ÉVOLUTION DES RENDEMENTS DE PLUSIEURS PLANTES DE GRANDE CULTURE
UNE RÉACTION DIFFÉRENTE AU RÉCHAUFFEMENT CLIMATIQUE SELON LES ESPÈCES

par André **Gallais**[1], Philipe **Gate**[2], François-Xavier **Oury**[3]

et la Section 1 de l'**Académie d'Agriculture de France**[4]

RÉSUMÉ

L'étude de l'évolution des rendements moyens du blé tendre d'hiver, à l'échelle nationale, montre un net ralentissement, voire un plateau, sur les 15 dernières années. Un ralentissement est aussi observé chez le colza, mais à la limite de la signification. En revanche chez le maïs et la betterave à sucre, il n'est pas observé de ralentissement. L'analyse des causes du ralentissement chez le blé tendre d'hiver montre que le progrès génétique continue, mais qu'il n'est pas suffisant pour surcompenser un effet défavorable de l'évolution des itinéraires techniques et/ou du climat. Parmi tous les éléments des itinéraires techniques seuls le changement de rotations et la réduction de la fumure azotée apparaissent avoir un impact significatif, mais nettement insuffisant pour expliquer ce qui est observé. En revanche, l'augmentation de la température apparaît avoir un effet majeur. Un effet significatif défavorable de l'augmentation de la température est aussi observé chez le colza. L'effet de la température est confirmé par la comparaison de l'évolution des rendements des cultures semées au printemps (blé de printemps, orge de printemps, betterave, maïs) à celle des cultures semées à l'automne (blé et orge d'hiver, colza). Seules les cultures d'hiver montrent un ralentissement dans la progression des rendements. Ce comportement différent des deux types de culture s'explique bien par l'action différente de la température, selon les espèces, sur la croissance et le remplissage du grain.

INTRODUCTION

Jusqu'à une période récente, en France, comme dans d'autres pays européens, l'augmentation des rendements chez le maïs, le blé tendre, la betterave à sucre et le colza était considérée comme croissant linéairement, avec des déviations à la linéarité « aléatoires », aux conditions climatiques, à l'effet des techniques culturales ou à l'apparition de nouvelles variétés apportant des innovations génétiques plus ou moins importantes (Desprez, 2002 ; Gallais, 2002 ; Trottet et Doussinault, 2002). L'augmentation moyenne des rendements est le résultat *i*) de l'action combinée de l'amélioration génétique des variétés et de l'amélioration des techniques culturales et *ii*) de l'augmentation du taux d'adoption de ces améliorations par les agriculteurs.

[1] Membre de l'Académie d'Agriculture de France, Station de Génétique végétale, Ferme du Moulon, 91190 Gif-sur-Yvette.
[2] Directeur scientifique, Arvalis Institut du Végétal, La Minière.
[3] INRA, Amélioration des Plantes, Domaine de Crouelle, Clermont-Ferrand.
[4] Depuis deux ans, plusieurs réunions de la section 1 de l'AAF ont été consacrées à ce sujet.

Copyright – Académie d'Agriculture de France – 2010. Séance du 5 mai.

Depuis 10-15 ans, en France, le rendement moyen de certaines espèces ne semble plus augmenter avec la même vitesse que par le passé. Cela est particulièrement vrai pour les rendements du blé tendre d'hiver dont l'amélioration montre un net ralentissement depuis les années 1990 (Agreste, 2008). Il en est de même pour le blé dur et pour l'orge. Le même phénomène est observé dans différents pays européens, en particulier le Royaume-Uni, les Pays Bas, la Belgique, le Danemark et l'Allemagne (Gate, 2009). Au niveau mondial, le rendement moyen ne montre pas de ralentissement, car des pays avec un rendement moyen plus faible qu'en Europe, mais en progrès (Chine, Egypte, Inde) ne montrent pas de plateau. On peut alors s'interroger sur les causes du ralentissement en Europe. Est-il significatif, compte tenu des grands écarts de rendement d'une année à l'autre dus aux conditions climatiques ? Un tel phénomène est-il aussi observé pour d'autres espèces de grande culture ? Quelles peuvent en être les causes ?

Pour tenter de répondre à ces questions au niveau de la France, nous avons choisi de nous intéresser à quatre espèces de grande culture assez différentes : le blé (blé tendre d'hiver), le maïs (grain), le colza (d'hiver) et la betterave sucrière, quatre espèces qui font l'objet d'une culture plutôt intensive ; avec deux espèces installées à l'automne (blé et colza) et deux espèces installées au printemps (maïs et betterave à sucre). Pour des analyses plus ponctuelles nous avons aussi considéré le blé tendre de printemps et l'orge d'hiver et de printemps.

Les données utilisées concernent les rendements moyens nationaux de 1955 à 2008[1] (soit 54 années) et sont issues de la base SCEES Agreste du Ministère de l'Agriculture. Les calculs ont été réalisés en trois étapes :

1 - calcul du progrès moyen annuel sur l'ensemble de la période ;

2 - découpage de la période en deux sous périodes, une sous-période de 1955 à 1989 inclus et de 1990 à 2008. Ces deux sous périodes ont été choisies pour deux raisons : *i*) l'examen de l'évolution des rendements montre que pour le blé et le colza, c'est à peu près à partir des années 1990 (plutôt un peu après) qu'on observe un ralentissement du progrès agronomique, et *ii*) la nécessité d'avoir des périodes assez longues, pour être plus à l'abri de variations « aléatoires » (séries climatiques, aléas dans les innovations au niveau des techniques culturales ou des variétés…) ; nous verrons même qu'une séquence de 19 ans (de 1990 à 2008) est à peine assez longue pour pouvoir conclure ;

3 - ajustement des données selon un modèle non linéaire, pour supprimer le problème du découpage arbitraire en deux périodes. Nous avons retenu un ajustement polynomial avec un polynôme du 3ème degré et testé si la réduction du carré moyen résiduel du modèle linéaire était significative par le modèle non linéaire. Le polynôme du 3ème degré a été retenu, car il donnait de meilleurs résultats qu'un polynôme du 2ème degré.

RESULTATS

Le bilan du progrès agronomique de 1955 à 2008 tend à montrer une augmentation assez régulière des rendements pour le maïs et la betterave, mais un ralentissement au cours des 10-15 dernières années pour le blé, le colza (Tableau 1). L'élimination des données connues *a priori* comme correspondant à des situations anormales, comme la sécheresse de 1976 et celle de 2003, ne change pratiquement rien aux résultats, ce qui tend à montrer que les séquences sont assez longues pour être à l'abri de variations aléatoires. L'addition des données connues pour 2009 ne change pratiquement pas les estimations du progrès agronomique annuel, même pour la phase 1990-2009[2].

[1] Nous n'avons pas systématiquement considéré 2009, car les données définitives du SCEES ne sont pas encore connues. Néanmoins nous avons examiné si, avec les chiffres moyens actuellement annoncés, les conclusions obtenues en se limitant à 2008 étaient changées.

[2] Dans cette phase, pour la betterave le progrès moyen passe de 0,87 t/ha/an à 1,00, pour le colza il passe de 0,18 q/ha/an à 0,25 et pour le maïs il passe de 1,07 q/ha/an à 0,99, mais ces changements ne sont pas significatifs.

La dynamique des rendements par espèce

Betterave. Un événement majeur de l'amélioration de la betterave a affecté le progrès agronomique : l'introduction de la monogermie dans les années 70-75. Cela explique la diminution des rendements de 1973 à 1976 (en plus de l'effet de la sécheresse en 1976), puis l'augmentation plus rapide des rendements jusqu'en 1981. La culture est alors devenue totalement mécanisée. Malgré ces changements, sur l'ensemble de la période de 1955 à 2008 et pour les deux sous-périodes, on observe un progrès moyen de l'ordre de 1 t/ha/an. Il est intéressant de noter, pour montrer les limites de l'approche, que sur la période de 1990 à 2004, le progrès n'était que de 0,59 t/ha/an (mais non significativement différent de la pente observée de 1955 à 1989, calculs non montrés). Les quatre dernières années ont donc eu un impact très fort sur l'estimation de l'augmentation annuelle des rendements. Cela montre qu'une séquence de 15 années n'est pas suffisante pour tenir compte de la variation due aux effets climatiques et au changement de variétés.

Tableau 1. *Accroissement annuel des rendements moyens nationaux pour quatre espèces de grande culture en fonction de la période considérée.* Cet accroissement correspond au coefficient de régression des rendements moyens en fonction de l'année.

	Betterave[(1)]	Colza[(2)]	Blé[(2)]	Maïs[(2)]
1955-2008 avec 1976 et 2003	1,00 ± 0,08[(3)]	0,40 ± 0,06	1,09 ± 0,08	1,34 ± 0,11
sans 1976 ni 2003	1,00 ± 0,08[(3)]	0,40 ± 0,06	1,10 ± 0,08	1,36 ± 0,10
1955-1989 avec 1976	0,93 ± 0,16	0,46 ± 0,10	1,26 ± 0,12	1,34 ± 0,19
sans 1976	0,94 ± 0,15	0,47 ± 0,10	1,27 ± 0,11	1,36 ± 0,18
1990-2008 avec 2003	0,87 ± 0,36	0,18 ± 0,26	**0,27** ± 0,36	1,07 ± 0,59
sans 2003	0,90 ± 0,37	0,19 ± 0,27	**0,32** ± 0,35	1,18 ± 0,51
Test différence pentes	ns	ns	s	ns

[(1)]en t/ha/an ; [(2)] en q/ha/an ; intervalle de confiance calculé à P = 0,05.

Colza. Pour le colza, deux innovations génétiques ont affecté la dynamique de l'amélioration des rendements : le développement des variétés 0-érucique dans les années 1973-1978, et le développement des variétés 0-érucique et 0-glucosinolate (dites double 0) dans les années 1990-1993. Dans chaque cas, l'introduction d'un caractère nouveau mono ou oligogénique a entraîné une diminution du rendement, suivie d'une augmentation rapide dans les années qui ont suivi. A partir des années 1993, il apparaît un net ralentissement de l'augmentation des rendements puisque l'on passe de 0,46 q/ha/an à 0,18 q/ha/an (Tableau 1), ce qui conduit à une perte de 4,7 q/ha par rapport à ce qui était attendu sur la base des progrès de 1955 à 1989, soit 12,6 %. Cependant la variation importante des rendements d'une année à l'autre ne permet de conclure ni à une différence significative de pentes des deux périodes considérées, ni à une amélioration significative des rendements (comme le montre l'intervalle de confiance très grand du coefficient de régression pour la 2ème période). Compte tenu des variations observées, une séquence de 19 années n'est pas suffisante pour pouvoir conclure à un ralentissement du progrès agronomique, avec l'approche de découpage en périodes.

Blé. Pour le blé, il apparaît un net ralentissement du progrès agronomique de la première période à la deuxième, puisque l'on passe de 1,26 q/ha/an de 1955 à 1989 à 0,27 q/ha/an de 1990 à 2008 (Tableau 1). Comme déjà mentionné, l'élimination des années 1976 et 2003 ne change pratiquement rien aux résultats. Dans ce cas la différence de pente est statistiquement significative, même au seuil 0,01. Ainsi, les rendements d'aujourd'hui sont de 14,1 q/ha inférieurs à ceux que l'on aurait pu attendre sur la base des progrès réalisés de 1955 à 1989 (soit 16 %). Parmi les espèces étudiées, c'est la diminution la plus importante en valeur relative

Maïs. La comparaison des améliorations pour les deux périodes tend à montrer un ralentissement puisque l'on passe de 1,34 q/ha /an à 1,07 q/ha/an (ou 1,18 sans l'année 2003) (Tableau 1). Cependant, comme pour le colza, les grandes variations de rendement d'une année à l'autre font que sur une séquence de 19 années le gain moyen annuel est entaché d'une grande erreur. En conséquence, les différences de pente ne sont pas significatives, mais dans ce cas, à la différence du colza, l'amélioration en 2ème période reste très significative. A noter qu'aux USA, il n'apparaît pas un tel ralentissement. Il y aurait même tendance à une augmentation : toutefois, compte tenu des fortes variations interannuelles, la différence de pente entre les deux pays n'est pas significative (même après suppression de l'année 2003 en France).

Test du modèle non linéaire

Le modèle polynomial apparaît très hautement significatif pour le blé, ce qui confirme le ralentissement observé dans la progression des rendements (Tableau 2). En effet, le coefficient des termes de 3ème degré est négatif alors que celui du 2ème degré est positif : la courbe des valeurs ajustées est voisine d'une sigmoïde. Pour le colza, le modèle polynomial est à la limite de la signification, ce qui tend à montrer, mieux que l'approche par la comparaison des pentes, que les rendements tendraient bien à progresser moins vite après les années 1990 qu'avant. Cependant, l'addition de 2009, en augmentant encore la résiduelle, supprime la signification au seuil 10%. Pour la betterave et le maïs l'apport du modèle polynomial n'est pas significatif, ce qui, là encore confirme les conclusions obtenues sur la base de la comparaison des pentes pour les deux périodes. On peut donc conclure à un net ralentissement de la progression des rendements pour le blé, une tendance pour le colza, mais aucun ralentissement pour la betterave et le maïs.

Tableau 2. *Analyse de variance pour le test du modèle de régression non linéaire (polynôme du 3ème degré) des rendements moyens en fonction de l'année*. Il y a 3 degrés de liberté pour le modèle polynomial, 1 pour le modèle linéaire, 2 pour l'apport du modèle polynomial par rapport au modèle linéaire et 50 pour la résiduelle du modèle polynomial.

Source de variation	Betterave	Colza	Blé	Maïs
SCE(1) Modèle polynomial	13088	2149	16020	23576
SCE Modèle linéaire	13042	2100	15508	23531
SCE Apport modèle polynomial	46	49	512	45
SCE Résiduelle	1056	440	672	1877
Test F	1,1	2,8(*)	19,1**	0,6

(1) SCE = Somme des Carrés des écarts ; (*) significatif au seuil 0,10 (proche de 0.05), ** significatif au seuil 0,01.

DISCUSSION ET HYPOTHÈSES

Une première explication du ralentissement très fort du progrès agronomique chez le blé pourrait être dû à la présence d'années très défavorables dans les 5 dernières années (qui auraient un poids très fort dans la mise en évidence d'un ralentissement, que ce soit par le découpage en périodes ou par l'ajustement polynomial). En plus de 2003, c'est le cas de 2006 et 2007. Cependant, leur suppression, même si elle conduit à un ralentissement moindre (la pente sur la 2ème période devient de 0,48 q/ha/an ± 0,36 au lieu de 0,27), laisse toujours apparaître un ralentissement (la différence de pente entre les deux périodes est toujours significative). Il faut donc rechercher d'autres explications.

Plusieurs hypothèses peuvent alors être avancées pour expliquer le ralentissement dans la progression des rendements chez le blé et chez le colza. L'amélioration des rendements est le résultat de deux facteurs, l'amélioration des variétés qui conduit au progrès génétique (progrès en potentiel, dans un milieu donné, pour des techniques culturales données) et l'amélioration des techniques culturales, avec l'utilisation des interactions variétés x techniques culturales. Un

ralentissement de l'amélioration des rendements pourrait donc être dû à une diminution du progrès génétique en rendement ou du progrès dû aux techniques culturales ou les deux à la fois. Une autre hypothèse doit aussi être envisagée, celle du changement des conditions environnementales de culture (climat, sol…). Il faut essentiellement expliquer pourquoi le blé et le colza seraient les cultures les plus affectées.

1. Un ralentissement du progrès génétique ?

Pour le blé tendre d'hiver, une étude du GEVES[3], à partir des essais CTPS réalisés entre 1990 et 2000, a montré un progrès génétique de 0,9 q/ha/an en conditions intensives traitées (avec fongicides) et de 1,4 q/ha/an en conditions intensives non traitées (à noter le progrès supérieur en conditions non traitées aux fongicides), ce qui signifie une augmentation de la résistance aux maladies des variétés modernes. Une étude plus récente de F. X. Oury (INRA Clermont-Ferrand, et G. Charmet et M. Rousset, communication personnelle), à partir des essais pré-CTPS et CTPS, de 1983 à 2008 inclus, montre que ce progrès continue toujours à peu près au même rythme. Cette étude conduit en effet pratiquement aux mêmes chiffres que ceux de l'étude GEVES sur un intervalle de temps plus court. Des études analogues menées au Royaume Uni et en Finlande conduisent aux mêmes conclusions : le progrès génétique a continué chez le blé tendre. Cependant, pour passer du progrès génétique - obtenu en essais, en petites parcelles - au progrès agronomique, il faut multiplier par une sorte d'héritabilité ou coefficient de « shrinkage » plus ou moins inférieur à 1. Pour expliquer les faits observés pour le blé, il faudrait donc imaginer que le progrès génétique ne se retrouve plus autant dans la pratique qu'avant les années 1990 (voir ci-dessous).

Chez les autres espèces, il en est de même, le progrès génétique ne diminue pas. Pour la betterave l'étude GEVES (Luciani, 2004) donne sur une période de 12 ans (de 1990 à 2001) un progrès (génétique) de 140 kg de sucre/ha/an. Pour le colza entre 1988 et 2000, le progrès génétique a été estimé à 0,54 q/ha/an. Pour le maïs, espèce qui n'a pas été concernée par les estimations récentes de progrès génétique, différents travaux (non publiés) montrent bien que le progrès génétique continue à un rythme au moins aussi fort qu'avant 1990 (Lorgeou *et al*., 2009). Le ralentissement observé n'est pas significatif. Selon Le Buanec (2009), l'absence de ralentissement, voire même une augmentation du progrès génétique, aux USA pourrait être dû à l'adoption des variétés transgéniques résistantes à la pyrale.

La façon dont le progrès génétique a été estimé (par recoupement successif par l'intermédiaire de variétés communes à différentes périodes d'expérimentation) est certes critiquable ; cela pourrait conduire à une surestimation du progrès génétique, mais il reste que dans toutes les expérimentations GEVES, les nouvelles variétés sont comparées à des témoins plus anciens et que les variétés qui ont connu un développement sont parmi celles qui ont manifesté une supériorité par rapport aux témoins. Elles démontrent donc que le progrès génétique continue, mais ne permettent pas une assez grande précision pour conclure s'il y a ralentissement du progrès. Pour cela il faudrait des expérimentations plus complètes, avec les variétés de différentes époques d'inscriptions dans les mêmes essais et avec différents itinéraires techniques.

Il pourrait y avoir un ralentissement du progrès génétique, plus fort chez le blé que chez le maïs, du fait de l'approche de la limite physiologique permise par le rendement photosynthétique. Cette hypothèse est peu vraisemblable car, pour le blé comme pour le maïs, la limite physiologique est nettement plus élevée que 100 q/ha, sans doute plus proche de 150 q/ha. En France, les rendements maximaux observés chez le blé sont autour de 140 q /ha (Arvalis). Ce chiffre ne doit pas être loin du potentiel (estimé par Arvalis à 150 q/ha). En Nouvelle Zélande, ce potentiel a été estimé à 160 quintaux. Pour le maïs, des rendements de 160 q/ha ont déjà été observés en France. Le rendement maximum est sans doute plus élevé pour cette espèce (plante en C4). Ces chiffres sont tout à fait compatibles avec ceux dérivés de la conversion de l'énergie lumineuse en matière

[3] Groupe d'Etude des Variétés et des Semences

sèche, au niveau d'un peuplement végétal (voir calculs de B. Saugier présentés à l'Académie d'Agriculture de France[4]). Cependant il pourrait apparaître un autre facteur limitant des rendements : la disponibilité en eau. Aujourd'hui, dans le Bassin Parisien, un hectare de blé produisant 100 q consomme pratiquement toute l'eau apportée par la pluviométrie (soit environ 660 mm). Pour que le progrès en rendement continue, il faudra donc mettre rapidement au point des variétés valorisant mieux l'eau.

Même si l'on est encore assez loin du maximum physiologique, le progrès génétique pourrait être de plus en plus difficile à obtenir car demandant des investissements de plus en plus importants. Le progrès génétique sur le rendement est sans doute plus difficile à obtenir chez le blé que chez le maïs : chez le blé, il faut sélectionner sur de nombreux caractères (dont certains en liaison négative, exemple qualité–rendement, maladies-rendement…) alors que chez le maïs la sélection porte essentiellement sur le rendement. Ainsi, il est clair que chez le blé, depuis les années 1990-1995, une plus grande importance est donnée à la qualité technologique. Cela pourrait contribuer à diminuer l'importance du progrès génétique sur le rendement. La sélection de variétés à maturité plus précoce pour limiter les risques d'échaudage pourrait aussi ralentir le progrès génétique. De plus, les investissements dans la sélection sont moins importants pour le blé que pour le maïs. Pour le maïs, il existe en France près d'une dizaine d'établissements de sélection, dont certains très puissants ; alors que pour le blé le nombre d'établissements est plus limité, et avec en moyenne des entreprises de taille plus faible que pour le maïs. Cela est bien sûr lié au type de variétés : les variétés hybrides permettent de mieux amortir les investissements faits dans la recherche que les variétés lignées pour lesquelles il existe un taux élevé d'auto-approvisionnement. Le résultat pourrait être un ralentissement du progrès génétique chez le blé, alors qu'il se maintient pour le maïs.

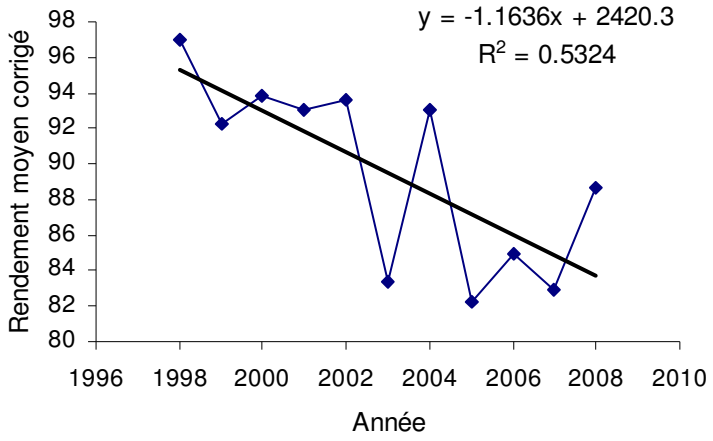

Fig 1. Evolution des rendements moyens du blé : rendement des témoins (toujours les mêmes variétés) dans les essais CTPS, zone Nord, traité, de 1998 à 2008. y = rendement, x = année. R^2 est la part de variation expliquée par l'année, ce qui correspond à un coefficient de corrélation R = -0,73**.

Cependant, pour le blé tendre, comme le progrès génétique continue (même s'il pourrait diminuer) alors que le progrès agronomique stagne, c'est donc que le milieu au sens large (itinéraires techniques, climat) a une évolution telle qu'elle tendrait à annuler l'effet favorable attendu du progrès génétique. Cela est bien illustré par la tendance à la diminution de la valeur des témoins dans les essais pré-CTPS et CTPS. Ainsi sur les 10 dernières années, il apparaît en conditions « intensives » (avec traitement fongicide) une régression des rendements de 1 à 1,2

[4] Groupe de travail « La planète peut-elle nourrir 9 milliards d'habitants ? »

q/ha/an (significative[5] malgré la forte variation interannuelle) (Fig 1). Avec une régression due à l'environnement au sens large de 1 q/ha/an, pour un progrès agronomique qui dans la période 1955-1990 était de 1,26 q/ha/an, il ne reste que 0,26 q/ha/an, ce qui correspond à ce qui est approximativement observé. Le progrès génétique ne fait alors que compenser (ou légèrement surcompenser) un effet défavorable de l'environnement. Sans le progrès génétique, il y aurait eu diminution du rendement moyen. Cet effet défavorable de l'environnement pourrait alors traduire *i*) un ralentissement du progrès dans les techniques culturales avec une réduction de l'investissement dans la préparation du sol et/ou dans des intrants comme les semences, la fumure azotée et les fongicides et *ii*) un effet défavorable du climat ou d'autres effets confondus, bien que non liés, comme une évolution de la fertilité des sols.

2. Un ralentissement du progrès dans les techniques culturales ?

Stimulés par la PAC (dans les années 1992) et avec la « chute » des prix agricoles, les agriculteurs ont cherché à diminuer le coût de leurs cultures, bien que globalement la culture de blé en France reste très intensive. Il pourrait alors y avoir une certaine « désintensification » de la culture de blé et de colza, avec le développement de la culture sans labour, une diminution de la fumure azotée (avec un meilleur pilotage mais aussi plus de risques), une certaine diminution de l'utilisation des fongicides, l'auto-approvisionnement en semences…. (voir communication P Viaux). Cette hypothèse est vraisemblable, car les cultures de blé et de colza ont beaucoup plus évolué dans ce sens que les cultures de maïs et de betterave : l'optimum économique ne correspond plus nécessairement au maximum de rendement et le respect de l'environnement devient une priorité (Grenelle de l'Environnement, conditionnalité de la PAC). Quel est l'impact de cette évolution sur le rendement ?

Le développement de la culture sans labour. C'est au cours de ces 15 dernières années que la culture sans labour s'est développée, au point d'atteindre près de 50 % des surfaces cultivées chez le blé et le colza (contre 10-15 % chez le maïs ou la betterave)(ADME, 2007). Le développement de cette technique correspond à un souci de gain de temps, d'économie sur les frais culturaux, parallèle à un agrandissement des exploitations. Cependant, l'impact de cette évolution sur les rendements du blé semble très faible, sans doute moins de 1 q/ha sur 15 ans (Agreste, 2008).

La diminution des intrants : azote, fongicides et eau.

La diminution de la fumure azotée est générale pour toutes les espèces considérées. Pour le blé, depuis 2001, il y a une diminution assez régulière des doses d'azote utilisée, soit de 10 à 15 kg N/ha (données SCEES et Unifa). Sur la base de 3 kg de N par quintal, le calcul sans tenir compte de la répartition des apports conduirait alors à une réduction de 3,3 à 5 q/ha. Cependant, grâce à un meilleur pilotage de la fumure azotée, et sachant qu'il y avait des situations de sur-fertilisation, cet effet négatif attendu pourrait être très atténué, voire complètement supprimé, surtout en conditions favorables. Le problème est que, en moyenne, à cause des conditions climatiques, le fractionnement n'est pas toujours optimal. L'effet négatif de la réduction de la dose totale pourrait donc toujours exister. Une réduction de rendement en grain de 2,5 à 3 q/ha sur 15 ans, due à la réduction de la fumure azotée, semble tout à fait possible. Quant aux traitements fongicides si globalement, ils ont diminué (trois traitements au lieu de quatre), et si certaines résistances aux strobilurines sont apparues, les variétés sont aussi devenues plus résistantes ou tolérantes aux maladies ; il est donc difficile de conclure sur l'impact de l'évolution des traitements fongicides ou de leur efficacité ; il doit être faible.

La fumure azotée a aussi diminué chez le colza (de 16 %), mais elle est aussi mieux optimisée. Chez le maïs la diminution de la fumure azotée (de l'ordre de 10 %) et la diminution de l'irrigation pourraient expliquer un certain infléchissement de la progression des rendements. Ainsi

[5] Significative à 0,01 en zone Nord et à 0,10 en zone Sud, avec un coefficient de corrélation entre la production et l'année respectivement de -0,73** et de -0.50(*).

chez le maïs grain où 45 % des surfaces sont irriguées, ces surfaces n'augmentent plus depuis 1998 et avec la réglementation sur l'irrigation, moins d'eau est apportée : les maïsiculteurs qui irriguent ne couvrent plus tous les besoins en eau de leur culture (enquête SCEES 2001-2002 et 2003).

L'auto-approvisonnement en semences.

Le blé et le colza sont deux espèces pour lesquelles il existe aujourd'hui un auto-approvisionnement en semences très significatif. Chez le blé, ce taux d'auto-approvisionnement se stabilise autour de 40-45 %, alors que chez le colza il augmente régulièrement depuis 1997 et a atteint de l'ordre de 30 % en 2008. Cependant pour le blé, l'auto-approvisionnement existe depuis longtemps, bien avant les années 90, début d'infléchissement des rendements. Il ne semble donc pas avoir un impact fort sur l'évolution des rendements. En revanche, pour le colza, le développement de l'auto-approvisionnement (avec des semences moins bien traitées, des semis à trop forte densité) pourrait expliquer une atténuation du progrès agronomique attendu par le développement des nouvelles variétés. Le développement des hybrides (réel à partir de 2009) devrait arrêter la progression de cet auto-approvisionnement. Chez le maïs et la betterave, du fait de la structure des variétés (hybrides), cet auto-approvisionnement n'existe pas : il y a donc un meilleur transfert du progrès génétique.

3. Un changement des conditions environnementales de culture

Le changement du milieu de culture pourrait avoir trois origines : *i*) le changement des zones de culture, *ii*) une dégradation de la fertilité des sols et *iii*) le changement climatique.

Le déplacement de la culture du maïs du nord vers le sud (300 000 ha de moins dans le Nord de la France et le Bassin Parisien) tendrait à favoriser le maïs, puisque les rendements augmentent en allant du nord vers le sud du fait de la culture de variétés plus tardives, plus productives. Cela pourrait donc en partie expliquer que le maïs ne montre pas de ralentissement significatif dû à un facteur commun éventuel à toutes les cultures. Pour le blé, il y a quasi-stabilité des zones de culture, avec toutefois une certaine augmentation de la culture en zones plus défavorables ce qui peut contribuer à une certaine régression des rendements. Pour le colza, les surfaces ont considérablement augmenté, avec un déplacement des cultures vers des zones plus fertiles comme le Bassin Parisien, ce qui pourrait masquer une régression dans la progression des rendements.

Une dégradation de la fertilité des sols avec la diminution de la teneur en matière organique et une certaine acidification (Tessier, communication personnelle). Cette évolution pourrait être liée aussi aux rotations, avec des cultures blé sur blé mais aussi la disparition du précédent pois protéagineux au bénéfice du colza, beaucoup moins favorable (M-H. Jeuffroy, P. Gate). De plus, les cultures blé sur blé pendant une longue durée favorisent le développement de maladies qui ne peuvent pas être complètement maîtrisées par des traitements fongicides. Cet effet de changement de précédent pour le blé peut être estimé sur 20 ans à environ 3 q/ha (Brisson *et al*. 2010). Pour le colza, les cultures colza sur colza ne sont pratiquement jamais réalisées, car trop risquées d'un point de vue pathologique, mais il pourrait toutefois rester un effet défavorable de la rotation, l'intervalle de temps entre deux cultures de colza n'étant pas assez long.

Tout ce qui est relatif à l'évolution des itinéraires techniques apparaît nettement insuffisant pour expliquer la réduction des rendements du blé par rapport à ce qui est attendu. Pour le colza, les conclusions sont moins nettes. ***Un effet du climat*** est donc la dernière hypothèse à envisager, avec deux possibilités *i*) une série d'années plus défavorables au blé qu'au maïs, ce qui est vrai, mais insuffisant comme explication sur une période de 18 ans, d'où *ii*) l'hypothèse d'un effet du changement climatique. Trois éléments sont en faveur d'un effet de l'augmentation de température.

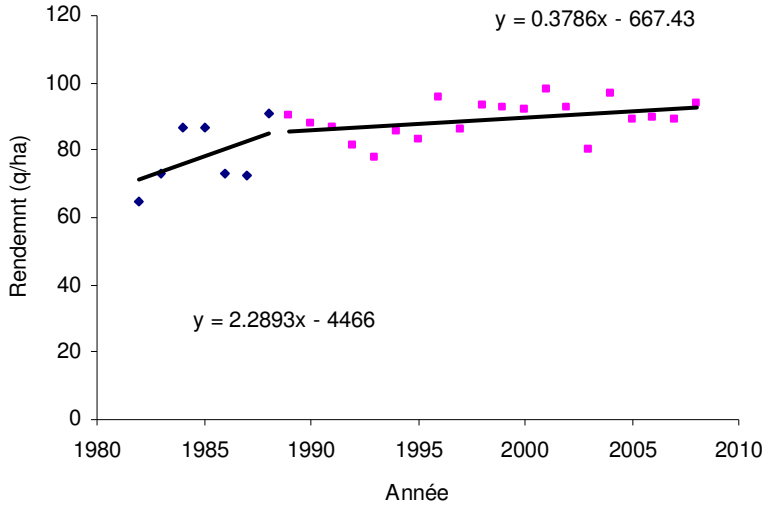

Fig 2. Évolution de la moyenne des rendements des essais CTPS blé conduits en mode « intensif ». Sur la période 1989-2008 on remarque le même plateau que pour l'évolution des rendements moyens au niveau national. La « désintensification » n'est donc pas le facteur essentiel pour expliquer la stagnation des rendements (d'après F-X Oury). y = rendement, x = année.

Chez le blé, un premier élément de « preuve » d'un effet climatique est apporté par la comparaison des rendements en essais (essais du réseau CTPS) avec des conduites « optimales » et des rendements moyens obtenus au niveau national. Les essais du réseau CTPS sont en effet toujours conduits de la même façon (pour les essais traités aux fongicides), avec une fumure azotée toujours assez élevée. Or les rendements moyens de ces essais (ou mieux des témoins) montrent la même tendance à un plateau que les rendements moyens nationaux : la pente des rendements moyens est pratiquement la même dans les deux situations entre 1990 et 2008 : 0,27 q/ha/an au niveau des rendements moyens nationaux et 0,37 q/ha/an au niveau des essais CTPS (Fig 2). Les essais ayant été toujours conduits en mode « intensif », on ne peut pas incriminer la préparation du sol, la qualité des semences, la diminution des traitements fongicides et la diminution de la fumure azotée, pour expliquer l'évolution il ne reste que l'effet climatique et l'effet "rotation". Ce dernier effet peut en effet rester car les parcelles des essais CTPS sont souvent des parcelles d'agriculteurs. Une certaine évolution de la conduite des essais vers une réduction des apports azotés ainsi que des traitements fongicides n'est pas à exclure, mais il s'agit toujours d'une culture en mode « intensif » (J. Guiard, communication personnelle). Les mêmes conclusions ont été obtenues par Gate (2009) à partir de la comparaison par région des rendements moyens chez les agriculteurs et des rendements obtenus en essais « Arvalis » en conditions optimales.

En ce qui concerne un effet du changement climatique, le facteur en cause pourrait être l'augmentation des températures pendant la phase de remplissage du grain. Sur les 25 dernières années, la température moyenne de cette période (du 10 mai au 20 juillet) mesurée à Versailles (INRA) a augmenté (significativement) de 0,073°C par an, ce qui sur 25 ans conduit à une augmentation de 1,8°C, ce qui est considérable (à noter les points de 1976 et 1982 dans le passé) (Fig 3). La moyenne des températures au niveau national confirme ce réchauffement. Ce réchauffement est illustré par les dates de semis de plus en plus précoces (gain de 3 à 4 semaines) pour la betterave et le maïs, comme pour toutes les plantes semées au printemps.

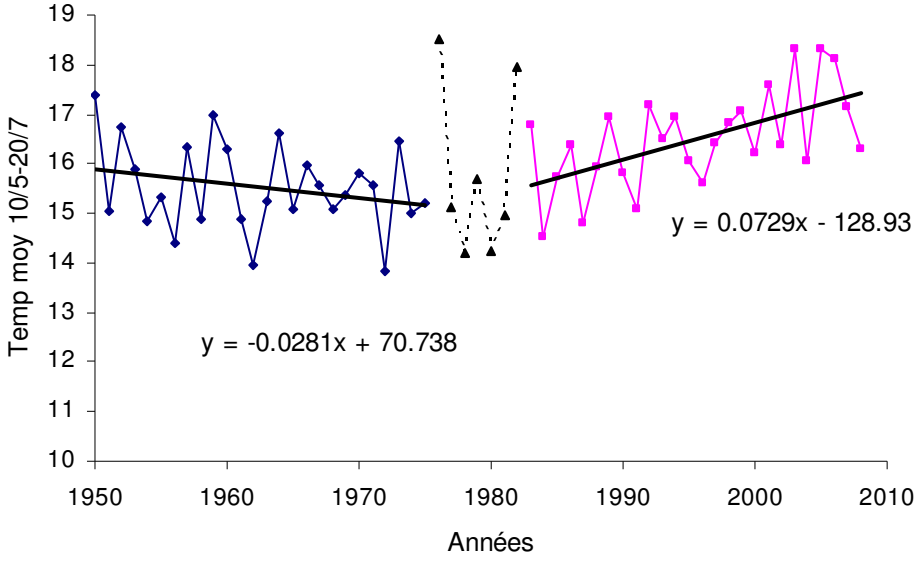

Fig 3. Evolution des températures moyennes mesurées à Versailles (INRA) pour la phase de 10 mai au 10 juillet. De 1950 à 1975, on observe une quasi-stabilité des températures moyennes (avec une tendance à la diminution, mais qui disparaît en considérant 1976 et 1982). Par contre, de 1983 à 2008, il y a une augmentation assez régulière des températures moyennes pour la phase considérée. Ainsi, alors que 1976 et 1982 pouvaient être considérées comme des accidents, des températures d'un niveau voisin sont atteintes en 2001, 2003, 2005, 2006, c'est-à-dire de façon plus régulière.

D'un point de vue statistique, pour l'interprétation de l'évolution des rendements du blé tendre, quand on considère la température en plus de l'année (régression multiple[6]), on obtient une réduction très significative des écarts à la régression sur seulement l'effet année, et avec l'équation

Rendement (q/ha) = 1,16 année – 1,93 température moyenne + terme correctif.

L'effet de la variable « température » apparaît bien négatif (une augmentation de 1°C ferait perdre 1,9 q/ha ; et par conséquence le progrès attendu à température constante est plus fort : 1,16 q/ha/an au lieu de 1,08 (soit une réduction des progrès sur les rendements de près de 10 %). Il reste toutefois inférieur à 1,26 q/ha/an, progrès observé de 1955 à 1989. Avec la même approche, pour la seule région Ile de France, le coefficient de la température est de 3 q/degré. Ainsi, il apparaît que le raisonnement région par région ferait sans doute apparaître un effet plus fort de la température. Cependant, pour des raisons statistiques, cette méthode sous-estime l'effet de la température, du fait de la non-indépendance entre l'effet de la température et de l'effet année.

[6] cette méthode décorrèle partiellement l'effet température de l'effet année, puisqu'il y a une variation importante de la température d'une année à l'autre. Le coefficient de régression de la température est le coefficient de régression entre le rendement et la température, pour une année fixée.

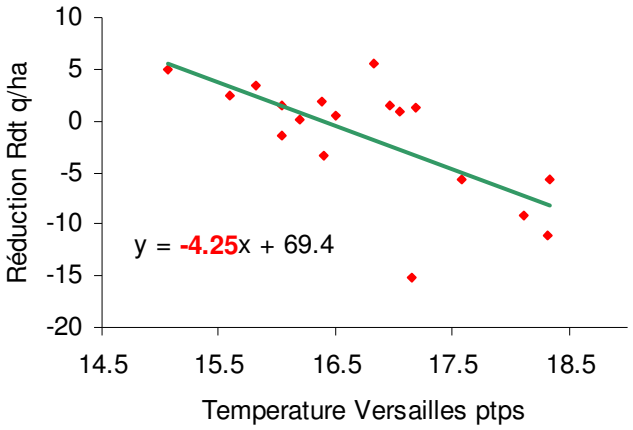

Fig 4. Liaison entre la réduction de rendement chez le blé (au niveau national) et la température moyenne observée à Versailles, pendant la phase de remplissage du grain, pour la période 1990-2008. La réduction de rendement est calculée par la différence entre le rendement observé et le rendement prévu s'il avait été au rythme de 1 q/ha/an. y = réduction, x = température moyenne.

Une autre façon d'approcher une estimation de l'effet de la température est de considérer que dans la période 1990-2008, le progrès génétique continue à un rythme connu, et de voir si l'augmentation de température explique la réduction des rendements par rapport à ce qui est attendu. Avec l'hypothèse que le progrès aurait dû continuer sur la base de 1 q/ha/an pendant la phase 1990-2008 (soit une réduction de 5q due à l'évolution des itinéraires techniques), la température explique très significativement la réduction (corrélation de 0.70*** entre la température et la réduction observée) avec un coefficient de -4,2 q par degré (Fig 4). Cette estimation correspond à celle (4,3 q/ha/degré) qui est estimée directement sur les témoins CTPS de 1998 à 2008, sans hypothèse (Fig 5).

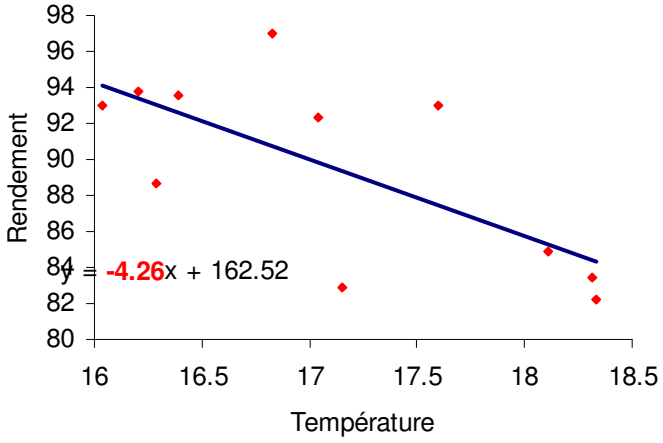

Fig 5. Relation entre le rendement moyen des témoins (toujours les mêmes variétés des essais CTPS Nord) et la température moyenne observée à Versailles, pendant la phase de remplissage du grain, pour la période 1998-2008. On retrouve le même effet de la température que celui montré à la figure 4.

Ces calculs montrent que l'effet température pourrait expliquer jusqu'à 8,5 q sur les 14 q correspondant à l'écart entre les rendements attendus et les rendements actuellement observés. Cependant, d'un point de vue statistique, à l'inverse de la méthode précédente, cette méthode

pourrait surestimer l'effet de la température car elle attribue à la température une partie de ce qui évolue avec le temps. Nous retiendrons donc une marge de variation de 4 à 8,5 q/ha pour l'effet de la température.

L'impact de l'augmentation de température est donc plus fort que tous les autres impacts dus aux changements dans les itinéraires techniques. Bien que cet effet apparaisse fort, il est probablement sous-estimé pour des raisons éco-physiologiques, car la variable température moyenne n'est pas la plus pertinente. L'augmentation de la température est souvent associée à une pluviométrie plus faible, et l'effet observé n'est sans doute pas qu'un effet température. Une température élevée, à des stades critiques du développement du grain, pourrait se traduire par un échaudage plus fréquent (ce qui est vérifié) et un poids spécifique plus faible. Cela signifierait que l'impact de l'évolution des itinéraires techniques serait plus faible que ce qu'il a été supposé.

Pour le colza, les résultats sont de même nature que pour le blé. Le meilleur ajustement des données à une régression année + température moyenne au printemps correspond à une phase allant du 10 mai au 10 juillet. L'équation obtenue est :

Rendement (q/ha) = 0,44 année – 1,04 température moyenne + terme correctif.

Une variation de 1°C ferait donc varier de 1 q/ha les rendements ; compte tenu du réchauffement de cette période de 1,8°C de 1983 à 2008, cela conduit à une perte de rendement due à l'augmentation de température de 1,9 q/ha, avec les mêmes risques de sous-estimation que pour le blé. La prise en compte de la température moyenne nationale réduit encore les déviations à la régression multiple avec un effet température plus fort (2 q/degré), avec un coefficient de l'effet année correspondant sensiblement dans les deux situations au progrès agronomique de 1955 à 1989 (Tableau 1). L'ampleur de cet effet (2 q/degré) est confirmée par l'examen de la liaison entre la réduction observée des rendements et la température (en supposant que le progrès dans la phase 1990-2009 aurait dû continuer comme dans la phase 1955-1989). L'effet de la température serait donc pratiquement suffisant pour expliquer le plafonnement des rendements, ce qui est une situation différente de celle du blé. A noter que chez le colza, à rayonnement égal, il est connu que l'augmentation de la température a un effet négatif sur le nombre de siliques et le nombre de graines par silique. Le poids moyen des grains dépend de l'alimentation hydrique, souvent liée à la température (voir communication A. Pouzet).

Pour le maïs et la betterave, par la même approche, l'effet température n'est pas significatif, quelle que soit la période considérée entre le 10/5 et le 30/9. Cependant, pour la betterave, un effet positif sur le rendement du réchauffement climatique apparaît par l'augmentation de la précocité des semis : ainsi, selon l'ITB, 70 % des progrès en rendement chez la betterave ces 15 dernières années serait dû à l'augmentation de température (voir communication M. Richard-Molard). Pour le maïs, un même phénomène doit exister, puisque les semis sont de plus en plus précoces, ce qui permet la culture de variétés plus tardives, plus productives. L'effet négatif de la température apparaît donc significatif pour les deux cultures qui plafonnent le plus, le blé et le colza.

Un dernier argument montrant un effet de la température est apporté par la comparaison de la progression des rendements des cultures de céréales d'hiver (semées à l'automne) et de printemps (semées au printemps) entre 1989 et 2008 (20 ans) (Tableau 3). Il apparaît que les deux céréales « d'hiver » (blé tendre d'hiver, orge d'hiver) ont des progressions bien plus faibles que les céréales « de printemps » (blé tendre de printemps, orge de printemps). Ces comparaisons, bien que difficiles à faire (car il y a des investissements en sélection assez différents selon les espèces et le type hiver vs printemps d'une espèce) tendent à montrer que, comme attendu, les cultures de

printemps seraient mieux adaptées à un certain réchauffement. Ces résultats sont tout à fait cohérents avec les résultats précédents montrant que le fort ralentissement du rendement affecte essentiellement les cultures d'hiver (blé tendre d'hiver et colza vs betterave et maïs). Les résultats du blé de printemps posent en particulier question, car il y a peu d'investissement sélection sur ce type de blé tendre, alors que pour l'orge, on peut considérer qu'il y a des efforts de sélection significatifs sur les deux types. Pour les céréales de printemps, comme pour la betterave ou le maïs, il doit y avoir un effet des dates de semis qui sont devenus plus précoces du fait du réchauffement climatique.

Tableau 3. *Comparaison des progressions annuelles (q/ha/an) des rendements pour différentes cultures de blé tendre et d'orge installées en automne ou au printemps*. Comme pour le tableau 1, il s'agit des coefficients de régression des rendements moyens nationaux en fonction de l'année.

Type	Blé tendre d'hiver	Orge d'hiver	Blé tendre printemps	Orge de printemps
Période 1955-1989	1,27	1,26	0,77	0,48
Période 1990-2008	0,27	0,35	0,78	0,85

L'hypothèse « température » due au changement climatique a l'avantage d'expliquer plusieurs faits : le ralentissement du progrès agronomique chez les espèces semées avant l'hiver (blé d'hiver, orge d'hiver, colza) mais un moindre ralentissement, voire l'absence de ralentissement chez les plantes semées au printemps (maïs, betterave, blé de printemps, orge de printemps).

Quelle que soit l'espèce, l'augmentation de la température a un impact favorable sur la croissance végétative des cultures d'hiver et des cultures de printemps-été, mais avec un effet plus fort sur ces dernières du fait des semis de plus précoces. Les plantes en C3 productrices de grains (colza, blé, orge, de printemps ou d'hiver) seraient affectées négativement par la température au moment du remplissage des grains, qui entraîne une diminution de l'efficacité de la photosynthèse (plus de photorespiration, qui diminue l'efficience de la conversion, Zhu *et al*., 2008 ; Prioul, communication personnelle). A cet effet pourra s'ajouter un effet du stress hydrique. Le bilan serait négatif pour les cultures d'hiver et positif pour les cultures de printemps. Ainsi, une augmentation de 0,08°C par an conduit à estimer une réduction de l'efficacité de conversion de 0,3-0,4 % ; en supposant qu'elle se reporte totalement sur le rendement, cela conduirait chez le blé, à une réduction de rendement de 0,3-0,4 q/ha/an soit, sur 20 ans, une réduction de 6-8 q/ha, proche de ce qui ne peut pas être attribué à l'évolution des itinéraires techniques.

Le maïs, plante en C4 (sans photorespiration), est sans doute mieux adapté au changement climatique en cours (fortes températures)[7] ; il bénéficierait aussi à l'allongement de la période de végétation grâce à des semis plus précoces (entre 15 à 30 jours) et des récoltes plus tardives (plus 15 jours). En revanche, il pourra aussi souffrir de températures élevées, associées à un stress hydrique, au moment de la floraison (ce qui diminuera le nombre de grains) et pendant la phase de remplissage du grain (ce qui diminuera le poids de mille grains). La betterave est bien adaptée à des températures élevées si l'eau n'est pas trop limitante (sa production est liée uniquement à une croissance végétative) ; elle est moins sensible à un stress hydrique temporaire ; elle bénéficie surtout de dates de semis plus précoces qui permettent une durée de croissance plus longue.

[7] Chez les plantes en C4, l'efficience de la conversion de l'énergie lumineuse ne dépend pas de la température du fait de l'absence de photorespiration.

Copyright – Académie d'Agriculture de France – 2010. Séance du 5 mai.

CONCLUSION

Parmi les espèces considérées, seul le blé tendre d'hiver et le colza montrent un ralentissement, voire un plateau significatif, au niveau des rendements moyens. Il est difficile d'isoler une cause qui expliquerait tous les résultats observés. Il y a sans doute plusieurs causes qui se combinent entre elles pour conduire aux résultats observés dont les effets sont confondus avec le temps. Parmi toutes les hypothèses envisagées pour expliquer le ralentissement du progrès agronomique chez le blé, le ralentissement éventuel du progrès génétique est nettement insuffisant. L'hypothèse d'un ralentissement du progrès dû aux techniques culturales, lié à une réduction des intrants (semences, fongicides, fumure azotée) est difficile à rejeter, mais son impact est assez faible. L'évolution des rotations a sans doute eu un impact plus fort. L'ensemble de ces facteurs pourraient expliquer une réduction de l'ordre de 4 à 7 q/ha sur les 14 à expliquer. L'effet majeur apparaît être celui de l'augmentation des températures et ce qui peut lui être associé : il pourrait expliquer à lui seul une réduction de 4 à 8 q/ha. Chez le colza, l'effet négatif de l'augmentation de la température est aussi très significatif. A l'inverse, l'augmentation de la température a un effet favorable sur les rendements de la betterave. Il apparaît clairement une différence entre les cultures d'hiver et les cultures de printemps qui semble s'expliquer par l'action positive de la température sur la mise en place du couvert végétal pour les cultures de printemps et l'action négative au niveau de la photosynthèse pendant la phase de remplissage du grain.

Les effets de la température pourraient sans doute être mieux mis en évidence à partir d'études écophysiologiques et l'utilisation de modèles de simulation agro-écophysiologiques (Brisson *et al.*, 2010, et communication de P. Gate). Pour conclure de façon plus précise sur l'importance de chacun des effets, il faudrait des expériences adaptées à répondre aux différentes questions posées. L'exploitation des données déjà recueillies apporterait bien plus si elle se faisait en considérant certains paramètres écophysiologiques, à des stades critiques de la culture, et en raisonnant par région de culture (Brisson *et al.*, 2010). Pour quantifier l'impact sur l'évolution des rendements de l'évolution du progrès génétique et de l'évolution des itinéraires techniques, une expérimentation particulière devrait être conduite. Il s'agirait d'une expérimentation lourde, à conduire en priorité chez le blé tendre, dans différentes régions (voire différents pays) avec des variétés d'époques différentes de sélection et différents itinéraires techniques. L'étude prendrait encore plus d'intérêt si elle faisait intervenir d'autres espèces comme le colza et le maïs. Parallèlement à ces études il faudrait mettre en place pour les espèces de grande culture des essais de longue durée avec toujours les mêmes variétés, dans différentes régions, afin de mesurer l'effet de l'évolution du climat.

Cette évolution du climat devrait être prise en considération à différents niveaux : choix des espèces, critères de sélection à l'intérieur d'une espèce et itinéraires techniques.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

(1) ADME, 2007. – Évaluation des impacts environnementaux des techniques culturales sans labour en France. La pratique des TCSL. Rapport

(2) Agreste Primeur, 2008. – n° **207**, février 2008. Dans le sillon du non-labour.

(3) Agreste Primeur, 2008. – n° **210**, mai 2008. Les rendements du blé et du maïs ne progressent plus.

(4) BRISSON N., GATE P., GOUACHE D., CHARMET G., OURY F-X., HUARD F., 2010. – Why are wheat yields stagnating in Europe ? Analysis of a large set of results from France. (soumis pour publication).

(5) CHARMET G. *et al.*, 2008. – Pourquoi le rendement semble t-il stagner depuis 10 ans en grandes cultures. Conseil Scientifique Arvalis-INRA, 9 Décembre 2008.

(6) DESPREZ M., 2002. – Évolution de la betterave de 1962 à 2002. 40 années d'amélioration de la betterave sucrière. Le Sélectionneur Français, **53**, 35-40.

(7) DESPREZ M., 2009. – Histoire de la sélection de la betterave. Témoignage d'un acteur de la sélection moderne. Le Sélectionneur Français, **60**, 117-121.
(8) GALLAIS A., 2002. – Progrès génétique chez le maïs. Le Sélectionneur Français, **53**, 23-34.
(9) GATE P., 2009. – Les raisons du plafonnement des rendements chez le blé tendre. Perspectives Agricoles, **355**, 20-27.
(10) GEVES, 2004. – Luciani A. Étude du progrès génétique de différentes espèces de grande culture. Rapport global.
(11) ITB. M RICHARD-MOLARD
(12) LE BUANEC B., 2009. – Académie des Technologies.
(13) LORGEOU L, PIRAUX F., LACROIX B., RENOUX J.P., CHARCOSSET A., 2009. – Une progression des rendements soutenue par le progrès génétique chez le maïs grain Perspectives Agricoles, **355**, 28-35.
(14) SAUGIER B., 2008. – Rendement maximal des cultures. Note à la Section 5 de l'Académie d'Agriculture de France (Document interne AAF).
(15) TROTTET M., DOUSSINAULT G., 2002. – Analyse du progrès génétique chez le blé tendre au cours du XXème siècle. Le Sélectionneur Français, **53**, 3-18.
(16) ZHU X-G., LONG S. P., ORT D.R., 2008. – What is the maximum efficiency with which photosynthesis can convert solar energy into biomass? Current Opinion in Biotechnology, **19**, 153-159.