

## Des variétés et des pratiques pour gérer les risques météorologiques et changements climatiques

Tardieu F.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> INRA, LEPSE, Campus INRA / Montpellier SupAgro, F-34060 Montpellier Cedex 2

**Correspondance** : francois.tardieu@inra.fr

### Résumé

Face à la variabilité annuelle du climat, les agriculteurs doivent choisir des variétés et des pratiques qui soit limitent le risque de perte de rendement en cas d'événements climatiques défavorables (mais en général réduisent le rendement potentiel) soit permettent un rendement potentiel élevé (avec un risque plus élevé). On présente ici les avantages et risques associés à plusieurs caractères mesurables sur les plantes. En particulier, un optimum de durée du cycle végétatif existe pour le rendement, et dépend de la température et de la pluviométrie de l'année dans une parcelle donnée. Des expériences avec des centaines de variétés ont permis d'identifier cet optimum, et la modélisation permet de le calculer en tous lieux à partir du climat des 30 dernières années. L'optimum calculé est proche des pratiques actuelles des agriculteurs, consultables sur les bases de données européennes. Si ces pratiques adaptatives étaient encore utilisées par les agriculteurs de 2050, les rendements de maïs pourraient rester constants ou même augmenter en certains lieux, alors qu'ils baisseraient suivant les modèles qui ne prennent pas en compte les pratiques adaptatives. Pour aller plus loin, on peut mesurer les caractéristiques propres de centaines de variétés en plateformes de phénotypage, et les prévoir à partir de marqueurs du génome. La modélisation permet ensuite de prévoir le rendement dans des centaines de lieux, y compris pour des nouvelles variétés qui ne sont connus que par leur génome. On peut ainsi préparer dès maintenant des variétés adaptées à la diversité des scénarios environnementaux associés au changement climatique.

**Mots-clés** : Génétique, Changement climatique, Risque, Modélisation

### Abstract : Varieties and management practices for climatic risks and climate change

To face the year-to-year variability of climate, farmers need to choose varieties and management practices that either limit the risk of low yield in case of unfavourable climatic events (thereby reducing the maximum yield in most cases), or allow a maximum yield (with a higher risk). I present here the trades off of several measurable plant traits. In particular an optimum cycle duration is associated with highest yield, and depends on temperature and rainfall of the current year in a given field. Experiments with hundreds of varieties allowed identification of this optimum, and modelling allows its calculation based on the climatic data of the last 30 years. Calculated optimums are close to current farmer practices, as shown by comparison with European databases. If these adaptive practices were still used by farmers in 2050, maize yields could be maintained or even increase in some places, whereas they are predicted to decrease by models that do not take farmer adaptation into account. Beyond that, one can measure traits of hundreds of varieties in phenotyping platforms, and predict them based on genome markers. Then, modelling allows yield prediction in hundreds of fields, including for varieties that are only known by their genome. One can, in this way, prepare varieties adapted to the diversity of environmental scenarios associated to climate change.

**Keywords** : Genetics, Climate change, Risk, Modelling

## 1. L'agriculture, une activité intrinsèquement risquée

Les plantes sont placées dans des conditions plus difficiles que notre intuition ne nous suggère. Lors d'une journée d'été, toutes leurs cellules peuvent se trouver à une température de 12°C le matin, avec un état hydrique favorable, alors qu'elles se trouvent à 35°C et sévèrement desséchées l'après-midi, même si les plantes sont arrosées (rappelons que nos cellules sont à 37°C et ont un état hydrique favorable quelles que soient les conditions extérieures). Leur métabolisme est donc en perpétuelle acclimatation drastique, qu'on peut observer quand on regarde les variations d'expression de gènes ou de concentration de métabolites au cours d'une journée (Tardieu *et al.*, 2017). Les "stress" hydriques et thermiques ne sont que des épisodes plus sévères que la normale, sous lesquels les plantes ont évolué depuis des millions d'années et pour lesquels elles ont mis en place des mécanismes d'acclimatation. Un principe quasi-général est que les processus qui protègent les plantes contre les aléas environnementaux ont un coût, qui réduit le risque de disparition mais aussi la production de graines. L'évolution a eu tendance à choisir des stratégies conservatrices (croissance lente, transpiration faible) : un événement extrême peut éradiquer les plantes ayant des stratégies "risquées". A l'inverse, les plantes trop conservatrices peuvent être éliminées les années plus favorables par des plantes plus compétitives (Tardieu *et al.*, 2018). En milieu naturel, les plantes sont donc soumises à un double risque, disparaître en cas d'évènements extrêmes qui demanderaient une stratégie conservatrice, ou être dominées par des plantes à croissance plus rapide le reste du temps. L'"équilibre de la nature", souvent mis en exergue comme un principe souhaitable pour l'agriculture (Rahbi, 2018), n'est donc qu'une apparence. Les génotypes présents dans un milieu naturel donné varient rapidement en fonction des alternances environnementales, et évoluent rapidement à cause de la fréquence des mutations naturelles.

Les couverts agricoles sont soumis aux mêmes contraintes et risques que les couverts naturels, mais l'agriculteur peut gérer les risques liés aux variations climatiques par le choix des pratiques culturales (Tardieu *et al.*, 2018). Celles-ci ont été conçues depuis des milliers d'années pour limiter les risques de perte de rendement en année défavorable, en particulier le choix des espèces et des variétés et le positionnement du cycle cultural au cours de l'année. L'opposition entre réduction du risque et production existe, comme en milieux naturels : les pratiques et les variétés "conservatrices" (cf plus bas) tendent à réduire le rendement potentiel, mais évitent un risque de perte totale du rendement. Suivant les caractéristiques environnementales de leurs parcelles, mais aussi leur stratégie personnelle, les agriculteurs privilégient soit un rendement potentiel plus élevé, soit un risque plus faible. Mon expérience a montré que les petits agriculteurs andins raisonnent ce choix de la même manière que les agriculteurs européens. Il est à noter que l'agriculture a eu tendance à favoriser des plantes moins conservatrices que les milieux naturels, car la perte de rendement dans une parcelle n'a pas de conséquence sur la diversité génétique de la culture considérée.

## 2. Quels caractères pour quels scénarios environnementaux ?

Puisque les conditions varient drastiquement entre années, il n'y a pas de caractères universels favorables à la production ou à la qualité des produits: tout caractère peut avoir des conséquences favorables, défavorables ou nulles suivant les sites, et en chaque site suivant les années (Tardieu, 2012).

Une durée de cycle réduite est un caractère qui a été sélectionné depuis longtemps par l'évolution. Beaucoup d'espèces qui croissent dans le désert ont un cycle très court, qui leur permet de profiter d'une pluie pour produire rapidement des graines, lesquelles pourront attendre la prochaine pluie. Chez les plantes agronomiques, la réduction de durée du cycle (esquive) permet de terminer le cycle en conditions encore humides, même si l'année est sèche. Cependant, elle engendre une perte de production en conditions favorables, puisque cette production s'accumule pendant une période plus courte. Le choix de la durée du cycle est donc un pari sur le climat de l'année à venir, entre esquive

(cycle court) et rendement potentiel maximum (cycle long). Un système racinaire de grande taille peut apparaître comme un caractère favorable en conditions de sécheresse. C'est effectivement le cas en sol profond: les variétés à fort système racinaire captent davantage d'eau, ce qui leur permet d'accumuler plus de carbone. Si le sol est peu profond en revanche, cette stratégie est néfaste parce qu'elle consiste à investir du carbone dans les racines sans que l'absorption d'eau soit améliorée: ce carbone serait mieux utilisé dans d'autres organes de la plante.: Trois programmes d'amélioration génétique de plantes soumises à la sécheresse ont abouti, *in fine*, à diminuer la taille du système racinaire (Campos *et al.*, 2006 ; Edmeades *et al.*, 1993). Réduire la transpiration par voie génétique est aussi possible en jouant sur la sensibilité des stomates au déficit hydrique. Il est notamment possible de manipuler la synthèse d'hormones qui servent de signalétique du stress entre les racines et les parties aériennes. Ceci permet d'économiser de l'eau, mais réduit la photosynthèse. Là encore, c'est une protection qui a un coût, et n'a d'intérêt que si le climat est particulièrement sec. À l'opposé, des allèles ont été identifiés qui permettent aux feuilles de continuer à grandir même en cas de déficit hydrique prononcé. Ils permettent de sauvegarder la capacité de photosynthèse de la plante. Ils peuvent aussi causer la mort de celle-ci par épuisement rapide de l'eau du sol si la sécheresse se prolonge. Chaque caractère de tolérance est ainsi associé à des scénarios précis de sécheresse. Dans une région donnée, le climat est imprévisible d'une année sur l'autre. C'est donc en termes de probabilité qu'on peut évaluer si un caractère est favorable en un lieu (Tardieu *et al.*, 2018).

Les caractères favorables ne sont donc pas spécifiques d'un milieu naturel ou d'un mode de production, à cause de la variation du climat entre années. Chaque agriculteur optimise les variétés choisies en fonction de la fréquence attendue de scénarios maximisant les avantages ou les inconvénients de leurs caractères (Tableau 1).

**Tableau 1** : Intérêts et inconvénients de plusieurs caractères d'adaptation. Adapté de (Tardieu *et al.*, 2018)

CARACTÈRES	AVANTAGES	INCONVÉNIENTS	SCÉNARIO MAXIMISANT LES AVANTAGES	SCÉNARIO MAXIMISANT LES INCONVÉNIENTS
Une durée de vie plus courte ("esquive")	Les plantes terminent leur vie avant que le sol ne soit trop sec	La biomasse s'accumule pendant une durée plus courte	Année très sèche	Fin du cycle en conditions favorables
Réduction de transpiration par fermeture stomatique ("évitement")	La plante garde de l'eau pour la fin de la saison	La plante produit moins de biomasse et de rendement	Stress en fin de saison	Fin du cycle en conditions favorables
Plus de racines	Si le sol est profond, les plantes peuvent extraire plus d'eau	Les racines coûtent cher en carbone, inutile si le sol est peu profond	Sol profond et année sèche	Sol peu profond ou année humide
Poursuivre la croissance en sécheresse	La plante produit plus de biomasse	Risque de mort de la plante par manque d'eau	Saison modérément sèche ou fin de saison humide	Saison très sèche

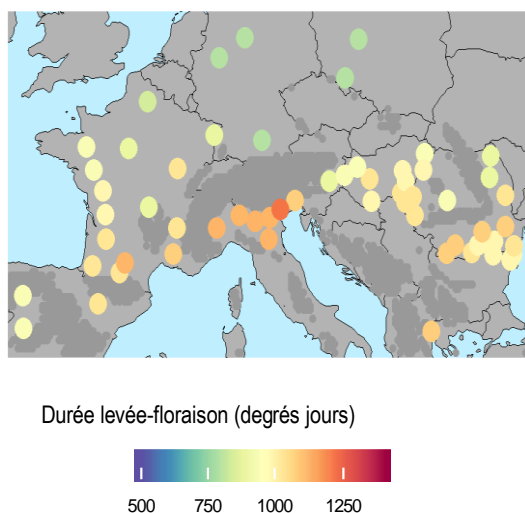
### 3. Les agriculteurs peuvent réduire l'impact des changements climatiques en optimisant la durée du cycle cultural, en suivant des règles qu'ils suivent déjà aujourd'hui.

La plupart des études prédisent des chutes de rendement à la suite des changements climatiques. Cependant, ces études ne considèrent que rarement l'adaptation des pratiques des agriculteurs aux conditions locales. Nous avons cherché à prédire quel serait l'effet du changement climatique sur le rendement du maïs en Europe si les agriculteurs continuaient d'utiliser en 2050 les règles de décisions

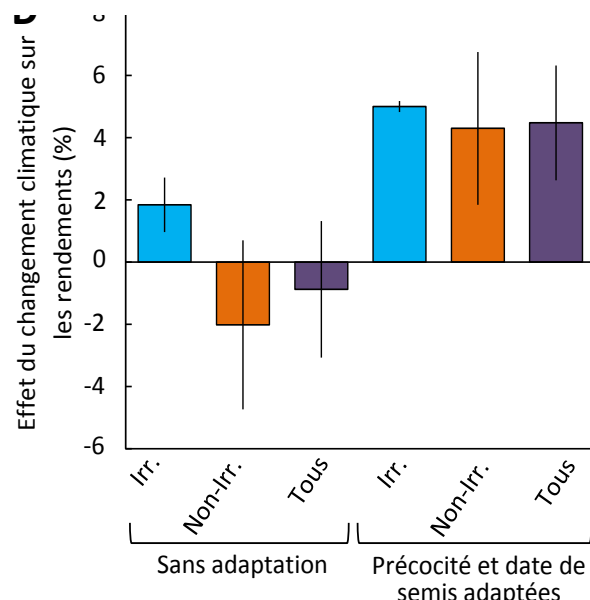
qu'ils utilisent aujourd'hui pour adapter les dates de semis et la précocité des variétés (Parent *et al.*, 2018). Ces réductions de rendements, prévues pour la plupart des espèces cultivées, sont souvent attribuées à une plus grande fréquence d'épisodes chauds et secs. Cependant, le raccourcissement du cycle végétatif lié au réchauffement climatique joue aussi un rôle primordial. Pour une variété donnée, la durée de cycle (en jours) est réduite par une augmentation de température, ce qui diminue la photosynthèse cumulée et le rendement (Tableau 1). Cet effet pourrait être compensé par l'utilisation de variétés plus tardives par les agriculteurs, qui utiliseraient ainsi la large gamme de précocité proposée par les semenciers pour contrer les effets des changements climatiques. Les agriculteurs adaptent d'ores et déjà la date de semis et la durée du cycle végétatif aux variations de climat entre sites et aux premiers effets des changements climatiques. Par exemple, les variétés de maïs de précocité intermédiaire principalement cultivées à des latitudes comprises entre 44.8° et 45.9° (ex : Dordogne) dans les années 1990 sont cultivées aujourd'hui presque deux degrés de latitude plus au Nord (entre 46.5° et 47.5, ex : Maine-et-Loire).

Tout d'abord, nous avons analysé une collection de 121 maïs présentant une variabilité de dates de floraison et montré que dans chaque essai, le rendement est lié à la précocité de floraison avec une date optimum. Pour des précocités inférieures à cet optimum, la photosynthèse cumulée est insuffisante par rapport à un objectif de rendement maximum. Au-delà de l'optimum, le remplissage du grain est affecté car il se déroule en conditions non-optimales. Cet optimum est plus précoce en conditions non-irriguées, traduisant une stratégie bénéfique d'évitement de la sécheresse (Tableau 1).

Nous avons fait l'hypothèse que chaque agriculteur, par expérience, choisit la date de semis la plus précoce possible tout en évitant les risques de gelées de printemps, et la variété présentant la durée de cycle qui optimise le rendement. Ces règles ont été insérées dans un modèle de culture qui simule le rendement du maïs en fonction des conditions climatiques, de la conduite de culture et de la variété. Nous avons ensuite comparé les dates de semis, les dates de floraison et les rendements simulés pour chaque site avec les données expérimentales disponibles dans les bases de données européennes. Les agriculteurs utilisent les dates de semis et les précocités proches, en chaque site, des optimums calculés par le modèle.



Temps thermique optimal à floraison en degré



**Figure 1** : **a** : Durée optimale entre le semis et la floraison dans 59 sites européens. Celle-ci est plus courte au nord (variétés plus précoces) qu'au sud, avec une grande variabilité dans une région donnée: en parcelle sèche la durée optimale est plus courte (Tableau 1). **b** : Effet du changement climatique en 2050 sur la production de maïs à l'échelle européenne, pour les cultures irriguées, non-irriguées, considérant ou non l'adaptation des agriculteurs pour les dates de semis et précocités des variétés.

Si les agriculteurs n'adaptent pas la durée du cycle et les dates de semis d'ici 2050 (hypothèse peu probable mais retenue dans les simulations actuelles), les rendements seraient diminués avec un impact de -2 % à l'échelle européenne. Si les agriculteurs s'adaptent, les semis seront avancés de 20 jours en moyenne ; les durées de cycles optimales seront allongées dans chaque site. L'effet du changement climatique sur les rendements deviendrait alors positif dans une proportion importante des sites, en particulier au nord de l'Europe, avec une augmentation de la production de + 4.5% à l'échelle européenne (Figure 1b). Cette étude démontre donc l'importance de l'adaptation des choix des agriculteurs, qui peut réduire les impacts négatifs des changements climatiques sur la production agricole.

#### 4. Elaborer des variétés pour les scénarios climatiques et les outils pour les choisir à partir des connaissances sur le génome et le climat local

Il est maintenant possible de mesurer les caractères propres de centaines de variétés dans des dispositifs robotisés de phénotypage (Tardieu *et al.*, 2017). On peut aussi, pour un coût maintenant modeste, "marquer" le génome des mêmes variétés, et relier les caractères mesurés aux marqueurs du génome, c'est la prédiction génomique (Negro *et al.*, 2019). Enfin, mesurer ou estimer les conditions environnementales dans chaque champ d'agriculteur est maintenant envisageable grâce aux réseaux de capteurs et aux grilles environnementales. On peut donc estimer et prévoir des caractères tels que la transpiration, la longueur des racines, ou encore, la durée du cycle végétatif de centaines de variétés, et les ajuster pour obtenir des variétés offrant des rendements acceptables dans des conditions environnementales diverses (Tableau 1). Cependant, prévoir quel sera le comportement de chaque variété dans chaque condition climatique est une tâche difficile pour des centaines de variétés dans des millions de champs.

Nous avons cherché à répondre à ce défi (Millet *et al.*, 2019) en combinant des mesures en conditions contrôlées pour des centaines de plantes, des essais en parcelles d'agriculteurs et l'utilisation d'un modèle. Nous avons semé 246 variétés de maïs dans 25 sites situés dans 5 pays européens et au Chili (Figure 2). Chacun de ces champs était muni de capteurs permettant de mesurer les conditions climatiques. En fin de saison, nous avons évalué la récolte et le nombre de grains de chaque variété. A partir de cette masse de données, nous avons établi un modèle statistique qui permet de prévoir le rendement des variétés de maïs en fonction de leurs gènes et des conditions environnementales, en utilisant les caractères mesurés en plateformes de phénotypage (Figure 2). Ce modèle permet de prédire le rendement de milliers de variétés de maïs avec plus de précision que les méthodes utilisées actuellement, y compris pour de nouveaux climats et variétés non testés expérimentalement. Il pourra devenir un outil de décision permettant aux agriculteurs de mieux choisir leurs semences. Il pourra aussi être utile aux semenciers pour adapter leur catalogue de semences aux conditions climatiques des diverses régions européennes. Ainsi, les agriculteurs pourront se prémunir contre les pertes de rendements que prévoient certains scénarios climatiques.



Figure 2 : Collecte de données dans des champs expérimentaux et en plateforme de phénotypage

Même si d'intenses efforts d'adaptation devront être faits par les agriculteurs, les semenciers et la recherche publique, des solutions mettant en jeu des pratiques culturales innovantes et des variétés adaptées sont possibles malgré les changements climatiques et l'augmentation de la demande pour les produits agricoles. On peut ainsi envisager des scénarios volontaristes mais positifs, qui évitent les simplifications extrêmes comme la "collapsologie" ou la négation du risque climatique.

### Références bibliographiques

Campos H., Cooper M., Edmeades G.O., Loffler C., Schussler J.R., Ibanez M., 2006. Changes in drought tolerance in maize associated with fifty years of breeding for yield in the US corn belt. *Maydica* 51, 369-381.

Edmeades G.O., Bolanos J., Hernandez M., Bello S., 1993. Causes for silk delay in a lowland tropical maize population. *Crop Science* 33, 1029-1035.

Millet E.J., Kruijer W., Coupel-Ledru A., Prado S.A., Cabrera-Bosquet L., Lacube S., Charcosset A., Welcker C., van Eeuwijk F., Tardieu F., 2019. Genomic prediction of maize yield across European environmental conditions. *Nature Genetics* 51, 952-+.

Negro S.S., Millet E.J., Madur D., Bauland C., Combes V., Welcker C., Tardieu F., Charcosset A., Nicolas S.D., 2019. Genotyping-by-sequencing and SNP-arrays are complementary for detecting quantitative trait loci by tagging different haplotypes in association studies. *BMC Plant Biology* 19.

Parent B., Leclere M., Lacube S., Semenov M.A., Welcker C., Martre P., Tardieu F., 2018. Maize yields over Europe may increase in spite of climate change, with an appropriate use of the genetic variability of flowering time. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 115, 10642-10647.

Rahbi P., 2018. L'agroécologie, une éthique de vie; entretien avec Jacques Caplat. Arles: Actes Sud.

Tardieu F., 2012. Any trait or trait-related allele can confer drought tolerance: just design the right drought scenario. *Journal of Experimental Botany* 63, 25-31.

Tardieu F., Cabrera-Bosquet L., Pridmore T., Bennett M., 2017. Plant Phenomics, From Sensors to Knowledge. *Current Biology* 27, R770-R783.

Tardieu F., Simonneau T., Muller B., 2018. The Physiological Basis of Drought Tolerance in Crop Plants: A Scenario-Dependent Probabilistic Approach. *Annual Review of Plant Biology* 69, 733-759.

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).