LES CAUSES DU PLAFONNEMENT DU RENDEMENT DU BLÉ EN FRANCE : D'ABORD UNE ORIGINE CLIMATIQUE

Philippe **Gate**[1], avec la collaboration de Nadine **Brisson**[2] et David **Gouache**[1]

RESUME

Le plafonnement des rendements observé sur blé tendre en France et en Europe a fait l'objet d'une étude approfondie pour en explorer les principaux facteurs explicatifs. Nous présentons ici plus particulièrement, les outils utilisés et les résultats obtenus pour l'étude du poids des facteurs climatiques, et en particulier des fortes températures. Nous avons calculé des indicateurs dits phénoclimatiques : il s'agit d'indicateurs climatiques sur des phases précises du cycle de la culture du blé - sous hypothèse de précocité variétale et de date de semis. On remarque que deux indicateurs phénoclimatiques, déficit hydrique pendant la montaison et remplissage et nombre de jours avec des températures excessives pendant le remplissage, expliquent très bien les variations interannuelles de rendement observées dans la plupart des régions de France. Par ailleurs, on montre que ces indicateurs ont connu une évolution au cours des dernières années : déficit hydrique comme températures excessives sont en hausse, malgré une avancée des stades, qui n'a pas suffi pour éviter ces stress. Les bases expérimentales qui ont permis d'établir ces indicateurs sont présentées. Nous concluons à un rôle majeur de l'évolution climatique récente dans la stagnation observée des rendements du blé en France : ce constat est convergent avec d'autres études réalisées dans le monde, chez le blé et le riz. Les orientations à venir de la recherche agronomique devront absolument tenir compte de ce phénomène pour espérer maintenir l'augmentation de la production agricole.

INTRODUCTION

Une étude des facteurs susceptibles d'être à l'origine du plafonnement des régions a été entreprise récemment par ARVALIS, en collaboration avec l'INRA (GATE P., 2009). Les éléments de la conduite culturale susceptibles d'avoir le plus d'impact sur la production soit, le choix variétal (via le progrès génétique), les postes de fertilisation (notamment azotée) et de protection contre les maladies ont été analysés grâce à des enquêtes de pratiques culturales (sur 5 régions françaises). L'analyse de ces observations a été complétée par des données d'expérimentation, des approches relatives à l'évolution du climat et par la mise en œuvre de modèles simulant les impacts des stress climatiques sur le rendement du blé. Ces démarches fournissent des résultats très convergents et il ressort de l'ensemble de ces analyses, les résultats suivants :

- le progrès génétique sur le blé s'est maintenu à un niveau constant de l'ordre de 1q par hectare et par an, avec une progression plus soutenue (1,3) en conduites culturales sans traitement fongicide ; la génétique n'est pas responsable de cette stagnation et la tolérance variétale vis-à-vis des maladies cryptogamiques s'est accrue.

[1] ARVALIS- Institut du Végétal, La Minière.
[2] INRA Avignon, US Agroclim.

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

- les pratiques culturales liées aux intrants (fertilisation azotée, emploi de fongicides) ont modérément évolué. Les agriculteurs ont finalement peu « désintentisifié » leurs pratiques et la traduction de ces évolutions en termes de pertes de rendement s'avère modérée.
- Les rotations ont évoluées plus sensiblement (augmentation moyenne sur 12 ans de 15% du précédent Colza, au détriment du Pois protéagineux, moins 15%) ; cette modification a engendré une diminution relative des rendements également assez faible.
- Le raccourcissement des rotations, souvent associé à une plus grande homogénéité des espèces cultivées, a sans doute eu des impacts indirects sur la fertilité biologique et la qualité structurale des sols dont les impacts sont plus difficilement chiffrables ; toutefois l'analyse des essais de longue durée montre que la mise en œuvre des techniques d'une agriculture raisonnée s'est traduit par un maintien de la fertilité chimique et du pouvoir de minéralisation des sols.
- en revanche, les principaux risques climatiques préjudiciables sur le blé (déficit hydrique en cours de montaison, ainsi que sécheresse et températures excessives au cours du remplissage des grains) ont très significativement augmenté dans la grande majorité des bassins de production. Ces facteurs climatiques calculés sur les phases du cycle (notion de « phénoclimat ») expliquent à elles seules entre 50 et 88% de la variation des rendements, selon les départements.

En complément de l'étude réalisée par André Gallais, ce texte développe les aspects climatiques du plafonnement des rendements du blé en se focalisant plus particulièrement sur le rôle exercé par la température.

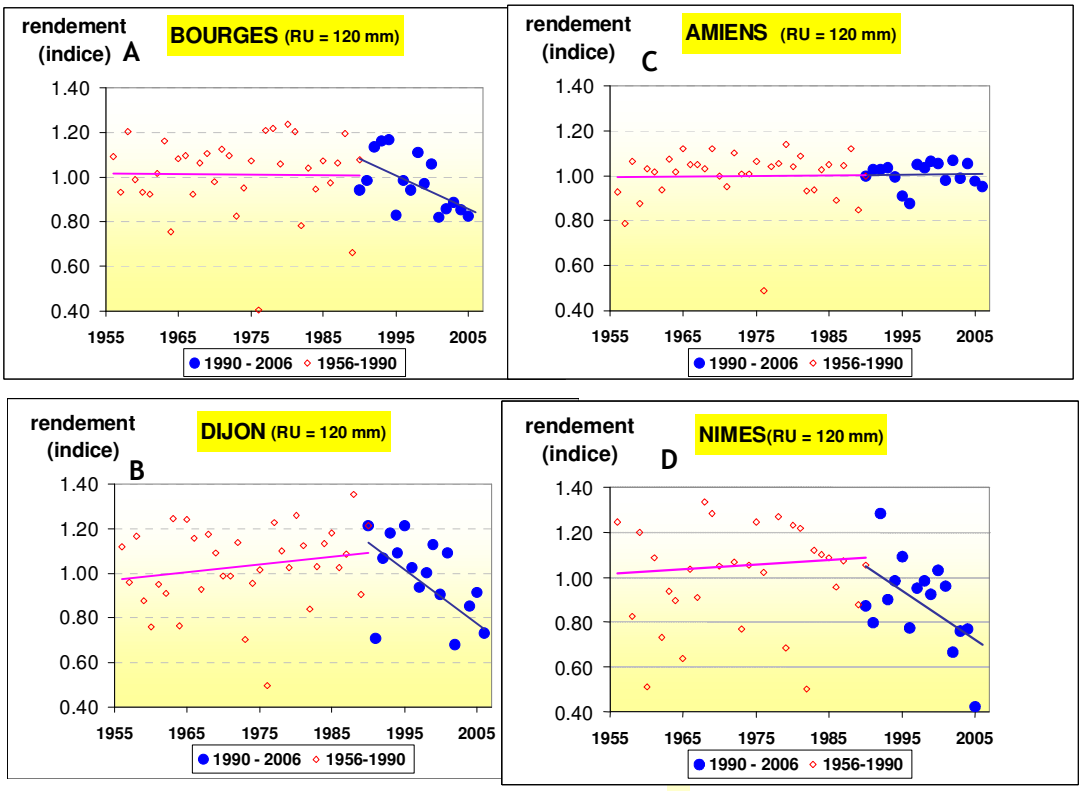
MATÉRIEL ET MÉTHODES

Les données utilisées pour cette étude sont de nature variée : données statistiques de rendement à des échelles nationales ou régionales (données du SCEES ou AGRESTE pour la France, de la FAO pour les autres pays), données de résultats d'expérimentations ARVALIS et données issues de modèles de culture. Les données d'expérimentation ARVALIS visent à estimer le rendement permis par les milieux avec la mise en œuvre de techniques optimales dans le cadre d'une agriculture raisonnée.

Les données climatiques pour les calculs d'indicateurs et la modélisation sont celles de Météo France et comportent de longues séries chronologiques de stations météorologiques représentatives de différents bassins de production.

Les outils de diagnostic agronomique sont de deux types :

- des indicateurs « phénoclimatiques », c'est-à-dire des variables climatiques calculés sur des phases pertinentes du cycle et pour lesquelles des fonctions d'impact sont connues (Gate, 1995). On a ainsi évalué le nombre de jours échaudants au cours du remplissage des grains en MS (nombre de jours où Tmax > 25°C entre l'épiaison et la maturité physiologique) ainsi que le déficit hydrique durant la même période et au cours de la montaison. Les valeurs dépendant de la phénologie, nous avons retenue la variété Soissons dont le rythme de développement correspond au type le plus fréquent à l'échelle de la France.
- des modèles dynamiques de culture : PANORAMIX (Gate, 1995) et STICS (Brisson et al., 2002) ont également été mis en oeuvre. Ces modèles prennent en charge les effets du climat et les simulations ont été effectuées en considérant les techniques culturales non limitantes (nutrition, bioagresseurs) avec la variété Soissons.



Figures 1A,B, C et D : *Modélisation des rendements climatiques obtenus avec le modèle PANORAMIX pour 4 types de régions. Le rendement est exprimé sous forme d'indice relativement à la valeur moyenne des rendements simulés.*

PRINCIPAUX RÉSULTATS

Rendements climatiques produits par modélisation de culture

Les résultats entre les deux modèles (PANORAMIX et STICS) sont très convergents. Dans la plupart des situations, on observe d'abord un effet neutre ou positif du climat entre les années 1955 et 1995. Après 1995 environ, on constate une incidence franchement négative du climat sur le rendement. Seules les bordures maritimes du nord et du nord-ouest manifestent peu d'effets climatiques pénalisants. Les pénalités sont plus accusées en région sud, dans le Centre et le Centre-Est de la France.

Relations entre rendement constaté et indicateurs phénoclimatiques

Nous avons mis en relation le rendement issu de différentes régions françaises (Picardie, Bourgogne, Normandie, Centre et Provence Côte d'Azur, données statistiques régionales du SCEES) en fonction de l'année de récolte 1990 à 2008. Nous avons estimé ensuite les écarts à cette tendance linéaire par des indicateurs phénoclimatiques : le déficit hydrique cumulé pendant la phase de montaison (entre le stade épi à 1 cm et la floraison) et une variable d'impact qui combine déficit hydrique et nombre de jours échaudants au cours du remplissage des grains en MS.

La température et le déficit hydrique expliquent de 65% (Normandie) à 88% (région PACA) la variabilité interannuelle du rendement régional (figures 2 et 3). Une analyse plus approfondie permet de conclure que dans la région PACA, la sécheresse a le plus d'impact sur le rendement ; en

revanche, pour les autres secteurs, c'est en priorité l'échaudage thermique qui explique la plus grande partie de la variation de rendement.

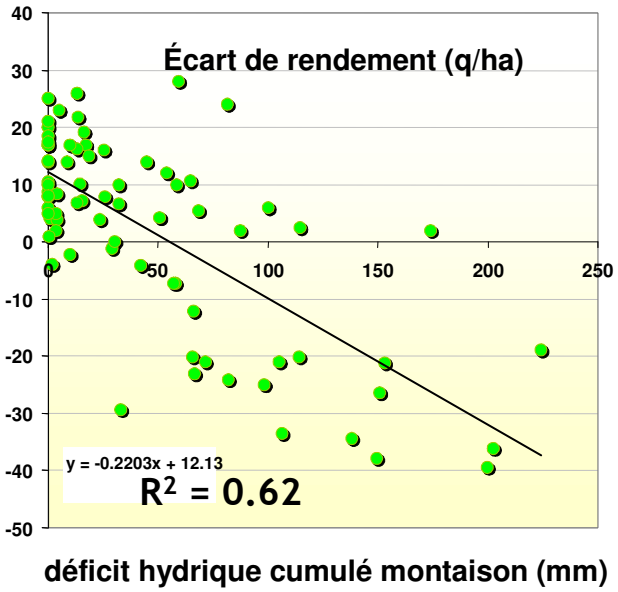


Figure 2 : *Relation entre l'écart à la tendance linéaire des rendements et le déficit hydrique cumulé pendant la phase de montaison. Les stades sont estimés avec la variété Soissons, semée le 15/10, sur un sol de réserve utile de 120 mm avec les stations météorologiques représentatives des régions : Amiens, Dijon, Bourges, Caen et Nîmes.*

En complément de cette étude nous avons mis en relation pour chaque département, les écarts de rendement entre l'année n et celle qui la précède (n-1) avec les variables phénoclimatiques calculés sur le même intervalle de temps. Cette procédure permet de s'affranchir d'autres causes tendancielles comme le progrès génétique ou une éventuelle évolution des techniques culturales. Pour la quasi-totalité des départements, on observe des relations négatives significatives entre les variables sécheresse en cours de montaison et le nombre de jours trop chauds au cours du remplissage. On constate que pour les grandes zones de production du blé, qui présentent souvent peu de déficits hydriques (sols profonds, pluviométrie peu limitante) c'est en priorité les températures excessives qui expliquent le plus la variabilité interannuelle du rendement. Pour les sites du sud de la France (sud-ouest et surtout sud-est), la variabilité interannuelle du rendement s'explique davantage par la sécheresse.

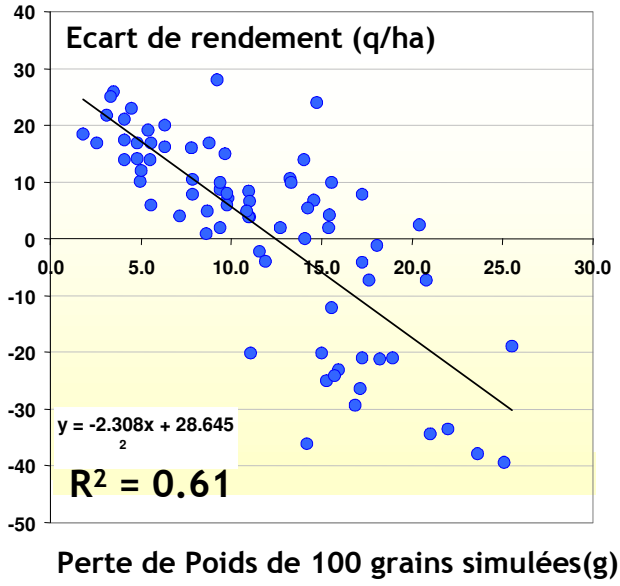


Figure 3 : *Relation entre l'écart à la tendance linéaire des rendements et les pertes de poids de 1000 grains simulés par les températures . échaudantes et la sécheresse au cours du remplissage. Les stades sont estimés avec la variété Soissons, semée le 15/10, sur un sol de réserve utile de 120 mm avec les stations météorologiques représentatives des régions : Amiens, Dijon, Bourges, Caen et Nîmes.*

De même, pour apporter des éléments probants supplémentaires, nous avons comparé l'évolution des rendements établie selon les statistiques régionales avec celle de nos expérimentations (menées avec des techniques culturales menées à l'optimum, c'est-à-dire sans facteurs limitants autres que ceux d'ordre climatique). Cette analyse comparative a été menée en Champagne, Bourgogne, Bretagne et PACA avec des séries pouvant commencées depuis les années 1980. Pour toutes les régions, on note une exacte synchronie quant à la variation d'une année à l'autre des rendements : le poids du climat est donc prééminent. Si effectivement, le plafonnement du rendement était dû à des changements d'attitude en termes de techniques culturales, une telle concomitance n'existerait pas entre les deux sources d'information.

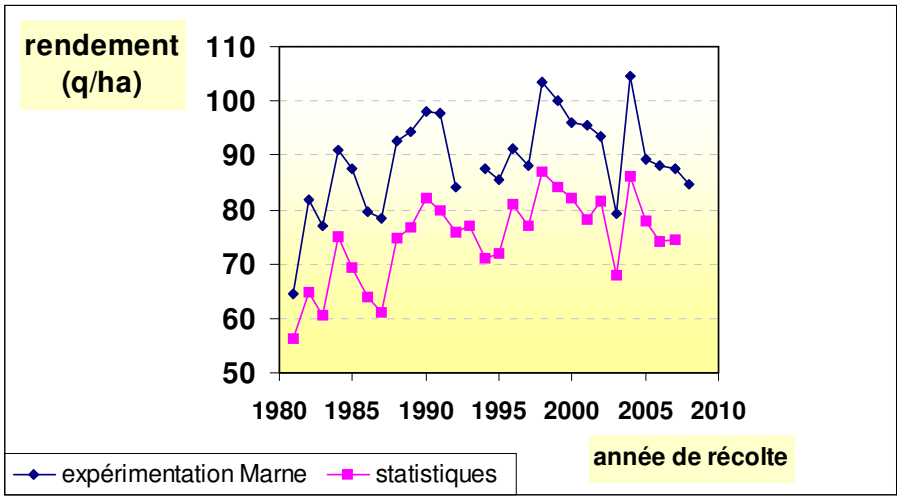


Figure 4 *: Evolution comparée des rendements issus de deux sources d'information : (expérimentations menées à l'optimum et données statistiques régionales). Exemple du département de la Marne.*

Quantification de l'effet des fortes températures sur le rendement

Des travaux menés par l'ITCF (Institut Technique des Céréales et des Fourrages ont permis de chiffrer les effets des jours échaudants sur le poids de 1000 grains de différentes variétés (GATE 1995). Pour l'ensemble des variétés analysées, la variable la plus explicative des écarts au poids de 1000 grains est le nombre de jours où la température maximale dépasse 25°C pendant le remplissage. De plus, la loi d'action ne met pas en évidence d'effet significatif de la variété. Il est donc possible d'établir l'équation générale suivante :

$$y = (0{,}78 \pm 0{,}03)\ x$$

avec y = perte de poids de 1000 grains (en g) par rapport au potentiel accessible

x = nombre de jours avec Tmax > 25°C pendant le remplissage ou entre l'épiaison et épiaison + 750°C,

des coefficients de corrélation compris entre 0,79 et 0,87 selon les cultivars,
des effectifs compris entre 42 et 54 selon les cultivars, et utilisable sous certaines conditions : absence de verse, de maladies, et pas de déficit hydrique marqué.

En considérant des valeurs moyennes et représentatives de poids de 1000 grains (45 grammes) et d'un nombre de grains/m2 (18000), ce modèle permet de situer l'ordre de grandeur des pertes de rendement consécutives à l'échaudage thermique : une journée supplémentaire avec une température maximale à plus de 25°C pendant le remplissage équivaut à une réduction du rendement de 1.4 q/ha.

Une étude plus récente menée avec des variétés contemporaines aboutit à des conclusions très proches. Effectivement, nous avons analysé les écarts à la relation entre le rendement et la

biomasse atteinte au stade floraison, indicatrice du nombre de grains au mètre carré, pour différents cultivars, dans diverses régions céréalières (Picardie, Bourgogne, Champagne Berrichonne, Bassin Parisien) avec des données expérimentales acquises entre 1995 et 2005. Les écarts de rendement sont expliqués à hauteur de 73% par le nombre de jours où T max dépasse 25°C entre l'épiaison et la maturité physiologique. La pente de la relation équivaut à une perte de rendement de l'ordre de 1.6 q/ha par jour échaudant supplémentaires (figure 5)

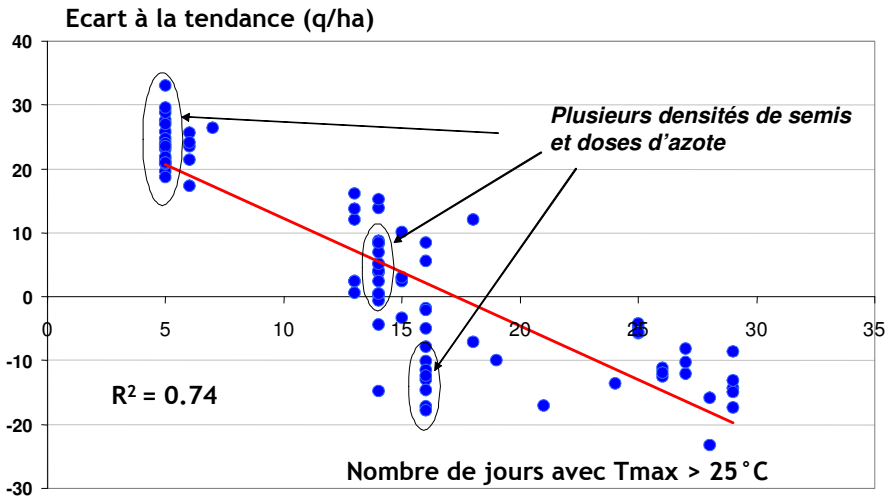
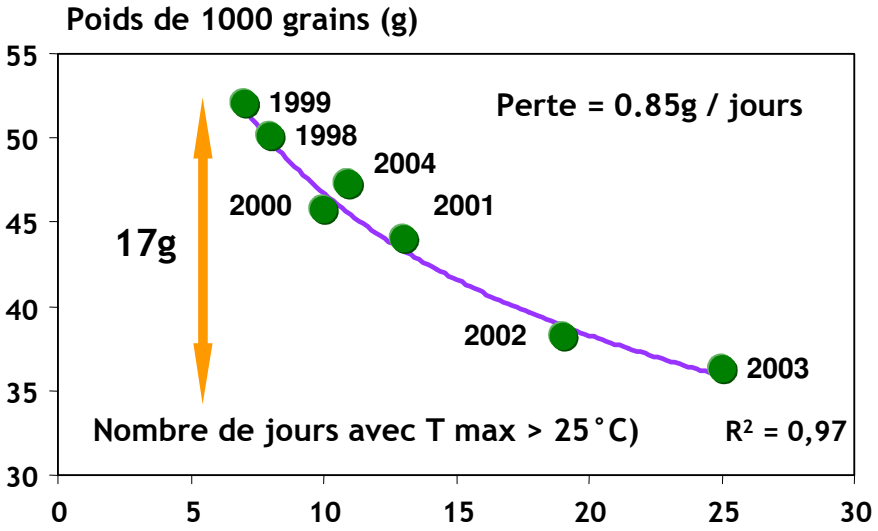


Figure 5 : *relation entre l'écart à la tendance de la relation entre le rendement et la biomasse floraison (Y) et le nombre de jours où Tmax excède 25°C au cours du remplissage des grains. Différents lieux et variétés de 1995 à 2005.*

Figure 6 : *relation entre le poids de 1000 grains et le nombre de jours où Tmax>25°C durant le remplissage pour l'orge de printemps. Relation établie sur un même lieu (Labergement, Bourgogne, sol profond) et une seule variété (Scarlett)*



Le risque d'échaudage thermique a augmenté

L'analyse de l'évolution du climat a été menée sur la base des données météorologiques historiques de 59 stations bien réparties dans les différents bassins de production, à l'échelle de la France. Cette étude a consisté à comparer deux séries chronologiques de taille égale : la première allant de 1955 à 1980 et la deuxième de 1981 à 2005. La figure 7 illustre la médiane du nombre de

jours dépassant 25°C au cours du remplissage pour une épiaison précoce du 15 mai, pour chacune des séries.

Tous les points (les stations) se situent en dessous de la bissectrice ce qui signifie que le risque d'échaudage a augmenté partout. Il a notamment fortement évolué (quasiment doublé) dans les régions du Centre, du Centre-Est et du Centre-Ouest. Dans les régions caractérisées par un fort risque initial, le risque a relativement moins évolué mais atteint actuellement des niveaux préoccupants. Seules les régions situées près des bordures du Nord-Ouest (départements 14, 76, 80, 22…) ont été quasiment épargnées.

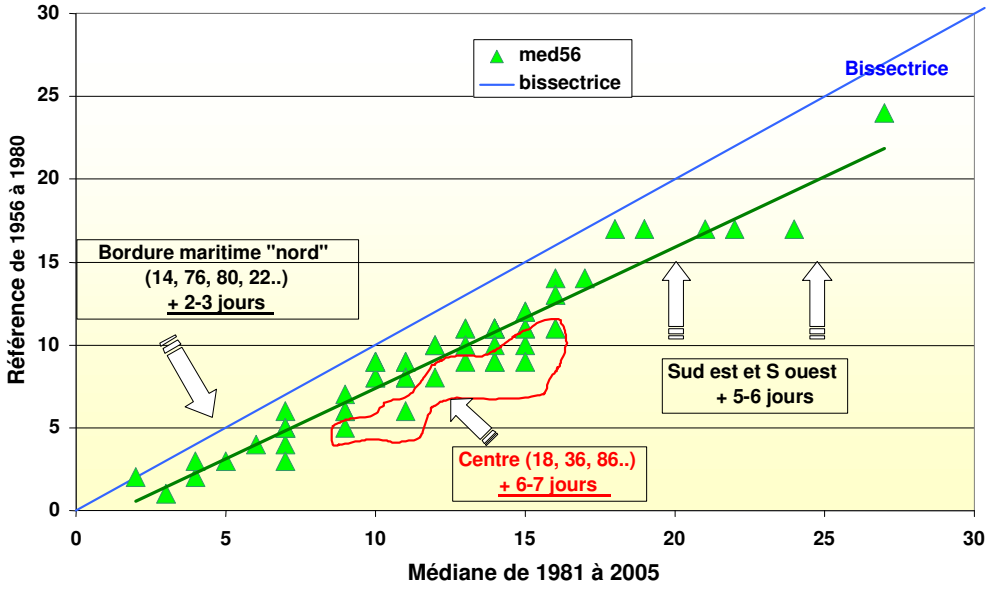


Figure 7 *: Comparaison de la médiane du nombre de jours échaudants au cours du remplissage entre les 2 séries climatiques historiques pour une épiaison précoce du 15 mai.*

Ces résultats ont été enrichis en prenant en compte l'anticipation des stades sous l'effet du changement climatique. En effet, nous avons calculé pour chacune des séries et des stations météorologiques les pertes de poids de 1000 grains au cours du remplissage pour une date de semis du 15 octobre, avec une variété de précocité de type Soissons.

En dépit d'une anticipation réelle des stades (de l'ordre de 10 jours en 20 ans), le risque « phénoclimatique » d'échaudage thermique a significativement évolué. Le fait de les calculer pour chacune des années permet d'estimer l'augmentation du risque pour différents types de profils d'années (année « favorable ou décile 2 ; année médiane ou décile 5 ; année défavorable ou décile 8) :

- pour la région du Centre et de sa périphérie, les pertes moyennes de poids de 1000 grains ont augmenté de 2 à 3 g en année favorable, de 3 à 4 g en année normale et sont du même ordre de grandeur en année défavorable.
- pour les régions plus au sud, on constate une élévation des pénalités de 3 à 4 g quel que soit le profil de l'année.
- pour les régions proches des bordures maritimes du Nord-Ouest (Picardie, Basse Normandie, Bretagne Nord…), on constate une évolution non significative

Des investigations plus approfondies montrent par ailleurs que l'occurrence des fortes températures pendant la période la plus sensible du remplissage (celle concernée par les divisions cellulaires) a également fortement augmentée, se traduisant donc par des préjudices plus sévères.

On constate par ailleurs des nombres de jours échaudants consécutifs dorénavant plus fréquemment depuis une quinzaine d'années ce qui constitue également un facteur aggravant. Sous de tels scénarios, la température de nuit s'élève et induit très probablement des pertes supplémentaires via une stimulation de la respiration nocturne. Le risque d'avoir des températures nocturnes élevées n'existait pas avant les années 1990 dans les grandes zones céréalières, ce qui n'est plus le cas aujourd'hui.

En outre, on observe que d'autres événements extrêmes peuvent se conjuguer et aggravent la situation : baisse des pluies hivernales empêchant la reconstitution des réserves hydriques (1996, 1997, 2002 et 2005) ou contraire excès d'eau hivernal limitant l'enracinement (2001, 2003, 2007) ou excès d'eau post floraison (2007, 2008), augmentation de la demande climatique pendant la montaison et réduction des pluies printanières (1996, 1997), rayonnement exceptionnellement bas au moment de la fécondation (2008) et enfin très faible endurcissement au froid des blés suivi de cycles gél-dégel très sévères (2003).

CONCLUSION

Oui le rendement du blé plafonne en France, dans la quasi-totalité des régions. Seules les régions les plus au nord, épargnées par l'occurrence de stress abiotiques significatifs sont épargnées. La plus grande partie de l'érosion des rendements est expliquée par le climat, notamment par les sécheresses (dans le sud de la France) et surtout par les fortes températures (dans les grandes zones céréalières).

Les tendances issues des simulations des modèles dynamiques de culture sont cohérentes avec l'expertise de l' effet des stress hydriques et thermiques. On met en évidence le rôle important et fortement dépressif des fortes températures au cours du remplissage sur le rendement. Contrairement à la sécheresse, ce phénomène intéresse tous les types de sol et son impact concerne des surfaces plus grandes. Le rôle négatif des fortes températures à l'origine du plafonnement des rendements à l'échelle mondiale a aussi été conclu par d'autres auteurs : sur le Blé (Lobell et al. , 2007) et sur le riz (Peng et al. , 2004 repris par « Le Monde », 2004). Ces derniers mentionnent également le rôle fortement préjudiciable des températures nocturnes, de plus en plus élevées.

L'anticipation des stades induite par le changement climatique n'a pas été suffisante pour annuler l'impact des facteurs climatiques. La conception d'une esquive plus efficace et l'amélioration de la tolérance génétique aux stress climatiques (à la sécheresse, et surtout à l'échaudage thermique, caractère peu exploré) constituent des axes de recherche à privilégier.
S'agissant de la température, des recherches plus fondamentales pour comprendre et hiérarchiser les mécanismes physiologiques qui sont à l'origine de l'expression de l'échaudage thermique sont à mener : d'une part pour « phénotyper » de manière pertinente le matériel végétal dans des projets d'amélioration génétique et d'autre part pour mieux simuler les incidences du climat futur en prenant mieux en compte les conditions plus extrêmes et les interactions, notamment avec l'élévation du taux de CO_2.

Il convient également de mentionner que dans les modèles socio-économiques globaux, source des scénarios prédictifs de la planète, le caractère toujours linéaire de l'évolution des rendements des céréales est toujours pris en compte. Notre constat remet en cause la prise en compte d'une telle hypothèse.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

(1) BRISSON N., RUGET F., GATE P., LORGEOU J., NICOULLARD B., TAYOT X., PLENET D., JEUFFROY, M.H., BOUTHIER A., RIPOCHE D., MAY B., JUSTED E., 2002. – STICS : a generic model for the simulation of crops and their water and nitrogen balances. II- Model validation for wheat and maize. Agronomie **22**, 69-92.

(2) GATE P., 1995. – Ecophysiologie du blé : de la plante à la culture. Lavoisier Éditeur, Paris, France 424 pages.

(3) GATE P., 2007. – Dossier « le blé face au changement climatique », Perspectives Agricoles, N 336, 20-56.

(4) GATE P., 2009. – « les raisons du plafonnement des rendements du blé en France », Perspectives Agricoles, N 355, 6-12.

(5) « Le Monde », 2004. – Coup de chaud sur le riz. Dans « Le Monde », 27/04/2004.

(6) LOBELL D. B, FIELD C. B, 2007. – Global scale climate-crop yield relationships and the impacts of recent warming. Environmental Research Letters 2 (March 2007) 014002.

(7) PENG S., HUANG J., SHEEHY J., LAZA R., VISPERAS M., ZHONG X., CENETO G., *et al.*, 2004. – Rice yields decline with higher temperature from global warming. Agriculural Sciences, PNAS, vol. 101, no. **27**, 0071-9975.