

02

## Maïs grain

# Une progression de soutenue par le pro

**Alors que les rendements de nombreuses cultures progressent moins vite, voire stagnent, le phénomène est moins sensible en maïs grain. Quelles en sont les causes et comment compenser des contraintes de production de plus en plus fortes ?**

**C**ertes le rendement n'est pas le seul indicateur de compétitivité d'une culture ou d'un système de production à l'échelle de l'exploitation agricole. Les contextes économique et réglementaire font que l'optimum agronomique n'est pas forcément le plus pertinent, car le coût marginal des derniers quintaux accessibles est plus ou moins efficient. Mais le rendement est une des composantes de la compétitivité, de la collecte et des équilibres de marchés.

La progression moyenne annuelle des rendements historiques (données Agreste) sur la période 1951 à 2007 est

Josiane Lorgeou (1)  
j.lorgeou@arvalisinstitutduvegetal.fr

François Piraux (1)

Françoise Ruget (2)

Bernard Lacroix (1)

Jean-Paul Renoux (1)

Alain Charcosset (2)

(1) ARVALIS – Institut du végétal  
(2) INRA

estimée en maïs grain à 1,38 q/ha/an en France (figure 1), ce qui équivaut à une augmentation moyenne de la collecte annuelle de 220 000 tonnes de maïs grain. L'analyse plus fine sur trois périodes définies *a priori* permet d'apprécier l'ampleur de l'éventuel ralentissement de cette tendance survenu ces dernières années.

▶ Les rendements de maïs grain progressent en moyenne de 1,38 q/ha/an depuis 1951, avec des progressions plus faibles entre 1972 et 1980, et depuis le début des années 2000.

Les estimations sont de :

- 1,36 q/ha/an sur la période 1951 à 1977, période qui correspond à une augmentation progressive des surfaces qui ont été multipliées par cinq durant la phase d'expansion du maïs grain en France,
- 1,35 q/ha/an sur la période 1977 à 1990,
- 1,17 q/ha/an sur la période 1990 à 2007. Cette période



© N. Comtec

historique a été retenue car les experts situent la réalité du réchauffement climatique à partir du début des années 1990.

La pente des 18 dernières années est légèrement inférieure aux précédentes. Elle est marquée par des fortes irrégularités interannuelles, avec plusieurs années de sécheresse telles que 1990, 2003, 2005 et 2006 (figure 2). L'analyse des pentes de pro-

gression des rendements sur des séquences glissantes de 15 ans, montre aussi un effet du même ordre au cours des années 1972 à 1980, caractérisées par des années froides ou sèches.

## Tendances en régions et similitudes dans les pays voisins

L'analyse à l'échelle des régions et des départements permet d'explorer les tendances

# s rendements grès génétique

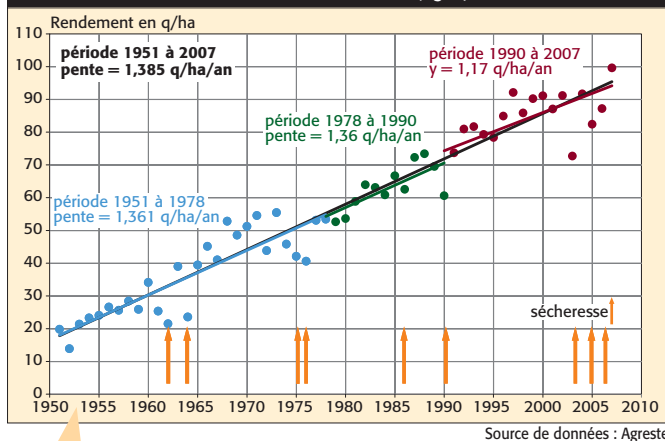
qui convergent et se compen-  
sent dans la tendance nation-  
nale. Les progressions histo-  
riques, bien que moins fortes,  
se maintiennent en Bretagne,  
Pays de la Loire, Picardie,  
Ardennes et Champagne.  
Elles sont en moyenne élevées  
en Poitou-Charentes, Centre,  
Alsace et Rhône-Alpes (elles  
peuvent atteindre 1,6 q/ha/an);  
toutefois un ralentissement est  
perceptible depuis les années  
2000 dans les Charentes et en  
Alsace. Des stagnations de ren-  
dements sont mises en évide-  
nce depuis les années 1996-1998  
dans le Sud-Ouest en dépit de  
progressions historiques éle-  
vées (1,34 q/ha/an en Aquitaine  
et 1,48 en Midi-Pyrénées).

Les rendements ont  
tendance à stagner dans  
le Sud-Ouest depuis 1996.

Les mêmes tendances sont  
observées dans plusieurs pays  
(figure 3). La progression  
des rendements s'est accélé-  
rée dans les années 1990 en  
Belgique, avec des valeurs  
qui dépassent actuellement  
de plus de 10 q/ha celles de  
la France. C'est aussi en  
Autriche que les rendements  
sont les plus élevés d'Europe  
avec une progression compa-  
rable à la France. Les courbes  
des moyennes de rendements  
sont quasi superposables ces  
dernières années entre l'Al-  
lemagne et la France. Les ni-  
veaux de rendements en Italie  
(maïs localisés surtout dans la  
plaine du Pô), moins soumis  
aux effets annuels du fait de  
l'irrigation, plafonnent depuis  
1997. En Espagne, après une  
accélération forte enregistrée  
entre 1993 et 1998, l'augmen-  
tation annuelle a tendance à  
ralentir. La variabilité interan-  
nuelle y est, comme en Italie,  
moindre que dans les autres  
pays du fait de l'importance  
des surfaces irriguées. Quant  
aux gros pays producteurs de  
l'Europe de l'Est, les fortes  
irrégularités de rendements  
depuis la fin des années 1980,  
dont les valeurs moyennes sta-

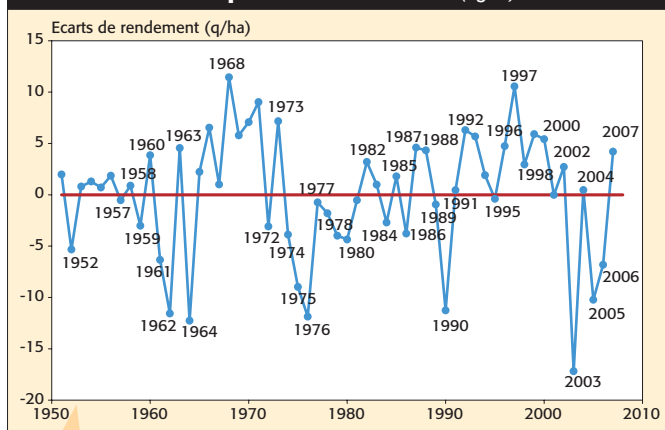


Évolution du rendement national du maïs grain en France  
entre 1951 et 2007 (fig. 1)



Après avoir testé différentes courbes d'ajustement, l'hypothèse  
d'un modèle d'évolution des rendements linéaire peut être  
retenue avec une pente de 1,38 q/ha/an.

Écarts de rendement avec la tendance historique calculée  
sur la période 1951 à 2007 (fig. 2)

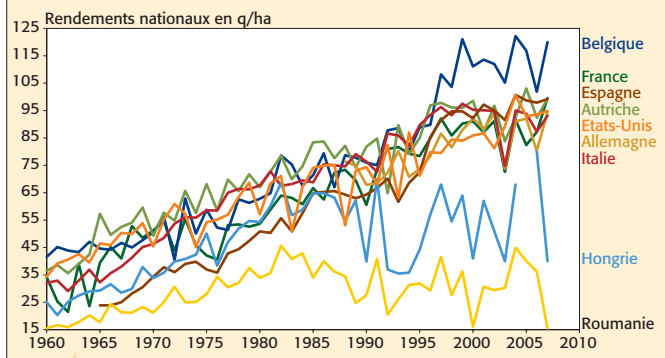


Compte tenu de la variabilité des rendements entre les années,  
les rendements nationaux de la période 1990-2007 s'inscrivent,  
du point de vue statistique, dans la pente historique, avec des  
effets annuels aléatoires marqués par des écarts importants avec la  
tendance moyenne.

▲ L'augmentation du rendement  
national en maïs grain est restée  
élevée malgré les sécheresses,  
les restrictions d'irrigation et le  
parasitisme.



**Évolution des rendements du maïs grain dans différents pays (fig. 3)**



Sources des données : Agreste, Eurostat, USDA

Les rendements suivent globalement les mêmes tendances en Europe de l'Ouest. Toutefois, les tendances à la stagnation des dernières années sont plus marquées en Italie, alors que la progression reste plus soutenue dans les régions plus tempérées.

gnent, peuvent être attribuées aux effets climatiques très marquants des climats continentaux, amplifiés par une période de baisse des moyens de production au moment de la transition économique. Enfin, aux États-Unis, le premier producteur mondial de maïs grain en dépit d'effets annuels du même ordre que ceux rencontrés en France, l'augmentation des rendements reste très soutenue, avec une progression annuelle de 1,46 q/ha/an sur la période 1990-2007 et de 1,17 q/ha/an entre 1960 et 2007.

**Comment expliquer ces évolutions ?**

Les facteurs explicatifs de l'évolution des rendements peuvent être regroupés en trois types, avec des effets relatifs aux :

- milieux pédoclimatiques, qui se composent d'effets de climat et de changements climatiques, de sols, de pression parasitaire, etc.
- progrès génétiques apportés par les variétés qui se renouvellent,
- conduites de culture (irriga-

tion, dates et densités de semis, de gestion de la fertilisation et protection de la culture). Les rotations et les modes de travail du sol ont aussi un impact sur les rendements.

L'effet de ces facteurs au cours du temps est complexe à reconstituer, notamment faute de statistiques historiques détaillées sur les pratiques culturales. L'analyse des facteurs explicatifs des évolutions des rendements au cours des 20 dernières années est donc centrée sur les effets de climat, de progrès génétique et de son transfert, deux facteurs majeurs en maïs qui peuvent être quantifiés. Les effets de la date et de densité de semis, de l'irrigation et de la fertilisation sont analysés plus indirectement.

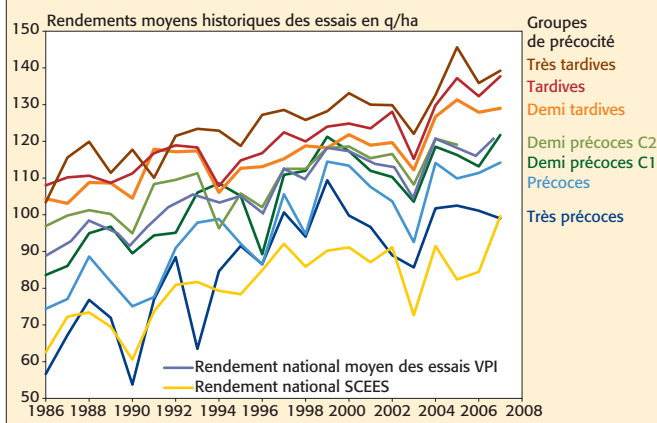
**Un progrès génétique dynamique et valorisé rapidement**

Des essais, conduits au milieu des années 1980, ont comparé des variétés de différentes générations (1950, 1960, 1970 et 1980) à plusieurs densités de culture dans différents potentiels de rende-



© N. Cornec

**Évolution des rendements moyens des essais Variétés du réseau de Post-Inscription (VPI) ARVALIS – Institut du végétal et SEPROMA par groupe de précocité sur la période 1986-2007 (fig. 4)**



Source : Agreste

Les augmentations observées intègrent les effets de progrès génétique, de climat et de conduite de culture. 75 % des lieux sont pérennes sur 3 à 15 ans, la part des essais irrigués est stable au cours du temps. Les courbes de la moyenne annuelle de rendement du réseau et du rendement national présentent des similitudes d'évolution avec un écart de l'ordre de 25 q/ha. La courbe du rendement moyen du réseau Post-Inscription correspond à la moyenne des différents groupes de précocité pondérée des estimations de surfaces de ces groupes.

▲ Actuellement, le progrès génétique apporte à lui seul 1,2 q/ha de rendement chaque année, soit 85 à 100 % de l'augmentation des rendements.

Les rendements moyens observés dans les essais variétés par groupe de précocité ont augmenté de 1 à 1,4 q/ha/an depuis 1986.

**Les maïsiculteurs renouvellent rapidement leurs variétés, accélérant l'expression du progrès génétique. ►**

ment. Ils avaient conclu à une amélioration significative de la tenue de tige, des gains de rendement de 0,8 q/ha/an (soit 1 %/ha/an pour des rendements moyens de 80 q/ha), des écarts de rendement entre les variétés modernes et les plus anciennes plus marqués dans les essais à potentiels moyens que dans les essais à rendements élevés, traduisant ainsi une meilleure rusticité aux facteurs limitants (Derieux et al., 1987).

© R. Légère, ARVALIS-Institut du végétal



► En 1989, un hybride était cultivé en moyenne pendant 5,7 ans après son inscription. Aujourd'hui, la durée de vie moyenne des innovations est de 4 ans, traduisant un renouvellement variétal sur le terrain plus rapide.

L'exploitation de la base de données des essais variétés de maïs en Post-Inscription (VPI) sur la période 1986-2007 (figure 4) conforte ces références. Les calculs des moyennes ajustées des variétés qui se sont succédé dans les différents groupes de précocité de maïs grain ont été effectués en neutralisant les effets années à l'aide d'un modèle statistique approprié (procédure linéaire mixte de SAS). La synthèse des estimations est présentée sur le tableau 1. Les gains de rendement apportés par le progrès génétique, au cours de 23 dernières années, sont compris entre 1 et 1,4 q/ha/an. La moyenne nationale pondérée de la part cultivée des différents groupes de précocité est évaluée à 1,2 %/ha/an. Ce qui correspond à 1,2 q/ha/an pour le rendement moyen actuel, soit presque l'équivalent de la progression du rendement moyen annuel des dernières

années. L'expérimentation en cours sur ce sujet, par l'ajout de variétés des années 1990 dans des essais variétés, a confirmé ces ordres de grandeur en 2008.

Ce progrès génétique élevé est aussi rapidement transféré. En effet, l'analyse des doses des semences de maïs certifiées produites en France (données du GNIS en grain et fourrage) montre qu'il est valorisé rapidement par les agriculteurs par une mise en marché très dynamique des obtenteurs. Le renouvellement des variétés s'est aussi accéléré au cours des 20 dernières années. Alors que l'âge moyen des hybrides était de 5,7 ans en 1989 et 4,4 ans en 1998, il est en 2007 de 4 ans, avec 70 % des variétés cultivées qui ont moins de 5,5 ans. Il est possible que ces statistiques minimisent la rapidité du transfert de l'innovation en maïs grain, car ces statistiques intègrent les variétés de maïs fourrage que les éleveurs ont tendance à renouveler moins rapidement que les producteurs de maïs grain. Cette accélération du transfert et les gains de rendement apportés par le progrès génétique équivalent à la progression annuelle du rendement national.

### La répartition des surfaces par région a évolué

L'évolution du rendement national n'est pas indépendante de celle des surfaces et des rendements des échelles géographiques plus petites qui y participent. Les surfaces du maïs grain des différentes régions ont évolué au cours du temps, car elles dépendent :

- du potentiel de rendement permis par les sols et le climat. Le développement de l'irrigation, notamment après les années de sécheresse, dans les sols superficiels, ainsi que les arbitrages d'accès à l'eau, ont des conséquences. Des recentrages vers des parcelles d'excellence sont constatés après des années climatiques difficiles,
- des innovations techniques,
- du contexte économique : prix et compétitivité comparative des cultures, par exemple,
- des besoins d'assurer des stocks fourragers dans les zones à utilisation mixte sous forme d'ensilage et de grain. Les transferts de surfaces récoltées entre le grain et l'ensilage peuvent être très significatifs selon les besoins. Comme la contribution des différents départements dans la sole nationale a évolué au cours du temps et que les potentiels de rendements y sont différents, l'hypothèse

de ces effets a été vérifiée sur la tendance nationale. En effet, les régions Aquitaine et Midi-Pyrénées représentaient chacune plus de 30 % de la surface nationale au début des années 1960. La progression des surfaces de la région Centre, qui a culminé à 18 % dans les années 1970, représente depuis 1995 près de 8 % de la sole nationale. Les proportions des régions Poitou-Charentes, Pays de la Loire, Bretagne et Rhône-Alpes qui avaient régulièrement progressé, se sont aussi stabilisées entre 7 et 12 % de la sole nationale. Celle d'Alsace a régulièrement augmenté, alors qu'en valeur relative, elle a diminué en Midi-Pyrénées. La sensibilité de la contribution des évolutions de surfaces et des augmentations de rendements départementaux a un effet estimé entre 1 et 4 q/ha sur les écarts de rendements annuels à la tendance nationale historique. C'est faible, en comparaison des effets climatiques annuels qui touchent souvent une grande partie des régions. La forte contribution de plusieurs régions où l'irrigation est développée tamponne aussi la variabilité. Enfin, les écarts de rendements entre régions ne sont pas d'une amplitude à modifier les tendances lourdes.



## Estimation du progrès génétique en rendement sur la période 1986 à 2007 à partir des essais Variétés de maïs en réseau de Post-Inscription (VPI) ARVALIS – Institut du végétal et SEPROMA (tab. 1)

Groupes de précocité	Progrès génétique en rendement en q/ha et par an dans les essais VPI	Moyenne de rendement des essais sur 22 ans	% du rendement moyen
Très précoces	1,43	86,0	1,66
Précoces	1,46	96,0	1,52
Demi-précoces C1	1,35	105,0	1,29
Demi-précoces C2	1,23	110,0	1,12
Demi-tardif	1,14	116,0	0,98
Tardif	1,31	120,0	1,09
Très tardif	1,36	124,0	1,10

En moyenne, le progrès génétique apporte un gain de rendement équivalent à 1,2 %/ha/an (soit 1,2 q/ha/an pour des rendements de 100 q/ha).



© N. Comec

## Des effets climatiques variables selon les régions

Les conditions climatiques ont évolué durant la période 1951-2007, notamment en matière de sommes de températures cumulées entre les dates de semis et de récolte (figure 5). Les augmentations de températures enregistrées sur les 50 dernières années entre le 26 avril et le 31 octobre sont en moyenne de 150 degrés-jours (+0,8 °C/jour), ce qui équivaut à un écart de deux groupes de précocité ou à huit points de teneur en eau du grain à la récolte. Concernant l'évolution de la pluviométrie estivale, l'analyse des données météorologiques historiques ne dégage pas de tendance nette (excepté une baisse sur le pourtour méditerranéen), mais elle fait apparaître des variations importantes entre années.

▶ L'évolution climatique de ces 25 dernières années a eu un effet négatif sur les rendements de maïs dans les régions Sud et positif dans les régions du Nord.

Les augmentations de températures ont pour conséquence d'accélérer le cycle des plantes, avec des dates de maturité plus précoces et des teneurs en eau du grain plus faibles à la récolte. Ce raccourcissement de la durée de croissance fait que les plantes interceptent durant moins de jours le rayonnement solaire, ce qui diminue la durée d'activité photosynthétique, et de ce fait l'accumulation de biomasse. En revanche, l'élévation de température améliore l'efficacité de la croissance lorsque les températures sont le facteur limitant. Ceci est

◀ Le recentrage des surfaces vers des zones d'excellence participe à l'augmentation des rendements.

positif sur le rendement en début de végétation et dans les régions septentrionales. L'avantage est faible dans les régions à disponibilités élevées en températures.

C'est parce que ces effets se cumulent et se compensent qu'il a été choisi de tenter de quantifier ces phénomènes en utilisant des modèles qui gèrent ces interactions. Des simulations sur 27 ans ont été réalisées avec STICS (simulateur de fonctionnement de culture de l'INRA réalisé en collaboration avec les instituts techniques). Après avoir défini les pratiques (dates de semis, choix de variétés), choisi des types de sol et leur état hydrique initiaux, retenu des paramètres standard de plante, les cohérences des simulations ont été expertisées. Les résultats obtenus pour différentes stations météorologiques montrent, tout facteur étant égal par ailleurs (se reporter au scénario de simulations), que les conditions climatiques de la période 1981-2006 ont eu, en tendance, un effet négatif sur les rendements dans le Sud de la France (figure 6), alors qu'au contraire elle semble favorable sur la productivité au nord de la Loire (figure 7). Les calculs réalisés en situations non irriguées font état d'une grande variabilité interannuelle avec mise en exergue des conséquences des sécheresses estivales de plusieurs années. Ces résultats dépendent cependant des choix des hypothèses de réserves en eau des sols.

Les tendances observées sont confirmées par l'analyse des effets années des essais du réseau d'évaluation des variétés, après élimination des effets du progrès génétique. Les zones d'expérimentation des variétés des groupes très précoce et précoce, globalement pas à peu irriguées, confirment une tendance à la hausse des potentiels de rendement entre 1986 et 2000, et des aléas les années suivantes.



Ce phénomène est aussi perceptible en zone des demi-précoces. Les effets annuels sont plus aléatoires dans les zones d'expérimentation des variétés plus tardives et tardives.

### Des stratégies d'adaptation à l'œuvre

L'intégration de l'effet du progrès génétique dans les simulations montre qu'il a plus que compensé les tendances négatives du climat sur les rendements (hors effet sécheresse).

**▶ Les tendances négatives du climat sur le rendement du maïs grain ont été compensées par le progrès génétique.**

Les disponibilités en températures plus élevées constatées sur les 20 dernières années ont été valorisées par les agriculteurs. Le choix de variétés plus tardives qui, par leurs cycles de croissance plus longs, présentent un potentiel de rendement plus élevé lorsque les sommes de températures et la pluviométrie ne sont pas limitantes, a contribué au maintien des rendements. Les estimations de gains potentiels, confirmées dans les essais variétés, sont comprises, en bonnes conditions de culture, entre 1 et 2,5 q/ha par tranche de 25 degrés-jours de tardiveté des variétés. L'avancement des dates de semis, plus précoces de 5 à 15 jours en moyenne au cours des 30 dernières années, a participé au phénomène de tardification, contribuant ainsi potentiellement au maintien des rendements. Toutefois, les risques de déficits hydriques et l'augmentation des coûts de séchage ont dans le même temps conduit, dans des situations de maïs en sec ou de limitations d'irrigation, à des stratégies inverses d'esquive en conservant le type de précocité des variétés, voire en cultivant des variétés plus précoces.

**L'écart de rendement entre une variété récente et une variété plus ancienne est plus élevé dans les parcelles à potentiel moyen que dans les zones à haut potentiel. ▶**

### Du côté des pratiques culturales

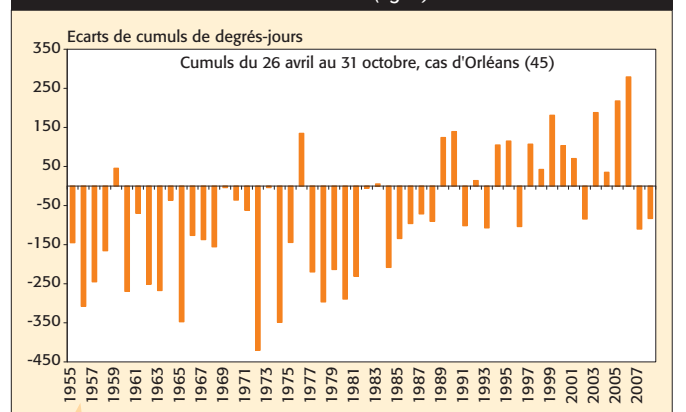
Le maintien actuel de la progression des rendements du maïs grain ne s'est pas réalisé par une intensification des pratiques culturales. Certes, l'augmentation des surfaces irriguées entre les années 1975 et 1995 a largement participé aux gains de productivité ainsi qu'à sa régularité. Les surfaces de maïs grain irriguées sont stables depuis 1998 (données Agreste). Elles représentent 45 % des surfaces de maïs grain et 25 % des surfaces grain et fourrage. De plus, l'irrigation fait l'objet d'un encadrement plus contraignant et d'une optimisation des pratiques. Des enquêtes réalisées par le SCEES en 2001, 2002 et 2003 auprès d'irrigants de plusieurs petites régions agricoles ont montré, que contrairement aux *a priori*, la majorité des maïsiculteurs ne couvrait pas tous les besoins en eau des cultures, et notamment en années de sécheresse. L'effet de la part de l'irrigation et des conséquences d'une gestion plus restrictive au cours de ces dernières années est difficile à quantifier dans une reconstitution de l'évolution des rendements au cours du temps à une échelle nationale. En effet, les apports d'eau varient selon les sols, les années, les volumes accessibles (reconstitution des réserves hivernales, équipement, arbitrages), les équipements et leurs débits par exemple.

Concernant la fertilisation, les enquêtes de l'ONIGC auprès de producteurs de maïs grain de plusieurs départements maïsicoles montrent une diminution significative des apports de phosphore et potassium, et une tendance à

© N. Comec



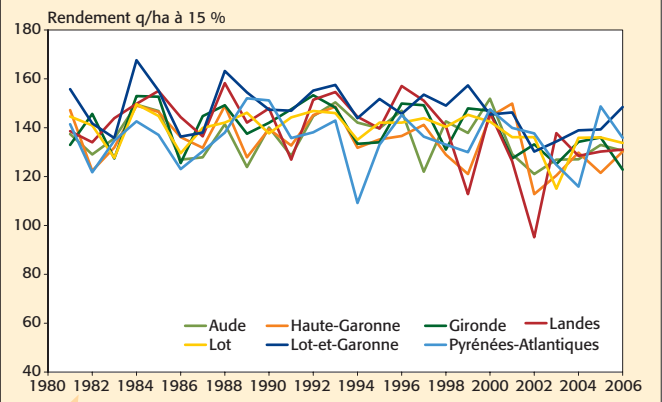
**Ecarts de cumul de degrés-jours par rapport à la médiane 1977-2006 (fig. 5)**



Données journalières Météo France

**L**e cumul des températures entre le semis et la récolte du maïs a augmenté de 150 °C/jour en 50 ans, ce qui équivaut à deux groupes de précocité.

**Simulations de l'effet climatique sur le rendement du maïs grain dans le Sud-Ouest, données simulées avec STICS par F. Ruget et al. (fig. 6)**

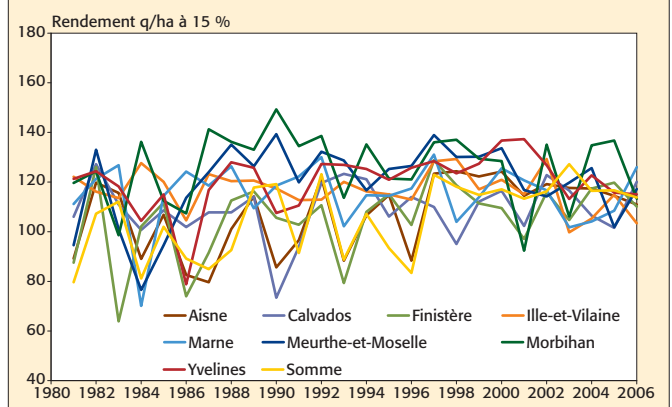


**D**es simulations neutralisant l'effet du progrès génétique permettent de mettre en évidence un effet dépressif du climat sur les niveaux de rendements dans le Sud.

la baisse des épandages d'azote au cours de la période 1994 – 2007. En admettant que les apports d'azote étaient confortables en 1994, l'augmentation parallèle des rendements conduit à penser que cette tendance à la baisse pourrait avoir des conséquences sur les teneurs en protéines et les rendements. Cependant, la contri-

bution de l'azote du sol, issu de la minéralisation estivale, et stimulée par l'augmentation de la température, est encore mal évaluée et pourrait expliquer le maintien des potentiels en fertilisation sub-limitante, particulièrement dans les sols profonds. Quant à la protection de la culture, le développement des ravageurs est devenu ces

**Simulations de l'effet climatique sur le rendement du maïs grain en Bretagne, dans le Nord, le Nord-Ouest et Nord-Est, données simulées avec STICS par F. Ruget et al. (fig. 7)**



Scénarios de simulation : RU (réserve utile du sol) de 208 mm, irrigation déclenchée pour satisfaire au minimum 80 % des besoins, apports en azote de 200 unités, semis du 15 avril, variétés avec des potentiels de rendement de la génération 2005-2010 cultivées à des densités optimales. Ces hypothèses assez contraignantes en irrigation et nutrition azotée ont tendance à minimiser les rendements en années très difficiles.

Source des données météorologiques : Météo France

Simulations réalisées dans le cadre d'une « étude sur la sensibilité des systèmes de grandes cultures et d'élevages herbivores aux changements climatiques » avec le soutien du COS ACTA.

**L**es conditions climatiques rencontrées au nord de la Loire depuis les années 1980 ont eu un effet positif sur l'évolution des rendements.



© N. Cornec

dernières années une préoccupation plus importante du fait des pertes de rendement qu'ils causent. L'insuffisance de protection est évaluée par les enquêtes et recoupements à environ 7 % du potentiel de production moyen.

### En guise de conclusion

La diminution de la pente de progression des rendements du maïs grain est actuellement moins sensible que pour d'autres espèces, en dépit d'une série d'années récentes sèches. Cette pente s'est maintenue depuis les années 1990 : - grâce à un progrès génétique constant, élevé et transféré rapidement. Avec un gain annuel moyen de 1,2 q/ha, il équivaut à celui du rendement national moyen des 20 dernières années. Il a permis jusqu'à maintenant de compenser d'autres effets,

◀ **Les sommes de températures plus élevées ont permis d'augmenter le potentiel dans les zones habituellement plus précoces où la température était un facteur limitant.**

- du fait de la réactivité des maïsiculteurs par le choix de variétés récentes et plus tardives, même si simultanément ont été développées - de façon plus minoritaire - dans les situations sous contraintes hydriques, des stratégies de culture de variétés plus précoces. L'adaptation s'est aussi matérialisée par des recentrages de surfaces de maïs dans les zones d'excellence et des semis toujours plus précoces, - en dépit d'une tendance des rendements potentiels en stagnation du fait des évolutions climatiques (tendance à la baisse dans le Sud compensée par une augmentation de potentiel dans les régions au nord de la Loire), en dépit de restrictions d'irrigation plus contraignantes ces dix dernières années et d'une protection de la culture contre les ravageurs de plus en plus limitante. ■

▶ La part des pratiques culturales dans l'évolution des rendements est moins forte que le climat à l'échelle nationale.