"Le Sélectionneur Français" 2007 - 2008 (n° double 58 - 59), **15 - 30**

LE BLE ET LE CHANGEMENT CLIMATIQUE : IMPACTS ET PERSPECTIVES

Philippe GATE, ARVALIS-Institut du végétal
p.gate@arvalisinstitutduvegetal.fr

1 - FACE AU CHANGEMENT CLIMATIQUE, LES PRINCIPAUX MECANISMES MIS EN JEU.

La température, principal moteur du développement

Pour de très nombreuses espèces, la température est le facteur qui conditionne en premier la date de réalisation des stades de la culture.

Dans le cas des céréales à paille, la température n'agit pas seule car d'autres facteurs interviennent également sur le déterminisme des stades de développement, notamment la durée du jour et la vernalisation. Les céréales à paille sont effectivement des espèces dites de jours longs préférentiels, ce qui signifie que leur vitesse de développement est stimulée en jours longs ou freinée en jours courts. Ce besoin est relatif et peut surtout être très variable selon les variétés.

Par ailleurs, beaucoup de variétés cultivées nécessitent un séjour préalable au froid pendant leur période juvénile afin de passer de l'état végétatif à l'état floral : c'est la vernalisation. Pour ce processus les températures optimales sont comprises entre 3 et 10°C. Sous l'impact du réchauffement on peut donc s'attendre à ce que la vernalisation demande plus de temps pour être satisfaite.

En résumé, si la variété est peu sensible à la durée du jour et peu exigeante en vernalisation, les températures auront une incidence très significative sur les dates d'occurrence des stades. Au contraire, si la variété est de type très hiver et exigeante en jours longs, l'impact des températures sera beaucoup moins significatif. Dans un milieu donné, la variété qui présente de forts besoins en jours longs, aura un comportement plus stable vis-à-vis de la température par le fait que la photopériode dépend strictement de la latitude. Ce dernier caractère constitue, comme nous le verrons plus loin, un atout précieux dans un objectif de stabiliser la précocité d'une variété.

La température conditionne aussi la croissance

Température élevée et architecture de la plante

Comme la température agit sur la vitesse de sortie des feuilles, la production de talles est anticipée et le plus souvent activée en régimes de températures plus chaudes. Par ailleurs, durant la phase de tallage, la température agit également sur la taille des feuilles qui sont plus longues. Ceci est dû au fait que durant l'hiver les températures sont le plus souvent limitantes pour la croissance des limbes.

En revanche, les températures trop élevées en phase de tallage augmentent la dominance apicale : les talles jeunes (les talles secondaires) sont alors inhibées et ne se développent pas. La régression des talles pendant la première étape de la montaison est activée en présence de température trop élevées : un nombre plus grand de talles meurt prématurément. Ainsi paradoxalement, fortes températures ne riment pas toujours avec tallage épis abondant.

Les fortes températures en cours de montaison ont également tendance à réduire la longueur des entre nœuds, même en conditions non limitantes d'alimentation hydrique.

Température élevée et croissance

La mise en place du nombre de grains/m^2 est moins affectée par les fortes températures que le remplissage des grains.

En revanche, si la température est telle qu'elle entraîne une forte avancée de certains stades (comme le stade épi à 1 cm et la méiose notamment pour des variétés précoces), c'est le risque de rencontrer des températures basses pénalisantes (Tmin< -4°C sous abri) pendant la montaison qui peut s'accroître. Sur un même registre, l'absence de températures négatives pendant le tallage se traduit par une impossibilité pour la plante de s'endurcir au gel : la culture peut donc être endommagée avec des gelées d'intensité modérée, comme en 2003.

Le remplissage des grains en matière sèche peut être extrêmement réduit par de fortes températures. Plusieurs mécanismes physiologiques sont à l'origine de tels effets :

- le poids des grains, qui sont principalement composés d'amidon nouvellement formé après floraison dépend donc en premier lieu de la photosynthèse des 2 dernières feuilles. L'optimum thermique de ce processus, pour le blé, se situe pour le remplissage des grains entre 14°C et 17°C. En effet, lorsque les températures sont plus élevées, une plus grande fraction du CO_2 atmosphérique qui pénètre dans les feuilles n'est pas intégrée dans la matière organique car il y a en ce cas, concurrence avec le phénomène de photorespiration. Quand la température est élevée sur plusieurs jours successifs, la température de la nuit finit également par augmenter. C'est alors la respiration nocturne qui est stimulée ; La plante est alors contrainte d'utiliser une plus grande part de son énergie produite pour maintenir la viabilité de ses différents tissus.
- La production d'amidon dans le grain est par ailleurs inhibée par les fortes chaleurs. En effet, à la fois biosynthèse et activité de l'amylase-synthase, enzyme clé de cette élaboration sont réduites sous l'action des températures élevées.
- Les températures élevées ont aussi une incidence sur la fermeture des stomates, réduisant ainsi l'entrée du CO_2 dans les feuilles et donc l'activité photosynthétique.
- Enfin, des séquences de plus de 8 jours avec de très fortes températures consécutives peuvent induire des symptômes de sénescence anticipée ou de nécroses. De tels symptômes peuvent résulter d'un échauffement des limbes avec comme conséquence un décollement des membranes de certaines structures vitales pour la vie de la plante, comme notamment les chloroplastes.

Des études et des expertises récentes montrent que la première phase du remplissage (entre floraison et grain laiteux) est la plus sensible au stress thermique (et également hydrique). Durant cette période, les nombres de cellules des téguments puis de l'albumen sont rapidement fixés. Le nombre des cellules formées à la fin de cette première étape conditionne directement la vitesse du remplissage en matière sèche, critère déterminant du poids des grains.

Les conditions thermiques les plus nuisibles sont donc des températures excessives et persistantes entre la floraison et le stade grain laiteux.

L'eau, moteur de la transpiration, peut être le principal facteur limitant de la croissance

En présence de déficit hydrique, les stomates se ferment plus ou moins rapidement : les échanges gazeux et donc la croissance sont limités. Les processus d'élongation et de multiplication cellulaire sont les premiers affectés. Les organes produits sont donc petits. Leur durée de vie est par ailleurs écourtée par une sénescence ou une dégénérescence anticipées.

Les premières étapes de la croissance sont rarement perturbées de manière significative par les effets de la sécheresse. Cette nuisibilité relativement faible est à mettre en relation avec l'alimentation azotée et la notion de besoin par phase de croissance. Effectivement, durant toute la durée du tallage herbacé et jusqu'au stade épi à 1cm les besoins en azote pour la croissance sont faibles (50-60 kg/ha). En revanche, pendant l'étape de montaison qui suit, les besoins en azote deviennent nettement plus importants : une sécheresse durant cette phase aura donc un impact beaucoup plus préjudiciable car elle pourra induire en supplément une carence en azote.

C'est globalement cette étape de montaison et en particulier sa deuxième partie (alimentation des futurs épis, les talles trop jeunes ayant déjà régressé) qui est la plus sensible à la sécheresse.

Le nombre de grains/m^2 est directement conditionné par la biomasse produite jusqu'à la floraison. Pour un blé standard demi précoce, cette composante n'est pas affectée dès lors que la biomasse (exprimée en matière sèche) excède 12 tonnes par hectare.

Si le déficit hydrique cumulé en cours de montaison dépasse 50 mm, les pertes de biomasse et de nombres de grains associées deviennent significatives (Figure 1).

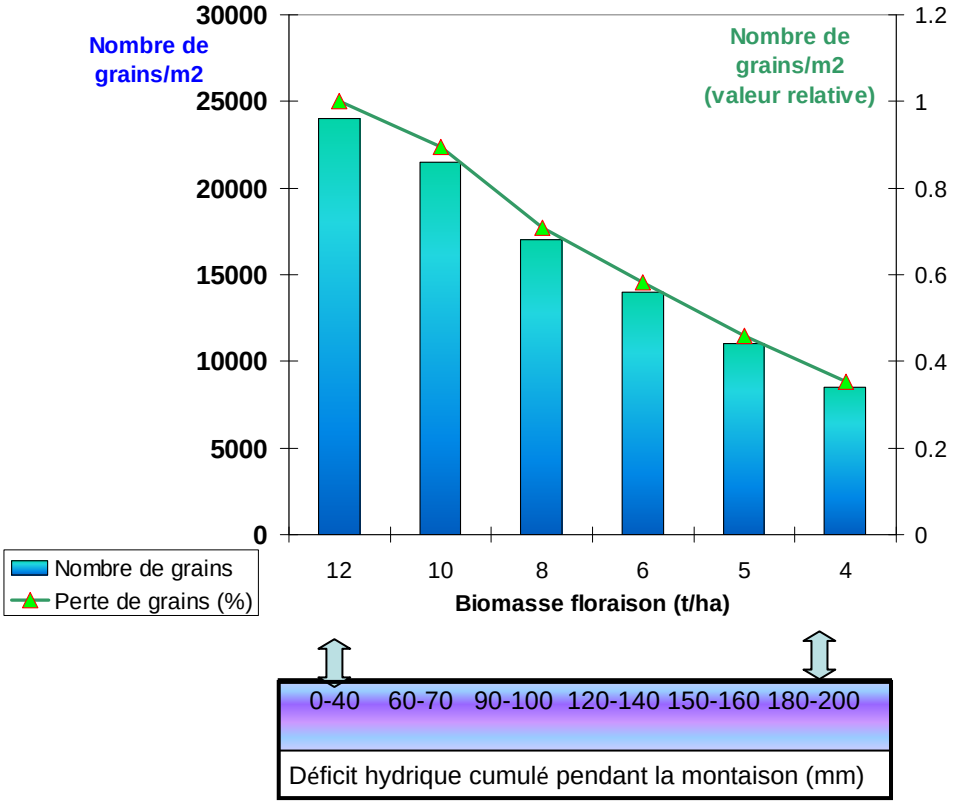


Figure 1 : Effet du déficit hydrique cumulé pendant la montaison sur la biomasse à la floraison (bâtons) et le nombre de grains/m^2. Les pertes de grains/m^2 sont aussi exprimées en valeurs relatives.

La sécheresse a aussi un effet préjudiciable sur le poids des grains. Ce dernier étant directement dépendant de l'activité photosynthétique post-floraison, une limitation des échanges gazeux par la sécheresse pourra donc avoir un impact très important. Comme le déficit en eau pénalise en premier la multiplication puis l'élongation des cellules, le nombre de cellules produit et fixé pendant la première étape du remplissage, puis leur élongation, seront affectés : les grains seront inéluctablement de petites tailles.

2 - EVOLUTION DU CLIMAT : INCIDENCES SUR LA PRODUCTION DU BLE POUR DIFFERENTES REGIONS DE PRODUCTION

On se propose de chiffrer les conséquences de l'évolution climatique en analysant les données météorologiques historiques de 59 stations bien réparties dans les différents bassins de production, à l'échelle de la France. Pour caractériser l'évolution du climat, nous avons mis la priorité sur l'analyse des données météorologiques historiques plutôt que d'utiliser en premier lieu les données prévisionnelles simulées actuellement pour un futur trop lointain (à partir de 2070).

Une première analyse consiste à comparer 2 séries chronologiques de taille égale : la première allant de 1955 à 1980 et la deuxième de 1981 à 2005. Ces résultats sont enrichis par une deuxième expertise consistant à identifier les évolutions de certains risques depuis les années 1990 ; cette année est effectivement reconnue comme étant le début d'une période où le réchauffement s'est accéléré plus significativement.

Enfin, on utilise les données prédites par les modèles de Météo France entre 2071 et 2100 pour appréhender les ordres de grandeur de ces évolutions.

2.1 Simulation à partir des données météorologiques historiques (observées)

Réchauffement et anticipation de la date d'apparition des stades

En utilisant nos modèles d'apparition des stades sur l'ensemble des années et des stations, on retient que les dates de réalisation des stades épi à 1cm et de l'épiaison ont été avancées en moyenne d'une semaine. Les dates de récolte sont quant à elles plus précoces d'un peu moins de 10 jours. Ces simulations sont cohérentes avec les observations pluriannuelles des stades.

Ces valeurs moyennes sont à moduler en fonction des types variétaux : pour les variétés très hiver et sensibles à la durée du jour, l'avance s'avère un peu plus faible et au contraire plus forte sur les variétés plus alternatives. Ces chiffres moyens masquent aussi une forte variation interannuelle, l'année 2007 étant avec 1995 la plus précoce au stade épi à 1cm avec une avance moyenne de l'ordre de 20 jours.

Evolution climatique et production

L'étude a porté d'une part sur l'élaboration du nombre de grains/m^2 fortement conditionnée par l'alimentation hydrique jusqu'au stade floraison et d'autre part sur le poids des grains très sensible au régime des températures et à la sécheresse.

Pour le nombre de grains, nous avons quantifié les réductions de biomasse produite à la floraison en fonction du déficit hydrique entre le stade épi à 1cm et la floraison, pour différents types de sol.

Pour le poids des grains, nous avons pris en compte l'action des fortes températures et de la sécheresse au cours du remplissage, entre l'épiaison et la maturité physiologique.

Avec cette approche, on prend donc en compte les effets indirects dus à l'évolution de la date d'apparition des stades de développement.

L'étude présentée ici a été effectuée en utilisant des variétés précoces (de type Soissons ou Trémie), semées à leur début de période conseillée de semis par région. Ce choix de précocité tend à minimiser les risques sur la production, relativement à des variétés plus tardives pour lesquelles les risques de sécheresse et d'échaudage thermique ont toutes chances d'être plus élevés.

Pour exprimer et caractériser l'évolution des risques d'un événement climatique, on établit des analyses fréquentielles de son apparition. Pour cela :

1. le risque est calculé sur chacune des années constituant la série ; on obtient donc par série, autant de résultats de valeurs de risque que d'années analysées ;
2. on ordonne ensuite par série, les années selon l'ordre croissant du niveau de risque ;
3. et enfin, à partir des relations ainsi établies (figures 2a, b, c et 3a, b, c), il est possible d'accéder aux éléments qui caractérisent la fréquence d'apparition du risque.

La flèche verticale située au milieu correspond à la médiane : c'est en théorie la valeur la plus probable dans le sens où l'on a autant de chances d'observer une valeur inférieure ou supérieure ; la flèche verticale sur la partie droite du graphique identifie le niveau de risque en année défavorable, caractérisée par une fréquence d'apparition plus faible (2 années sur 10).

Sécheresse de montaison et productions de grains (figures 2a, 2b, et 2c)

Concernant, la production de grains et la sécheresse en cours de montaison, on constate des évolutions largement fonction du contexte géographique. A proximité des bordures maritimes des régions du nord de la France (Normandie, Bretagne, Picardie etc…), il n'y a pas eu d'évolution significative : le risque et l'intensité des sécheresses entre le stade épi à 1cm et la floraison y sont toujours faibles, avec des pertes nulles en année favorable et normale et, comprise entre 5 et 10 % en année sèche.

Pour l'ensemble des régions du Centre et en périphérie (Région Centre, Bourgogne, Champagne, Ile de France, Pays de Loire…), le risque de sécheresse en cours de montaison s'est accru de manière significative depuis 25 ans : si en année normale, l'augmentation reste assez marginale, elle s'intensifie très nettement en profils d'années plus « sèches », avec des écarts de l'ordre de 15% pour des sols profonds à bonne réserve utile (130-140 mm). Pour des sols plus superficiels, les pénalités sont encore plus nettes, ce qui signifie que pour les petites terres des régions concernées (argilo calcaire de la Bourgogne, du Barrois, du Berry…), la perte de grains/m2 due à une sécheresse de montaison pourrait devenir une préoccupation pour des surfaces plus grandes.

Dans les régions plus au sud, et notamment les régions méditerranéennes, on observe, y compris en sols profonds, un accroissement plus généralisé du risque de sécheresse pendant la montaison. En année favorable, on peut désormais considérer qu'il y a risque de sécheresse ; en année normale, le risque déjà élevé entre 1955 et 1980 s'est intensifié (entre 5 et 10 %) pour atteindre un niveau de 20 % en années « sèches ». Ainsi en année défavorable, la perte de croissance imputable au manque d'eau se situe à hauteur de 25 %. Dans les sols à plus faible réserve, ces pénalités en années difficiles avoisinent 50 %, soit une production de grains réduite de moitié avec un tel scénario.

Echaudage thermique, sécheresse au cours du remplissage et poids des grains (figures 3, 3a, 3b et 3c).

Il est intéressant de mentionner que les pertes de poids de 1000 grains peuvent être importantes, y compris en sol profond, compte tenu du seul effet négatif des fortes températures, même en l'absence de sécheresse. Ce risque intéresse donc des surfaces plus importantes. Rappelons certaines récoltes récentes, en particulier en 2005 et 2006 caractérisées par des séquences exceptionnelles de très fortes températures et sans déficit hydrique : les pertes de rendement consécutives à ces fortes chaleurs dans les régions à fort potentiel du nord (limons très profonds du plateau du Neubourg dans l'Eure par exemple) ont atteint 30 q/ha sur les variétés tardives.

Figure 2a : Pour les bordures maritimes du nord de la France

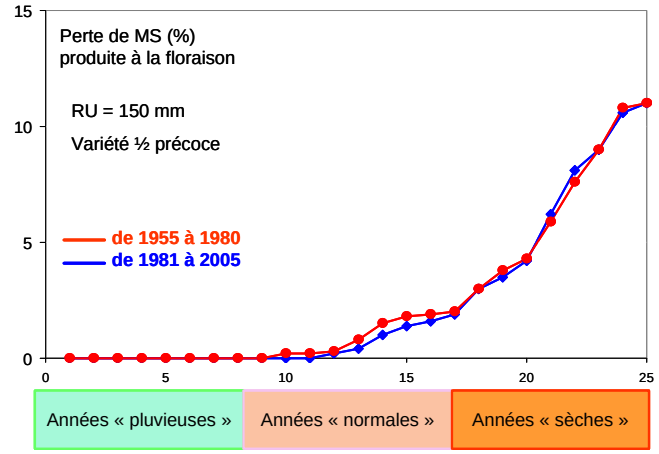


Figure 2b : Pour les régions du centre, centre-est et centre-ouest…

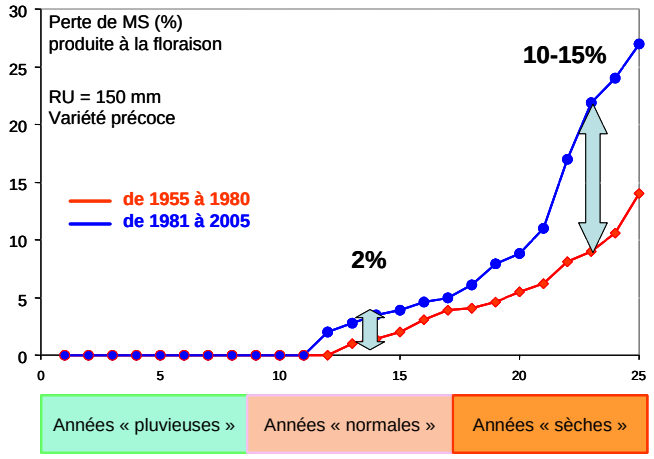
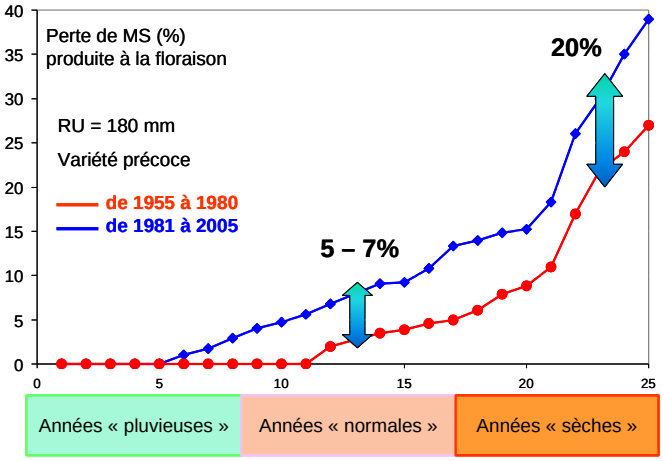


Figure 2c : Pour les régions méditerranéennes…



L'évolution du risque d'échaudage thermique

Comme en témoigne la figure 3, le risque d'échaudage, mesurée ici par le nombre de jours où la température maximale excède 25°C entre l'épiaison et la maturité physiologique a augmenté significativement depuis 25 ans malgré une avancée réelle de la date d'épiaison.

Toutefois, à l'instar des risques de sécheresse en cours de montaison, cette évolution met en évidence des comportements différents selon les contextes géographiques.

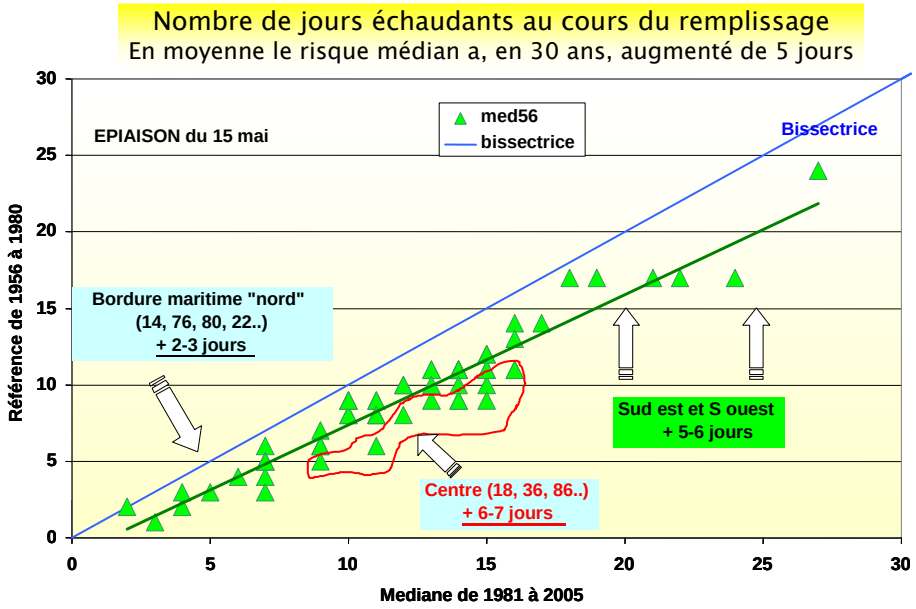


Figure 3 : Evolution comparée du nombre médian de jours échaudants (Tmax > 25°C) au cours du remplissage des grains : médianes de 1955-80 comparées aux médianes de 1981-2005, pour une épiaison du 15 mai.

Là où les risques étaient les plus bas entre 1955 et 1980, l'évolution est restée la plus faible : ainsi dans les bordures maritimes du nord, le risque initial moyen compris entre 2 et 5 jours selon les stations météorologiques est passé à une fourchette comprise entre 2 et 7 jours.

C'est dans les régions du Centre et de sa périphérie décrite plus haut que l'augmentation s'est avérée la plus nette. Selon les stations, le nombre de jours échaudants est effectivement passé d'un intervalle initial de 5 à 11 à un intervalle de 8 à 11 jours.

Dans les zones déjà caractérisées par un risque élevé, l'évolution a été encore plus marquée. Dans le Sud Ouest, en région Rhône-Alpes, le risque est passé de 15-17 à 20-23 jours ; en région PACA, le risque moyen de 20-23 jours est dorénavant de 24-27 jours.

Quantification de la sécheresse et des fortes températures sur le poids de grains.

Les figures 3a, 3b et 3c illustrent l'évolution des pertes de poids de 1000 grains résultant des effets combinés de la sécheresse et des fortes températures par rapport au poids de 1000 grains potentiel, c'est à dire en l'absence de contrainte climatiques (température, eau) et parasitaire.

Pour les mêmes régions situées proches des bordures maritimes, il n'y a pas eu d'évolution significative : le risque et l'intensité des sécheresses entre le stade épi à 1cm et la floraison y sont toujours faibles, et c'est toujours la campagne 1976 qui détient de loin le record de sécheresse (Figure 3a).

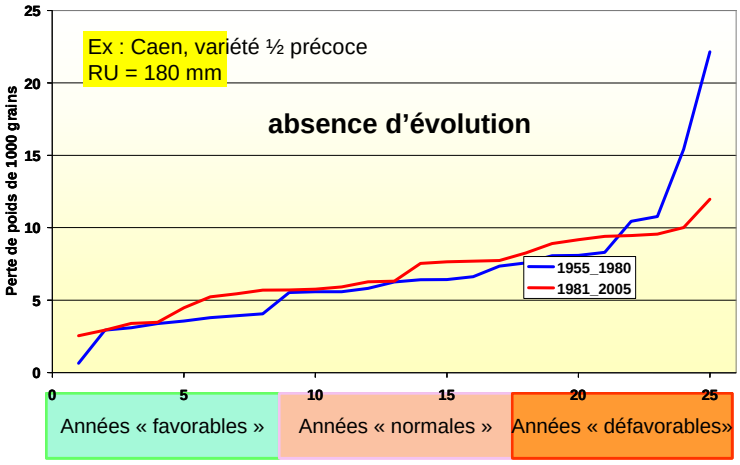


Figure 3a : Evolution comparée des pertes de poids de 1000 grains (en g) pour les régions des bordures maritimes du nord et du nord ouest de la France : série 1955-80 comparée à 1981-2005. Les régions proches (Bretagne, Picardie..) fournissent des profils similaires.

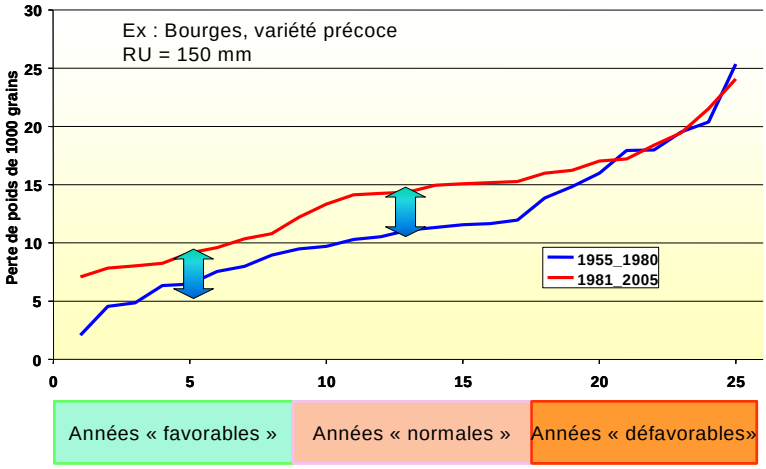


Figure 3b : Evolution comparée des pertes de poids de 1000 grains (en g) pour les régions du Centre (exemple de la station de Bourges) : série 1955-80 comparée à 1981-2005. Les régions périphériques, plus à l'est et à l'ouest fournissent des profils proches.

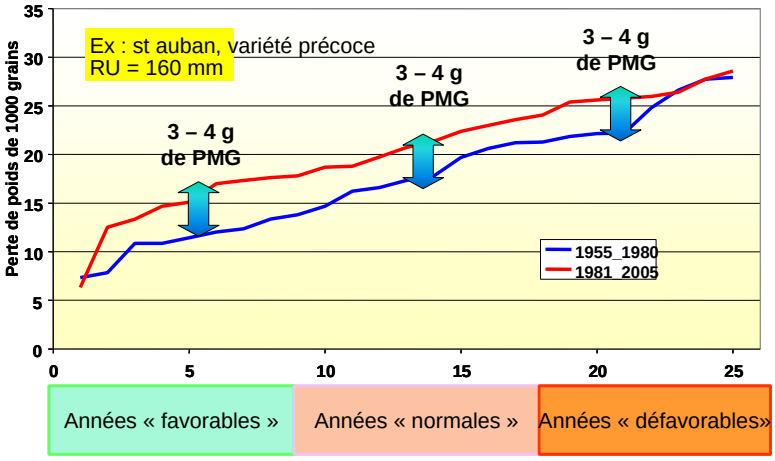
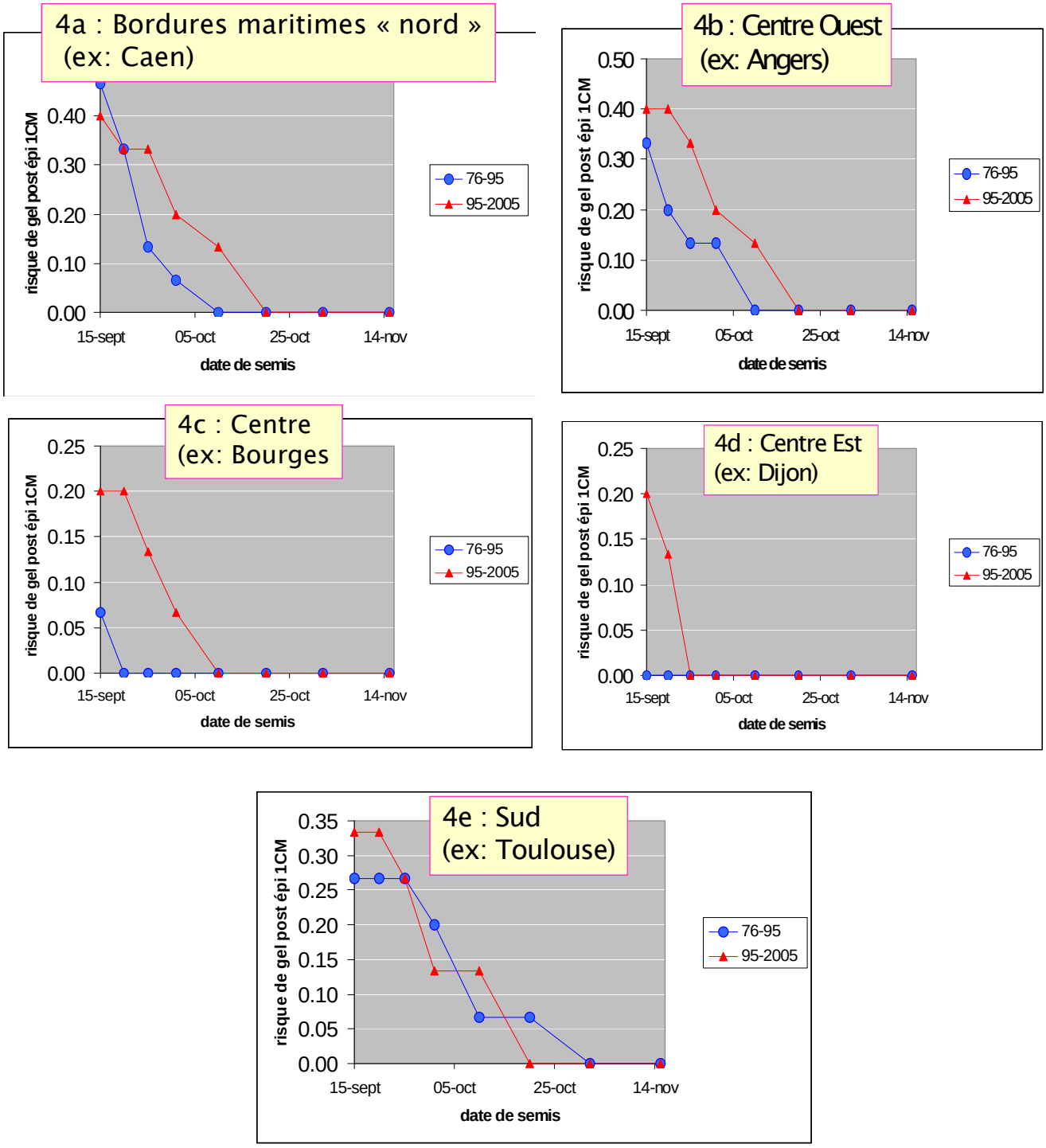


Figure 3c : Evolution comparée des pertes de poids de 1000 grains (en g) pour les régions méditerranéennes (exemple de la station de St Auban : série 1955-80 comparée à 1981-2005).

Figures 4 : Evolutions comparées du risque de gel d'épis : série 1976-95 comparée à 1996-2005. Le risque (exprimé en pourcentage) correspond à la fréquence d'obtenir un gel d'épis après le stade épi à 1 cm (occurrence d'avoir au moins 1 jour avec Tmin < - 5°C).



Pour les régions du Centre et de sa périphérie (Figure 3b), 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. Ces niveaux de pertes constituent des valeurs significatives puisque, 1 g de poids de 1000 grains correspond à environ 2 q/ha dans les régions du centre et à environ 1.5 q/ha dans les situations plus au sud.

Pour les régions plus au sud (Figure 3c), on constate une élévation des pénalités de 3 à 4 g quelle que soit le profil de l'année. Ces niveaux de pertes constituent des valeurs significatives puisque, 1 g de poids de 1000 grains correspond à environ 2 q/ha dans les régions du centre et à environ 1.5 q/ha dans les situations plus au sud.

Le risque de gel d'épis a-t-il évolué ?

Face à ces stress de fin de cycle de plus en plus marqués, la stratégie d'anticiper la date d'apparition de l'épiaison pourrait limiter leur impact. Mais semer plus tôt augmente de manière significative les risques de gel d'épis dans un certain nombre de régions.

La méthode que nous avons développée est basée sur des variétés précoces (Soissons ou Trémie). La date d'apparition des stades et la présence de températures préjudiciables (Tmin< -4°C) pendant la phase sensible de la plante ont été déterminées chaque année pour une large gamme de dates de semis. On a ainsi comparé pour un grand nombre de stations météorologiques, l'évolution de ce risque en séparant la base de données en 2 jeux de taille égale : de 1976 à 1995 comparée à 1996-2005.

Dans les régions du nord de la France marquées par l'influence maritime (Normandie, Pays de Loire…), le risque initial déjà élevé s'est accru car l'avancée des stades a été sensible (figures 4a et 4b). Plus au Sud, les stades déjà plus précoces font que le risque élevé se maintient, sans évolution (figure 4e). Plus au Centre, les stades étant plus tardifs, le risque initial plus faible reste plus modéré (figure 4c). Plus à l'Est, cette tendance à la tardiveté s'accroît si bien que le risque quasi nul sur la première période reste marginal sur la seconde (Figure 4d).

Estimation sur la base des données météorologiques futures (simulées)

Cette analyse a porté sur les données simulées par Météo France actuellement disponibles pour la période 2070 et 2100. Nous nous sommes intéressés en priorité à la date d'apparition des stades et à la phase de remplissage des grains.

En dépit des avancées très importantes des stades (en moyenne 10-15 jours), et du caractère « optimiste » du scénario choisi (variété précoce semée début octobre), les pertes de poids de grains imputables à la sécheresse et aux fortes températures augmenteraient de manière significative dans la plupart des régions. A l'échelle de la France, les suppléments de pertes moyennes de poids de grains seraient de l'ordre de 3 g : plutôt 4-5 g dans les régions du Sud Ouest, en Rhône Alpes, Auvergne ; de l'ordre de 3 à 4 g dans les zones du Centre et du Centre Est, 3 g en Pays de Loire, Poitou Charente. Les régions du nord du Bassin Parisien seraient les plus épargnées (entre 1 et 2 g) avec les bordures maritimes de l'ouest qui ne manifesteraient pas d'évolution.

3 - OPTIMISER LE RYTHME DE DEVELOPPEMENT DE LA PLANTE DANS LE BUT DE LIMITER L'IMPACT CLIMATIQUE

Afin de limiter les incidences liées aux risques de sécheresse et de fortes températures, la notion de précocité devient un atout pour l'esquiver en partie.

L'intensité de la sécheresse pendant la montaison ou le remplissage ainsi que la fréquence des fortes températures en fin de cycle s'accroissent toujours en tendance avec un décalage tardif du cycle. Ceci est particulièrement vérifié en profil d'années difficiles comme récemment en 2005 et en

2006 où l'on observe systématiquement un nombre de jours échaudants durant le remplissage systématiquement beaucoup plus bas pour des épiaisons précoces. En tendance, ce nombre double ou triple entre des épiaisons de début mai et des épiaisons postérieures au 20 mai. On pourrait présenter le même type d'évolution vis-à-vis du risque de sécheresse. Ainsi, en année à fin de cycle difficile (montaison et ou remplissage), épier plus tôt est synonyme d'une meilleure stabilité du rendement. En 2006, on peut effectivement rappeler qu'une avance de 10 jours à l'épiaison (épier le 10 mai plutôt que le 20 mai) s'est traduite par un gain moyen de rendement de l'ordre de 10 q/ha. Par ailleurs, l'analyse des données de rendement à l'échelle de différentes régions montrent que les orges d'hiver (plus précoces de 10 jours environ à l'épiaison, avec une durée de remplissage également écourtée de 10 jours) produisent en années difficiles plus que les blés via l'évitement des stress. Que donnerait un blé qui aurait la phénologie de l'orge d'hiver ?

Mieux éviter les stress par l'esquive : optimisation du couple précocité de la variété et dates de semis par milieu

Pour les bordures du nord, il est tout à fait possible de ne rien modifier puisque les risques climatiques de sécheresse et de fortes températures y sont les plus faibles et qu'*a priori* elles sont peu ou pas concernées par l'évolution climatique. Le choix de variétés tardives et productives n'est pas à remettre en cause.

Dans les autres régions, la recherche d'une épiaison précoce doit tenir compte de l'augmentation du risque de gels d'épis.

Dans ces régions, y compris celles du nord de la France en situation de sols profonds, il apparaît aujourd'hui judicieux de réduire les surfaces des variétés tardives en faveur de variétés plus précoces.

Mais renforcer la part des variétés précoces ne doit pas aller de pair avec des semis trop précoces : l'attitude est plutôt de semer des variétés précoces aux dates déjà pratiquées sur des variétés plus tardives, en acceptant donc pour la plupart des régions un risque de gel d'épis supérieur. Les effets du gel d'épis sont de toute façon plus aléatoires, partiels et compensables au moins en partie par le poids des grains.

Effectivement, le recours à des semis ultra précoces se traduirait par une augmentation plus significative des gels d'épis ainsi que par une élévation plus significative d'autres risques indirects susceptibles d'affecter le coût de production : en particulier des problèmes d'ordre sanitaire comme les pucerons à l'automne (viroses), une infestation plus grande de mauvaises herbes, une augmentation de la quantité d'inoculum « à la sortie de l'hiver » de certaines maladies cryptogamiques (Septoriose et Piétin Verse), et enfin du risque de verse physiologique.

Réussir la fécondation

Avec l'anticipation des stades, les céréales ne doivent pas être à la merci de températures basses, potentiellement préjudiciables, survenant au moment des deux étapes physiologiques clés du cycle de production : la méiose puis la fécondation. La formation des futurs grains de pollen ainsi que la fécondation sont effectivement des périodes de courte durée (en moyenne 48 heures) mais sont uniques dans la vie de la plante.

L'évolution d'un tel risque dans le futur est difficilement quantifiable. En effet, si les modèles de prévision du climat permettent de simuler les tendances en termes d'évolution, ils s'avèrent encore peu aptes à fournir des informations réalistes quant aux variations journalières des températures minimales.

Rééquilibrer le choix des espèces dans les bassins exposés à des fins de cycles difficiles

Dans les situations les plus exposées à des stress sévères de fin de cycle, on peut également suggérer un rééquilibrage entre les différentes espèces de céréales : par exemple, introduire plus d'orges d'hiver.

Une autre piste à envisager et déjà testée dans quelques régions est de semer les orges de printemps à l'automne ou en début d'hiver. La production de cette espèce a effectivement été

lourdement pénalisée en présence de contraintes climatiques printanières et de début d'été. On peut considérer que les deux freins principaux à cette pratique sont l'augmentation des risques liés au gel hivernal ainsi que ceux liés aux maladies. Pour le premier, on doit rappeler que la sensibilité des orges de printemps au gel est proche de celle du blé dur. On peut donc mettre en œuvre cette technique dans les bassins où le blé dur est déjà semé à l'automne, avec un niveau de risque à peine supérieur. Concernant le deuxième risque, il s'agit avant tout aujourd'hui d'une plus forte sensibilité générale de l'espèce de printemps à certaines maladies fongiques. Un travail de sélection doit être fait en ce sens. Un autre point positif de l'orge de printemps en semis avancé est l'obtention d'une meilleure stabilité de la teneur en protéine.

4 - LES AXES DE RECHERCHE

Sélectionner des variétés dont le rythme de développement est mieux adapté aux risques climatiques de demain

Le profil de rythme de développement le mieux adapté à ces nouveaux risques est une variété suffisamment précoce à l'épiaison, et pas trop précoce au stade épi à 1cm, notamment quand l'automne et l'hiver sont chauds. Actuellement, ce type de variété est assez rare car ces deux types de précocité sont le plus souvent associés dans les cultivars actuels. Il est néanmoins possible de casser cette liaison en sélectionnant par les méthodes classiques des variétés ayant cette configuration : variété à forte précocité intrinsèque mais sensibles à la durée du jour. Cette dernière faculté se traduit effectivement par une plus grande stabilité des dates d'apparition des stades, dont le stade épi à 1cm, y compris en régime de températures très contrastées. Le recours à des variétés exigeantes en vernalisation (soit un nombre de jours vernalisants plus élevé) plutôt qu'en durée du jour semble être une piste moins fiable ; effectivement si la température est élevée pendant la première étape du cycle (ce qui est prévu), la plante va produire un nombre supplémentaire de feuilles, ce qui aura comme incidence de retarder l'épiaison.

Toutefois, cette voie d'amélioration risque de ne pas être suffisante : en sélectionnant sur ces caractères, et en considérant qu'en cours de montaison les températures et les déficits hydriques seront plus élevés, on a effectivement toutes chances d'obtenir des variétés dont la production de biomasse sera plus limitée. On a donc tout intérêt à sélectionner des variétés qui exigent moins de biomasse pour maximiser le nombre de grains. Cette assertion impose en complément de sélectionner des lignées dont les épis sont à forte fertilité. Des études récentes ont mis en évidence que le nombre de grains par épi dépend beaucoup plus du nombre de fleurs initiées par épillet que de leur croissance. Autrement dit, là aussi, ce caractère met en jeu des gènes de développement dont certains ont déjà été localisés.

On peut par ailleurs mentionner que certaines variétés commerciales ont déjà ce type de profil. Par exemple, la variété Trémie, précoce à l'épiaison, produit relativement peu de biomasse à la floraison (souvent 9-10 tonnes/ha sans contrainte, contre 12-13, pour des variétés plus conventionnelles) ; en revanche sa très forte fertilité, issue d'un nombre de fleurs par épillet élevé, lui permet de faire au moins jeu égal en termes de rendement avec les autres variétés.

Mieux éviter les stress par des variétés plus tolérantes

En complément de l'esquive, l'utilisation de variétés plus tolérantes au manque d'eau et à la canicule est à développer.

Tolérance au stress hydrique : quel enjeu variétal espérer ?

Des expérimentations menées sous les serres mobiles de la station du Magneraud, avec différentes réductions d'alimentation en eau, apportent des conclusions intéressantes, permettant de situer qualitativement et quantitativement l'enjeu variétal, sur la base de variétés déjà anciennes (Thésée, Festival, Promentin et Beauchamp). Entre la variété la plus sensible (Festival) et la

plus tolérante (Thésée) et par ailleurs de même précocité, on constate des écarts de rendement de l'ordre de 5 à 8 % soit environ 4q/ha dès lors que la consommation d'eau devient significativement limitée. Si les consommations d'eau varient fortement selon les régimes hydriques (entre 360 mm et 240 mm), on constate que par modalité, la consommation reste quasiment identique entre les 4 variétés : ce constat signifie que le comportement distinct des variétés résulte d'une efficience différente de l'utilisation de l'eau, la variété la plus efficiente restant la plus productive (Figure 5). La connaissance de cette efficience (quintal produit par mm d'eau consommé) est par ailleurs une valeur que l'on peut approcher en dosant le carbone photosynthétique des isotopes naturels des grains à la récolte.

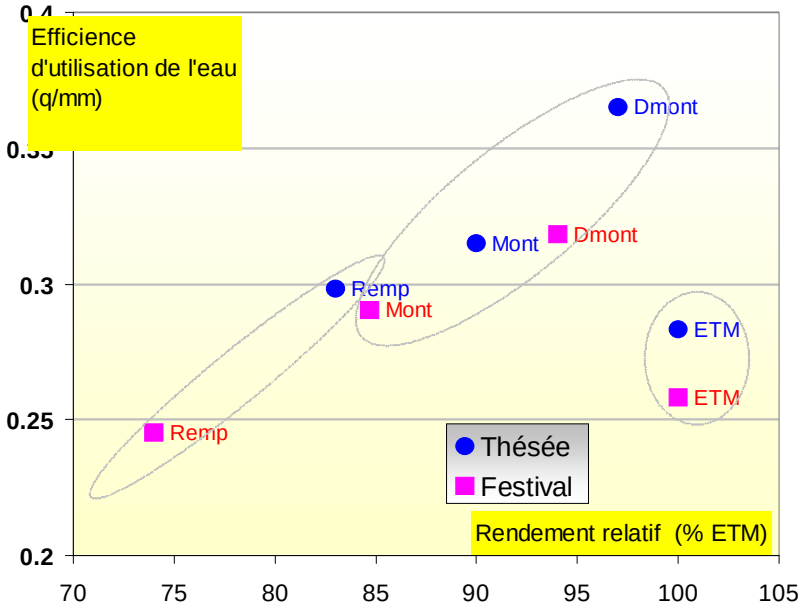


Figure 5 : Relation entre l'efficience d'utilisation de l'eau (quintaux/mm d'eau consommée) et le rendement. Ce dernier est exprimé en valeur relative sur la base du rendement obtenu sans restriction hydrique (conduite à l'ETM). Remp = sécheresse au cours du remplissage ; Mont = déficit de fin montaison ; Dmont = déficit de début montaison ; 2 variétés Thésée et Festival de même précocité.

La synthèse de l'ensemble des expérimentations ARVALIS mettant en jeu plusieurs variétés sur une plus large gamme de déficit hydrique complète ces résultats : il apparaît notamment que l'enjeu variétal s'amenuise au fur et à mesure que la sécheresse s'intensifie (Figure 6).

L'intensité de la sécheresse du lieu est ici exprimée par l'écart de rendement moyen entre le régime naturel (ou non irrigué NI) et le régime avec irrigation (I) de l'ensemble des variétés. Par essai, l'enjeu lié à la tolérance variétal est mesuré par la différence de rendement entre la variété la plus tolérante et la sensible, en régime naturel. L'enjeu variétal diminue en fonction de l'intensité de la sécheresse. Ainsi, dans les situations exposées aux déficits les plus sévères, (écart de 70 %), l'enjeu semble plafonner à 2 q/ha alors qu'il peut être bien supérieur (10 q) en présence de déficits plus modérés. Cette tendance est à vérifier avec des variétés plus récentes, ou mieux avec des lignées en cours de sélection.

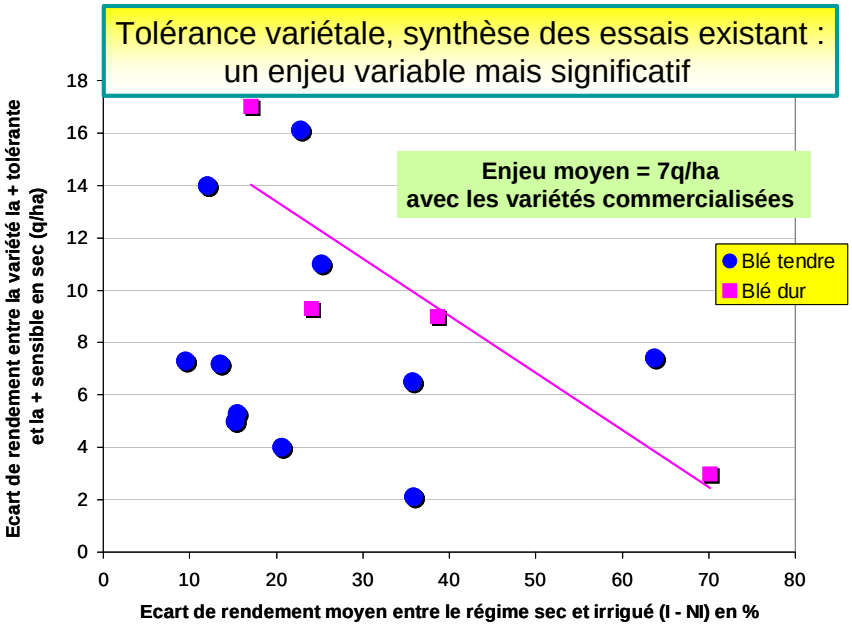


Figure 6 : Quantification de l'enjeu variétal et de son domaine de variation vis-à-vis de la tolérance à la sécheresse. Références acquises avec des variétés commerciales.

Poids de grains et tolérance à la canicule : un champ à investiguer en priorité

En présence de déficit hydrique, la contrainte liée aux fortes températures est le plus souvent associée. En 2002, 2005 et 2006, on a pu malgré tout observer des pertes de poids de grains très significatives en l'absence de déficit hydrique marqué, notamment en sols profonds. La recherche de variétés tolérantes aux fortes températures devient donc une priorité car l'échaudage thermique risque de concerner des zones de production de plus en plus étendues.

Actuellement, peu de travaux ont été effectués sur le sujet, ces derniers se concentrant en priorité sur la sécheresse.

Des recherches récentes sont actuellement menées par l'INRA de Clermont Ferrand sur ce sujet. Les tout premiers résultats semblent révéler que des différences de comportements variétaux vis-à-vis de la canicule existent réellement. Ces différences semblent mettre en jeu certains mécanismes liés à la phase précoce du développent des grains, concernant la mise en place du nombre et de la taille des cellules.

La carence indirecte en azote : liée à la pluie

Indirectement, un autre caractère à travailler est la tolérance à la carence temporaire en azote. En effet, pour certaines régions, on constate une évolution du déficit pluviométrique en cours de montaison. Ce point peut se traduire par une mauvaise valorisation des apports d'engrais azotés ; le retard d'absorption est effectivement susceptible d'engendrer une carence en azote s'il se maintient trop longtemps. Par ailleurs, un déficit hydrique en cours de montaison peut aussi induire directement une carence en azote car le moteur du transit des nitrates entre le sol et la plante est le flux d'eau lié à la transpiration.

Notons que si la sélection s'oriente vers des variétés associant de plus faibles biomasses végétatives à la floraison, avec une amélioration conjointe de la fertilité des épis et du poids des grains, les résultats attendus sont des variétés sobres et efficientes vis à vis de l'utilisation de l'azote.

Des variétés plus tolérantes pour assurer la fécondation

Comme nous l'avons souligné, avec une anticipation importante des stades, on ne peut rejeter l'hypothèse d'une augmentation des risques de froid au moment de la méiose et de la fécondation, au moins dans certains types de milieux continentaux. Ce point met l'accent sur l'intérêt de caractériser l'aptitude des variétés à franchir ces étapes cruciales sous une large gamme de conditions environnementales (basses températures et faibles rayonnements). On a effectivement observé par le passé, que cette sensibilité au froid met en jeu un aspect variétal très significatif.

Intérêts et limites de l'étude

Cette première étude a permis de dégager les principales évolutions du climat et son impact prévisible sur le développement et la croissance des céréales.

Face à des évolutions différenciées selon les contextes géographiques, les réflexions et les solutions que nous proposons ne sont donc pas identiques selon les bassins de production.

Les limites de l'étude résident dans le fait qu'elle n'intègre pas les préjudices liés aux modifications du parasitisme : en particulier les attaques liés aux ravageurs (et tout particulièrement aux viroses) et liés aux maladies cryptogamiques. La suite de ce travail est donc logiquement d'intégrer dans la stratégie d'évitement des risques que nous avons abordée, l'impact de ces risques parasitaires.

Une autre limite de l'étude est la non prise en compte des effets possibles de compensation de l'élévation de la teneur en CO_2. Cette élévation devrait réduire la sensibilité aux fortes températures ainsi que la consommation d'eau. Mais les références concernant les interactions entre ces facteurs apportent peu d'informations sur les étapes mises en cause. Par ailleurs les fortes températures ont une action sur la fermeture des stomates, l'augmentation de la respiration nocturne, l'inhibition de l'amylase-synthase… On peut donc suggérer que le CO_2 n'aura qu'un rôle compensateur marginal en fonction du caractère plus ou moins extrême des stress. Par ailleurs, nos calculs sont faits en considérant une absence de progrès génétique, alors que des avancées génétiques sont déjà en marche.