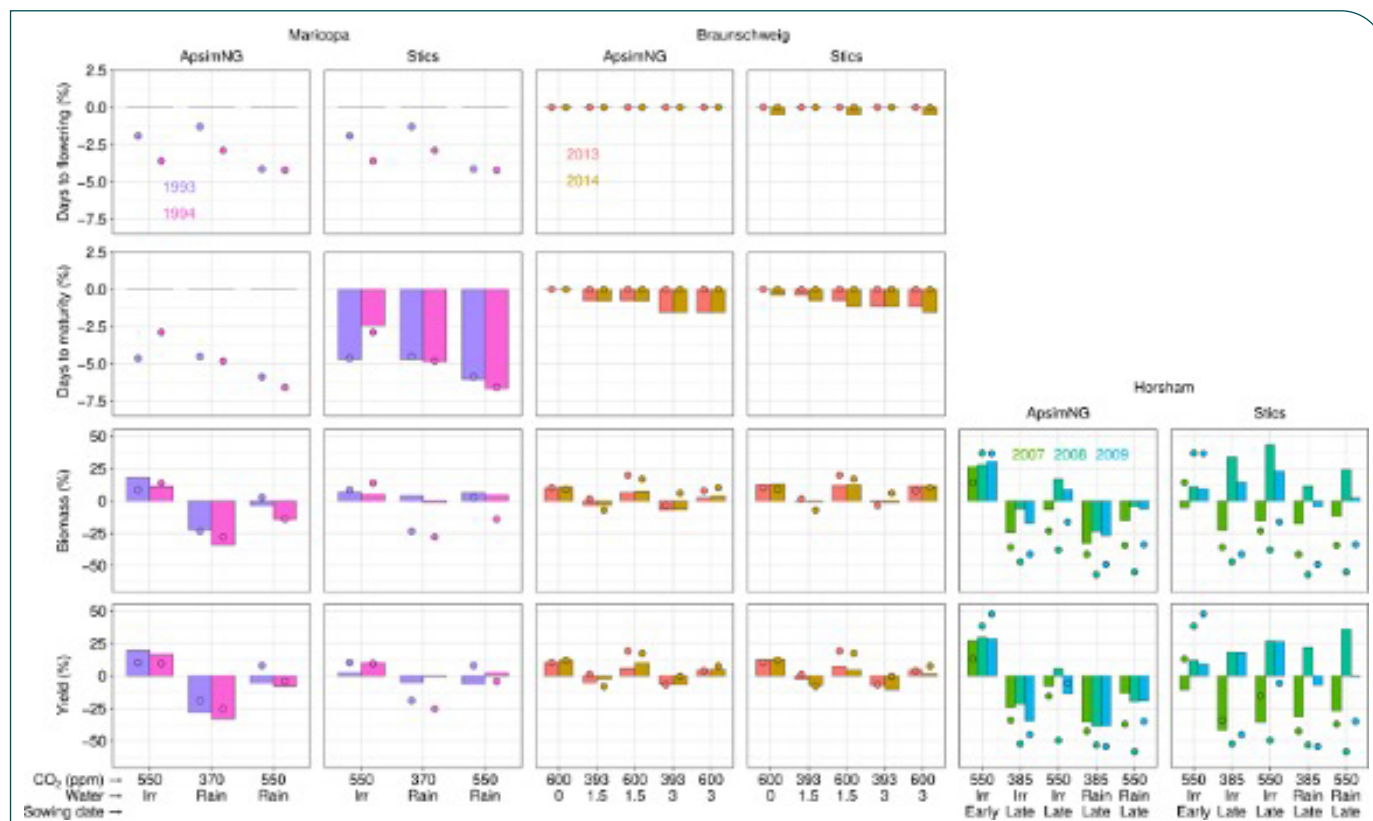


Figure 3 : Diagramme des effets relatifs observés (points) et simulés (barres) pour différentes variables descriptives de la physiologie du couvert, selon les essais, modèles, années d'expérimentation et modalités, en % de la modalité témoin (irriguée, sans stress thermique supplémentaire et à $[CO_2]_{atm}$ naturelle).

Dans la majorité des études expérimentales, l'effet de fertilisation du CO_2 ne compense pas complètement les effets délétères des élévations de température ou de stress hydrique.

Les réponses variées des modèles de culture à $e[CO_2]_{atm}$ peuvent provenir du formalisme initial comme de paramétrages retenus. Les domaines de validité sont hétérogènes et méconnus. La mise en œuvre de STICS et APSIM sur des jeux de données impliquant des interactions environnementales a mis en avant une certaine robustesse vis-à-vis du $e[CO_2]_{atm}$, mais une fragilité face à certains aléas climatiques prédominants.

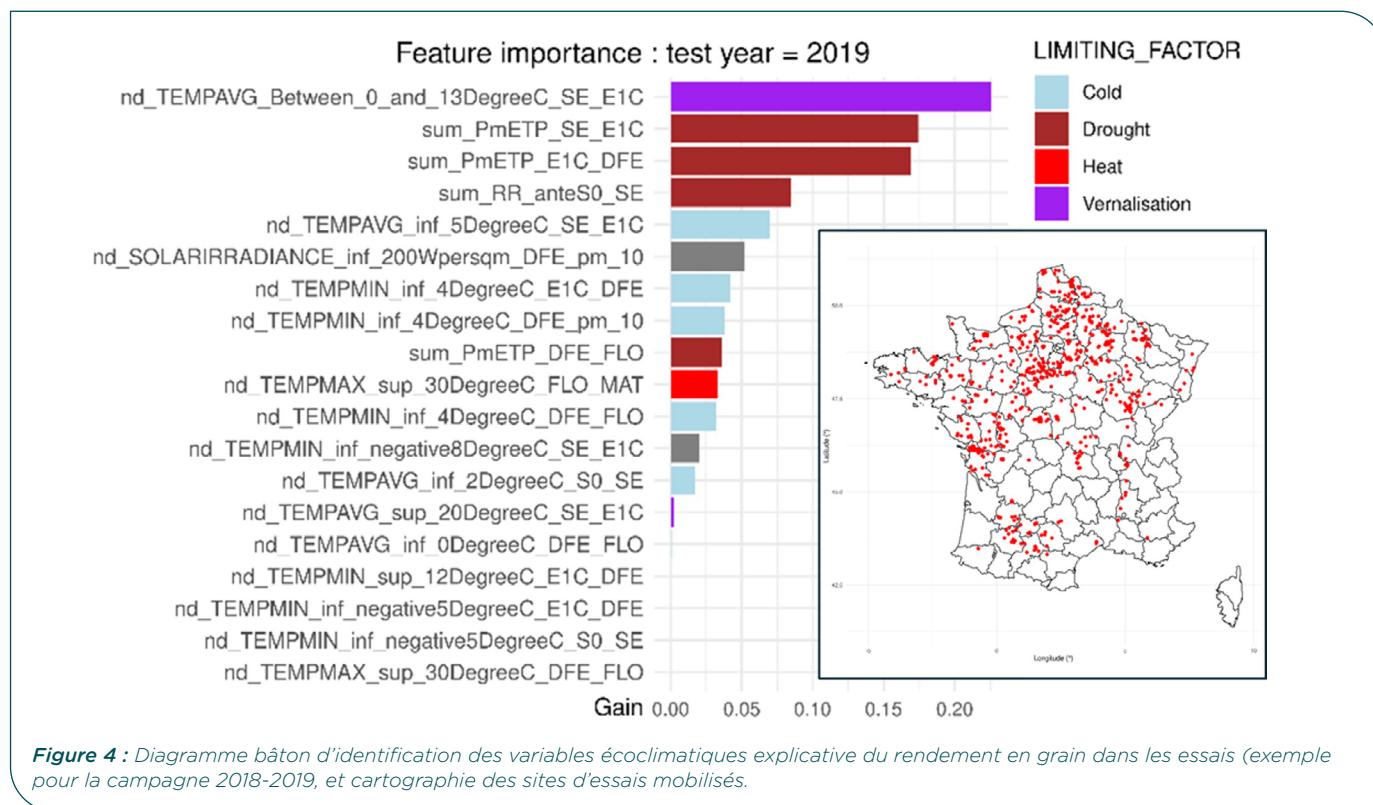
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Gawinowski, M., Chenu, K., Deswarte, J.-C., Launay, M., and Bancal, M.-O. (2025). Plant plasticity in the face of climate change - CO_2 offsetting effects to warming and water deficit in wheat. A review. *Environ. Exp. Bot.* 232, 106113. doi: 10.1016/j.envexpbot.2025.106113

APPLICATION À UN RÉSEAU DE SÉLECTION

Les réseaux expérimentaux multi-sites et multi-années capturent naturellement un ensemble de situations climatiques, potentiellement représentatives de climats futurs. Analyser les indicateurs écoclimatiques de tels réseaux et les comparer à ceux projetés dans le futur permet d'évaluer la nécessité de faire évoluer son expérimentation.

Les données de 8 années d'essais du programme de sélection Blé Tendre de RAGT 2n ont été mobilisées pour calculer un ensemble d'indicateurs écoclimatiques. Les variables explicatives du rendement ont été identifiées. Les projections climatiques sur du futur proche ont été réalisées pour ces sites d'essais: les variables environnementales évoluent peu, signe que le réseau expérimental reste pertinent.



Le travail d'envirotypage et de projection climatique a permis de mettre en exergue des difficultés sous-estimées : caractériser les sols pour décrire les stress hydriques, intégrer finement la phénologie pour capter les réponses variétales, débiaiser les modèles climatiques et enfin manipuler de larges jeux de données climatiques (multisite x multimodèle x multisécenario).

RETOUR D'EXPÉRIENCE ET CONCLUSIONS

- Différentes méthodes existent pour permettre de mieux cerner le changement climatique et de l'intégrer dans l'activité d'une entreprise de sélection.
- La méthode des analogues climatiques reste très générale et requiert beaucoup de calculs ; elle ne renseigne pas spécifiquement sur les aléas mais permet d'anticiper l'évolution de niches écoclimatiques (dont pression sanitaire, évolution des systèmes de culture).
- Les indicateurs écoclimatiques permettent aisément d'identifier la fréquence et l'intensité des stress ; ils peuvent être utilisés de manière univariée (un indicateur à la fois) ou multivariée (combinaison de plusieurs facteurs). Ils sont aisément transposables à une démarche d'envirotypage, mais ils restent sensibles aux biais des modèles climatiques compte-tenu de l'établissement de seuils de sensibilité.
- Les modèles de culture proposent une vision intégrée du fonctionnement des cultures et intègrent les capacités de compensation au cours du cycle. Ils sont cependant exigeants en données d'entrée et requièrent des étapes de paramétrage et de validation complexes. Ils sont en capacité d'intégrer les effets de l'élévation du CO₂, mais les connaissances et les données expérimentales sont encore trop limitées pour précisément évaluer son impact en interaction avec les autres effets du changement climatique: hausse des températures, modification du régime des pluies.