



L'effet du climat pèse sur l'évolution des rendements des grandes cultures.

État des lieux

1 Les rendements mondiaux sous l'influence du changement climatique

En blé tendre, les rendements ont tendance à stagner dans toute l'Europe de l'Ouest. En maïs, les progressions des dernières années montrent aussi des signes de ralentissement. Ces constats dans les régions à bons rendements s'expliquent en grande partie par les effets négatifs du changement climatique.

L'analyse des données historiques des rendements moyens en France montrent qu'ils stagnent en blé tendre de façon statistiquement significative depuis 1996. C'est également vrai pour les autres céréales à paille et le tournesol. En colza et en maïs, la progression continue, mais le taux d'augmentation annuel est moins élevé. Ces moindres performances ne concernent pas que la France. En blé tendre, le ralentissement de l'augmentation des rendements touche tous les pays à bonne productivité, dont l'Europe de l'Ouest, avec notamment le Royaume-Uni, la Belgique, l'Allemagne, l'Espagne et l'Italie (figure 1). En France, alors que la pente de progression était de 1,26 q/ha/an entre 1955 et 1989, elle est estimée à 0,27 q/ha/an sur la période 1990 à 2008. Les rendements sont donc aujourd'hui inférieurs de 10 à 14 q/ha à ce qu'ils auraient dû être sur la base des progrès réalisés des années 50 à

80. Ils demeurent néanmoins nettement supérieurs à la moyenne mondiale, puisque le ratio entre les rendements français et mondiaux est de 2,5.

1 Le changement climatique peu pénalisant en colza

Dans une étude portant sur l'effet des températures, des précipitations et du quotient thermique sur les deux phases critiques du développement du colza que sont la floraison et le remplissage des graines, le CETIOM a voulu comprendre l'impact du changement climatique en France sur l'oléagineux. Effectués sur des données recueillies de 1989 à 2009 dans le Cher, les calculs ne mettent pas en évidence une incidence claire du réchauffement.

Des effets de sécheresse et d'échaudage en blé tendre

Si plusieurs facteurs expliquent l'évolution des rendements en céréales, l'importance des effets négatifs du climat des vingt dernières années a été démontrée sur le blé tendre. En France, la hausse des températures et la recrudescence des sécheresses expliqueraient 6 à 9 q/ha perdu sur les 10 à 14 q/ha en moins par rapport à la tendance 1955-1989. Le nombre de jours échaudants, où la température dépasse 25 °C durant le remplissage, s'est nettement accru. Or il est difficile de les esquiver en avançant le semis, car il faut également satisfaire les besoins en durée du jour de la plante avant le stade épi 1 cm. L'évolution des conduites de cultures pèse peu à côté du climat. L'effet des précédents (moins de protéagineux, plus de parcelles en blé de blé... etc) a un impact estimé entre 1 et 4 q/ha. La réduction des apports d'azote n'aurait pour sa

part contribué qu'à une diminution de 1,5 à 2,3 q/ha. Celle-ci serait de 1 q/ha en ce qui concerne l'expansion des techniques culturales simplifiées et de 1,5 q/ha du fait de la réduction de la protection fongicide. Parce qu'elles valorisent moins l'intérêt marginal des intrants, les périodes de prix moins rémunérateurs ou la PAC ont pu avoir aussi une incidence. Bien qu'évalué entre 10 et 15 q/ha entre 1990 et 2008 (voir article p 25), le progrès génétique n'a donc pas suffi à lui seul à neutraliser les effets du climat et des pratiques.

L'importance des effets négatifs du climat des 20 dernières années a été démontrée sur le blé tendre.

Des progressions de rendement nuancées selon les régions en maïs

En maïs grain, la pente de progression du rendement national, estimée à 1,35 q/ha/an, montre un ralentissement depuis les années 2000. Toutefois, cette tendance, devenue statistiquement significative à l'échelle nationale, recouvre une diversité d'évolution entre les ré-

Plusieurs initiatives mondiales visent à fédérer les efforts de recherches sur la génétique du blé tendre.



Blé tendre : la recherche mondiale se mobilise

2

Progresser sur les rendements en blé tendre relève d'un impératif : la céréale fournit 20 % des calories consommées au niveau mondial. Or entre 2000 et 2010, la production n'a pas suffi à satisfaire la demande 6 années sur 10, et d'ici 2050, la consommation mondiale devrait augmenter de 70 %. Les enjeux sont importants, or les entreprises de sélection n'investissent pas autant dans le blé tendre que dans le maïs du fait de moindres retours sur investissements, dus notamment à la concurrence des semences de ferme.

Afin de relever le défi de la progression des rendements dans toutes les régions du monde, mais aussi de la complexité du génome du blé, hexaploïde, la communauté internationale des scientifiques s'est mobilisée.

- **IWSGC** : c'est en 2005 que ce consortium international pour le séquençage du génome du blé a été mis en place. Il réunit scientifiques du public et du privé, sélectionneurs et agriculteurs. Il vise à décrypter le génome du blé en réunissant un maximum de moyens pour gagner du temps.
 - **Wheat Initiative** : ce projet dit en français « initiative de recherche internationale pour l'amélioration du blé » est pour sa part né en 2011. Il vise à coordonner les programmes de recherche, à favoriser la coopération et à fixer des priorités. L'INRA, avec plusieurs scientifiques de renommée internationale, y est très actif.
 - **Wheat global alliance** : en 2011 également, le CIMMYT (Centre de sélection mondial basé au Mexique) a lancé cette alliance qui fédère 86 instituts de recherche appliquée, 71 universités et instituts de recherche fondamentale, 15 organisations privées et 14 ONG ou coopératives de producteurs.
- Un grand nombre d'espèces, pas seulement le blé, bénéficie de ces partenariats internationaux entre centres de recherche et fondations.

Blé tendre : l'Europe de l'Ouest confrontée à une stagnation des rendements

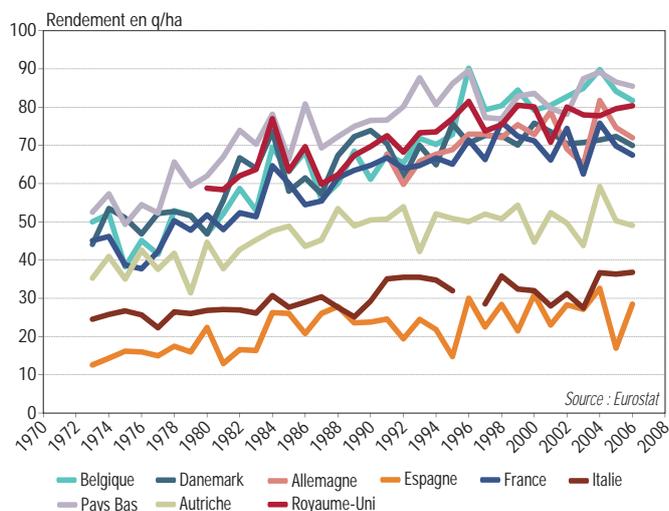


Figure 1 : Évolution des rendements moyens du blé tendre dans plusieurs pays de l'UE et de l'Ouest. L'Europe de l'Ouest, où les rendements sont les plus élevés, est confrontée à une stagnation des rendements du blé tendre depuis le milieu des années 1990.

gions. Le changement climatique est à l'origine au niveau national d'une augmentation de l'offre en température. Elle va de + 150 à 200 degrés-jours du 1^{er} avril au 15 octobre entre les périodes 1959-1988 et 1989-2011. Cela correspond à deux groupes de précocité ou à un gain de 8 à 10 points d'humidité du grain ou de teneur en matière sèche. Cette hausse a eu des effets positifs dans les régions où les températures n'étaient pas optimales, soit en Bretagne, dans le quart Nord-Est et le Nord. Les cultures peuvent désormais atteindre plus régulièrement la maturité et la photosynthèse se montre plus efficace. Mais au sud de la Loire, l'augmentation des températures et des évapotranspirations moyennes a entraîné des effets de raccourcissement de cycle et de déficits hydriques amplifiés par les restrictions d'irrigation. Néanmoins, le choix de variétés plus tardives et la rapidité du transfert du progrès génétique ont amorti les conséquences.

Des compensations dans l'évolution des pratiques

L'effet de l'évolution des pratiques, caractérisée par des compensations entre facteurs, reste pour sa part globalement modeste. La généralisation des semis plus précoces, permise par l'augmentation des températures (avancement de 20 jours en 40 ans), a conduit à cultiver des variétés plus tardives qui ont aidé à accéder à des rendements plus élevés. Elle répond aussi à des stratégies d'esquive de risques de déficits hydriques grâce à l'avancement de la période de mise en place des grains. Inversement, l'augmentation de la pression en ravageurs et de moindres solutions de protection ont été défavorables.

À ce contexte climatique plus difficile, s'est ajoutée une réduction des marges de manœuvre en matière de gains de rendements dus aux pratiques culturales. Cette approche globale masque toutefois des potentiels de progrès dans l'optimisation des pratiques à la parcelle : pour des

Les moyens financiers consacrés à l'amélioration variétale sont stratégiques pour la compétitivité des cultures.

Au niveau mondial, les effets du changement climatique risquent d'avoir des conséquences à long terme sur l'équilibre entre l'offre et la demande en céréales.



Mais : des rendements qui progressent plus ou moins vite selon les pays

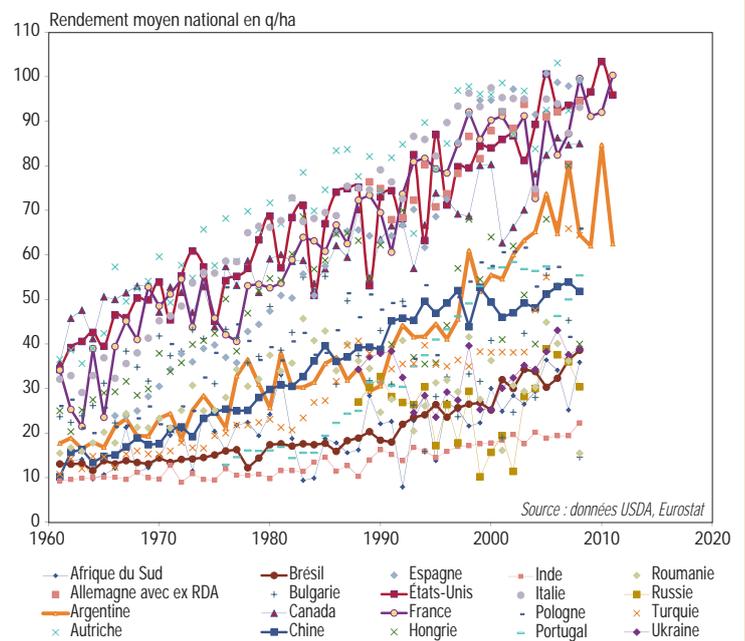


Figure 2 : Situation de la France dans l'évolution des rendements du maïs. Les différences dans la vitesse de progression des rendements en maïs ont diverses causes : potentiels des milieux, efficacité dans le transfert des progrès techniques et génétiques, réchauffement climatique, contextes économiques. En tout cas, quelles que soient les espèces, les différences entre pays dans les vitesses d'innovations et de transfert aux agriculteurs ont des effets sur les rapports de compétitivité économique des productions agricoles. Elles participent à encourager des investissements préférentiels de sélection sur des marchés de semences plus porteurs et rémunérateurs. Elles peuvent déclencher un cercle vertueux... ou vicieux. Comme dans d'autres secteurs de l'économie, les investissements dans la recherche fondamentale en génétique sont stratégiques.

France : des soutiens financiers à l'amélioration des plantes

3

L'État français, via l'ANR (Agence nationale pour la recherche), a consenti à allouer d'importants moyens financiers aux laboratoires de la recherche publique, aux sélectionneurs éligibles et aux instituts techniques qui investissent dans les méthodes de sélection, d'amélioration des plantes et de caractérisation des variétés. Dans le cadre des 35 milliards du grand emprunt national, deux appels à projets ont eu lieu en 2010 et 2011 concernant les infrastructures, les équipements de laboratoires et les collaborations de recherche. Les projets Breedwheat (blé) et Amaizing (maïs) ont été retenus dans la première vague, avec une dotation financière de l'ANR sur 9 ans de l'ordre 9 millions d'euros chacun. Cela représente de 30 à 100 % des investissements financiers des différents partenaires, les coûts de la recherche publique étant pris en charge à 100 %. Les projets Rapsodyn (colza, 6 M€ de l'ANR), Sunrise (tournesol, 7 M€), Peamust (pois, 5 M€) et Aker (betterave, 5 M€) ont été acceptés lors du second appel d'offres.

De la découverte au transfert

Partenariaux, ces projets couvrent la compréhension des caractères génétiques, la contribution au décryptage du génome et des gènes d'intérêt agronomique ainsi que les méthodes de sélection génomique. Ils s'intéressent aussi au transfert opérationnel des découvertes sous forme de nouveau matériel de sélection et à l'appropriation des savoirs et savoir faire par les partenaires. Plusieurs de ces projets sont menés en interaction avec d'autres recherches collaboratives pilotées à l'étranger. Par exemple, en colza, Rapsodyn se coordonne avec un programme allemand, grâce à des échanges entre comités de pilotage. Des moyens parallèles ont été consentis sur appels d'offres pour améliorer les infrastructures de recherche. Il peut s'agir de phytotrons, de serres ou d'abris roulants mais aussi de parcelles agricoles équipées d'appareils de mesures par imagerie et proche infrarouge. Ils permettent des mesures à haut débit et non destructives sur des plantes cultivées en parcelles miniatures.

potentiels identiques, les rendements parcelaires sont en fait divers. Globalement, le progrès génétique, estimé à 1,2 q/ha/an, a soutenu la progression des rendements avec toutefois des régions où il a juste permis de neutraliser les effets des facteurs plus limitants.

Des effets perceptibles au niveau mondial

Au niveau mondial, les effets du changement climatique sont déjà perceptibles et risquent d'avoir des conséquences à long terme sur l'équilibre entre l'offre et la demande en céréales... Des simulations effectuées à partir de modèles de culture ont permis d'estimer qu'entre 1980 et 2008, les seuls effets de températures et des précipitations auraient causé, sans tenir compte de l'impact

du CO₂, une réduction des rendements moyens de 5,5 % en blé tendre et de 3,8 % en maïs. Selon une étude américaine (1), les conséquences auraient été moins fortes en France, avec des baisses de 4,8 et 3,5 % environ. En revanche, la Russie ressort particulièrement pénalisée en blé tendre (- 14,5 % du rendement moyen). En maïs, le Brésil (- 7,8 %) et la Chine (-6,5 %) sont très touchés. Les Etats-Unis s'en sortent dans les deux cas mieux que les autres, puisque l'évolution du climat entre 1980 et 2008 leur aurait été légèrement favorable en blé tendre (+ 1 %) et très faiblement nuisible en maïs (- 0,5 %). ■

(1) Publiée par Lobell et collaborateurs en 2011.

Josiane Lorgeou
ARVALIS-Institut du végétal
j.lorgeou@arvalisinstitutduvegetal.fr
Valérie Noël
v.noel@perspectives-agricoles.com



En maïs grain, la pente de progression du rendement national montre des signes de ralentissement depuis les années 2000.

Zoom

Des méthodes pour accélérer le progrès génétique

Les sélectionneurs disposent aujourd'hui d'une panoplie de techniques qui viennent compléter les méthodes de sélection conventionnelle. Elles s'appuient majoritairement sur la valorisation des connaissances de l'ADN qui contient l'information génétique.

Parmi les nouvelles techniques dont disposent les sélectionneurs pour mettre au point des variétés, la plus médiatisée est probablement la transgénèse. Utilisée par les chercheurs pour valider la localisation et les fonctions des gènes, elle ne constitue qu'une application opérationnelle des biotechnologies. Elle consiste à identifier un gène d'intérêt et à le transférer sans reproduction sexuée dans un fond génétique à améliorer. Ce qui signifie l'intégrer dans une construction génétique susceptible d'assurer son bon fonctionnement. Une fois le transfert de la construction réalisé, il faut sélectionner les cellules réellement transformées, les régénérer, pour enfin introgresser les transformants dans des variétés élites. Il s'agit d'un travail coûteux, pour un résultat souvent aléatoire. Cela fait de la transgénèse une technique utilisée avec modération, même si quand elle marche, elle peut être valorisée à grande échelle (*encadré*).

La culture *in vitro* fait également partie des outils utilisés par les sélectionneurs.



© V. Noël / Perspectives Agricoles

L'assistance des marqueurs

Les sélectionneurs utilisent désormais en routine le marquage moléculaire. Il consiste à rechercher dans une variété un gène d'intérêt à l'aide d'une séquence d'ADN connu. Si le gène est présent, la séquence marqueur s'hybride avec lui, permettant sa détection. La sélection génomique est une évolution de la stratégie d'utilisation des marqueurs. Elle consiste à suivre simultanément un très grand nombre de zones génétiques, optimisant ainsi la prise en compte de caractères complexes gouvernés par beaucoup de gènes. La culture *in vitro* et la duplication des chromosomes sont également très utilisées. Elles servent à fixer plus rapidement les lignées. La mutagenèse, qui consiste à provoquer des mutations du génome pour faire apparaître des caractères favorables, est quant à elle employée depuis longtemps. Elle peut être combinée à des méthodes classiques de sélection ou servir de base à une transgénèse.

Valoriser la diversité génétique

Mais faire avancer le progrès génétique signifie aussi bien valoriser la diversité des ressources génétiques, identifier et caractériser les fonctions des gènes. Ce qui passe par des essais aux champs ou en conditions contrôlées. Les gènes d'intérêt se découvrent grâce à l'étude de corrélations entre des caractères observés sur les plantes, ce qui s'appelle le phénotypage, et par l'analyse de l'ADN, ou génotypage. De gros moyens et de puissants outils de calculs et traitements de données sont nécessaires, tant pour expérimenter que pour comprendre les mécanismes impliqués dans l'expression des caractères. ■

**Josiane Lorgeou
Laurent Guerreiro
ARVALIS-Institut du végétal**

États-Unis

Des OGM à quatre traits en maïs

Aux États-Unis, 90 % de la sole de maïs est aujourd'hui cultivée avec des hybrides OGM. Les variétés cumulant simultanément plusieurs résistances deviennent majoritaires : elles remplacent des constructions génétiques plus simples à 1 puis 2 caractères. Les résistances concernent la chrysome, le Round-up ready, le Liberty Link, ainsi que la pyrale. Plusieurs gènes de résistance sont proposés pour un même caractère, chaque société valorisant ses propres innovations. Des synergies sont obtenues en associant plusieurs gènes de résistance à la pyrale ou à la chrysome, ce qui permet non seulement de renforcer leur efficacité, mais aussi de limiter les risques de résistance. Ces nouvelles variétés vont permettre à partir de 2013 de faire sauter l'obligation réglementaire qu'avaient jusqu'à présent les farmers de semer 20 % de leurs surfaces de maïs en non OGM. Cette mesure de biovigilance avait pour but de limiter l'apparition des résistances aux insectes. Or la combinaison des gènes réduit les risques : il suffit de n'avoir que 5 % de plantes sensibles dans son champ. Les semenciers vont donc commercialiser des doses incluant directement 5 % de semences de maïs non OGM.