

Évaluation des impacts de la sécheresse sur le rendement des grandes cultures en France

Philippe Debaeke¹
Michel Bertrand²

¹ Institut national de la recherche agronomique (Inra),
UMR 1248 Agrosystèmes et Développement territorial,
INRA-ENSAT,
BP 52627,
F-31326 Castanet-Tolosan
<debaeke@toulouse.inra.fr>

² Institut national de la recherche agronomique (Inra),
UMR 211 Agronomie INRA-AgroParisTech,
BP 1,
F-78850 Thiverval-Grignon
<bertrand@grignon.inra.fr>

Résumé

L'objectif de cette étude est d'évaluer l'impact des épisodes de sécheresse (notamment 1976, 2003, 2005, 2006) sur le rendement des cultures en France. Ces évaluations ont été faites pour plusieurs espèces de grandes cultures, à l'échelle nationale et pour quatre régions. Les statistiques publiées par le Service central des enquêtes et études statistiques (SCEES) du ministère de l'Agriculture ont été utilisées. Les droites de régression entre les valeurs de rendement et l'année culturale ont permis de déterminer les progressions des rendements, à partir desquelles ont été calculés les déficits de production pour les années de sécheresse. Les estimations de déficits à l'échelle nationale confirment l'importance des sécheresses de 1976, 2003 et 2006, et, dans une moindre mesure, de 2005. Les cultures d'hiver semées précocement (colza, orge) sont les moins pénalisées, puis viennent le blé d'hiver (7 à 18 % de pertes), le maïs, souvent irrigué mais pouvant souffrir de restrictions (7 à 23 % de pertes), et enfin le sorgho, qui bien que tolérant, est soumis aux plus fortes contraintes pédoclimatiques. Le tournesol a été moins affecté que le sorgho par les sécheresses récentes. La quantification des pertes pour les quatre régions étudiées montre que le classement des années les plus déficitaires varie entre régions, 1976 se signalant plus dans le Nord de la France, et 2003 dans le Sud. La méthode d'estimation retenue dans cette étude permet donc d'accéder à des évaluations à l'échelle nationale ou régionale. Fondée sur un écart par rapport à une tendance d'augmentation des rendements, elle conduit toutefois à des chiffres inférieurs à ceux obtenus par l'utilisation des valeurs potentielles de production ou des situations irriguées. De même, dans les estimations pour une espèce et une région donnée, les effets des caractéristiques de l'espèce, du milieu et des systèmes de culture sont confondus, ce qui peut faire apparaître des sensibilités d'espèces différentes de celles données par les études écophysiological.

Mots clés : céréale ; plante oléagineuse ; rendement ; sécheresse.

Thèmes : climat ; productions végétales.

Abstract

Evaluation of drought impacts on crop yields in France

The aim of the study was to estimate the impact of major drought events faced by French agriculture on yield, especially in 1976, 2003, 2005 and 2006. Estimations were made at the national and regional level for several crops. The statistics provided by the Service central des enquêtes et études statistiques (SCEES) of the Ministry of Agriculture were used. Yield increase over time was estimated using linear regressions of yield with harvest year. Yield deficits due to drought were calculated as the difference between actual yield and this regression. Our estimations of yield deficits at the national level quantify to what extent drought was damaging in 1976, 2003 and 2006. Deficits were less severe in 2005. Our results show that early-sown winter crops (rapeseed, barley) were less affected by drought than wheat (7 to 18% crop losses) and maize (7 to 23% crop losses) which is often irrigated but under irrigation restrictions. The sorghum crop, which is rarely irrigated, was the most affected because of severe pedoclimatic conditions. Sunflower was less affected than sorghum during the recent droughts. At the regional level, in 1976, drought was the most detrimental in northern France, whereas in 2003, drought severity was greatest in southern France. Our method allows estimations at the national or regional level. However, as the calculations were carried out using a difference in relation to a trend, they provide a lower value than results based on potential production or full irrigation. On the other hand, the effects of crop characteristics, environment and cropping system are combined in the estimation of loss for a crop and a region. Therefore, our estimations may reveal sensitivity to drought which are different from those provided by ecophysiological studies.

Key words: cereals; drought; oil crops; yields.

Subjects: climate; vegetal productions.

Depuis 1976, l'agriculture française a connu plusieurs épisodes de sécheresse, dont les derniers (2003, 2005, 2006) ont été particulièrement marqués. Selon les années, il s'agissait de sécheresse édaphique, affectant l'humidité du sol au printemps et en été, de sécheresse hydrologique, pénalisant la recharge hivernale des aquifères ou de situations mixtes, accompagnées ou non de hautes températures estivales (Choisnel, 1993 ; Amigues *et al.*, 2006).

Doit-on s'attendre pour autant à une augmentation de la fréquence et de l'intensité des sécheresses dans un avenir proche ? Depuis 20 ans, on observe déjà une diminution de 10% de la pluviométrie estivale dans le sud de la France associée à une augmentation de la température moyenne annuelle. C'est pourquoi, les sécheresses récentes pourraient bien s'inscrire dans le cadre d'une évolution relevant du changement climatique (Amigues *et al.*, 2006).

L'évaluation des impacts de la sécheresse aux échelles nationale et régionale s'impose non seulement dans le cadre des cellules de vigilance ministérielles et préfectorales, lors des procédures de compensation des calamités, mais aussi en vue d'évaluer la sensibilité des systèmes de culture à une fréquence accrue des épisodes de sécheresse et de proposer des adaptations agronomiques et génétiques (Bootsma *et al.*, 1996 ; Brisson *et al.*, 2006).

Plusieurs sources de données peuvent renseigner *a posteriori* sur les baisses de rendement consécutives à la sécheresse. En premier lieu, les données statistiques régionalisées sur les rendements moyens (Agreste, 1989-2006) sont les plus mobilisées ; la baisse de production imputable à la sécheresse s'apprécie alors souvent par rapport à la moyenne des 5 années précédentes. De manière plus locale, des réseaux de référence basés sur l'expérimentation agronomique (ou l'enquête) servent à évaluer la sensibilité intrinsèque des cultures au déficit hydrique à différentes phases du cycle avec le défaut d'être souvent implantés en milieu favorable (sols profonds).

Des approches en temps réel peuvent être menées à l'aide d'indices agroclimati-

ques dont la précision s'affine au cours de la saison (Wu *et al.*, 2004) ou par le biais de données radiométriques satellitaires (réflectance du couvert, température de surface) (Unganai et Kogan, 1998).

Enfin, les modèles de simulation climat-sol-plante, qui s'appuient sur la connaissance agronomique validée mais dont le paramétrage reste délicat, sont davantage utilisés pour typer les scénarios climatiques passés ou prévisibles et en évaluer les conséquences *ex ante* pour une gamme large de sols et de systèmes de culture (Keating et Meinke, 1998 ; Yacoubi *et al.*, 1998 ; Brisson *et al.*, 2006). À la suite des sécheresses passées, des monographies, par exemple, des notes de conjoncture du Service central des enquêtes et études statistiques (SCEES) du ministère de l'Agriculture, relayées par la presse agricole, ont chiffré chaque année les conséquences de la sécheresse sur la production et le revenu des agriculteurs en France. Pour autant, on ne dispose pas réellement d'une évaluation complète et rétrospective des pertes de rendement imputables à la sécheresse par culture et par région.

L'objectif de cette étude est de proposer une évaluation de l'impact de la sécheresse sur la production des principales grandes cultures, fondée sur l'analyse des séries historiques de rendement issues de la statistique agricole française.

Méthode d'estimation du déficit de production attribué à la sécheresse

Dans quatre régions françaises (Picardie, Centre, Poitou-Charentes, Midi-Pyrénées), exprimant un gradient climatique Nord-Sud, les séries chronologiques de rendement du SCEES ont été analysées depuis 1970 pour cinq cultures majeures (blé tendre, maïs-grain, colza d'hiver, orge d'hiver, tournesol, par ordre décroissant de surfaces en 2005).

Pour le blé dur, le sorgho-grain, le soja, la betterave sucrière, la pomme de terre, dont la localisation est méridionale pour les trois premières, septentrionale pour les deux dernières, seule la statistique nationale a été utilisée. Pour le pois protéagineux, on ne dispose de statistiques fiables que depuis 1989, ce qui limite la portée d'une analyse des séries chronologiques selon la démarche classique en agrométéorologie.

À partir de la droite de régression reliant le rendement à l'année culturale, on a calculé, pour chaque année, aux échelles régionale et nationale, un rendement de référence qui traduit le rendement accessible, étant donné le progrès génétique, l'amélioration des techniques culturales, et le changement climatique (hausse des températures au cours des années 1990, par exemple).

Tout écart négatif suffisamment important par rapport au rendement de référence traduit l'action d'un facteur limitant majeur aux échelles nationale ou régionale. Généralement, ce facteur limitant est d'origine agroclimatique : sécheresse, maladies cryptogamiques induites par un climat doux et humide, conditions de récolte ou d'implantation très défavorables. La perte de rendement est exprimée relativement à la valeur de référence pour l'année considérée.

Lors des années 1976, 2003, 2005 et 2006, les impacts de la sécheresse ont été ressentis à l'échelle nationale, bien qu'une certaine variabilité interrégionale subsiste dans ce domaine. Les cartes publiées par Météo-France en attestent. Afin d'avoir une vision dynamique de l'installation de la sécheresse, on compare ici le déficit pluviométrique (pluie-évapotranspiration potentielle) cumulé de novembre à août pour ces quatre années de sécheresse sur trois postes climatiques exprimant un gradient Nord-Sud (*figure 1*) : Versailles (78), Lusignan (86), Toulouse (31). Le déficit pluviométrique est très prononcé à Toulouse pour les quatre années (1976 n'étant pas l'année la plus sèche), à Lusignan en 1976 et 2005, mais uniquement en 1976 à Versailles. En 2003, bien qu'intense, la sécheresse s'est installée plus tardivement au printemps en raison d'une pluviométrie hivernale satisfaisante

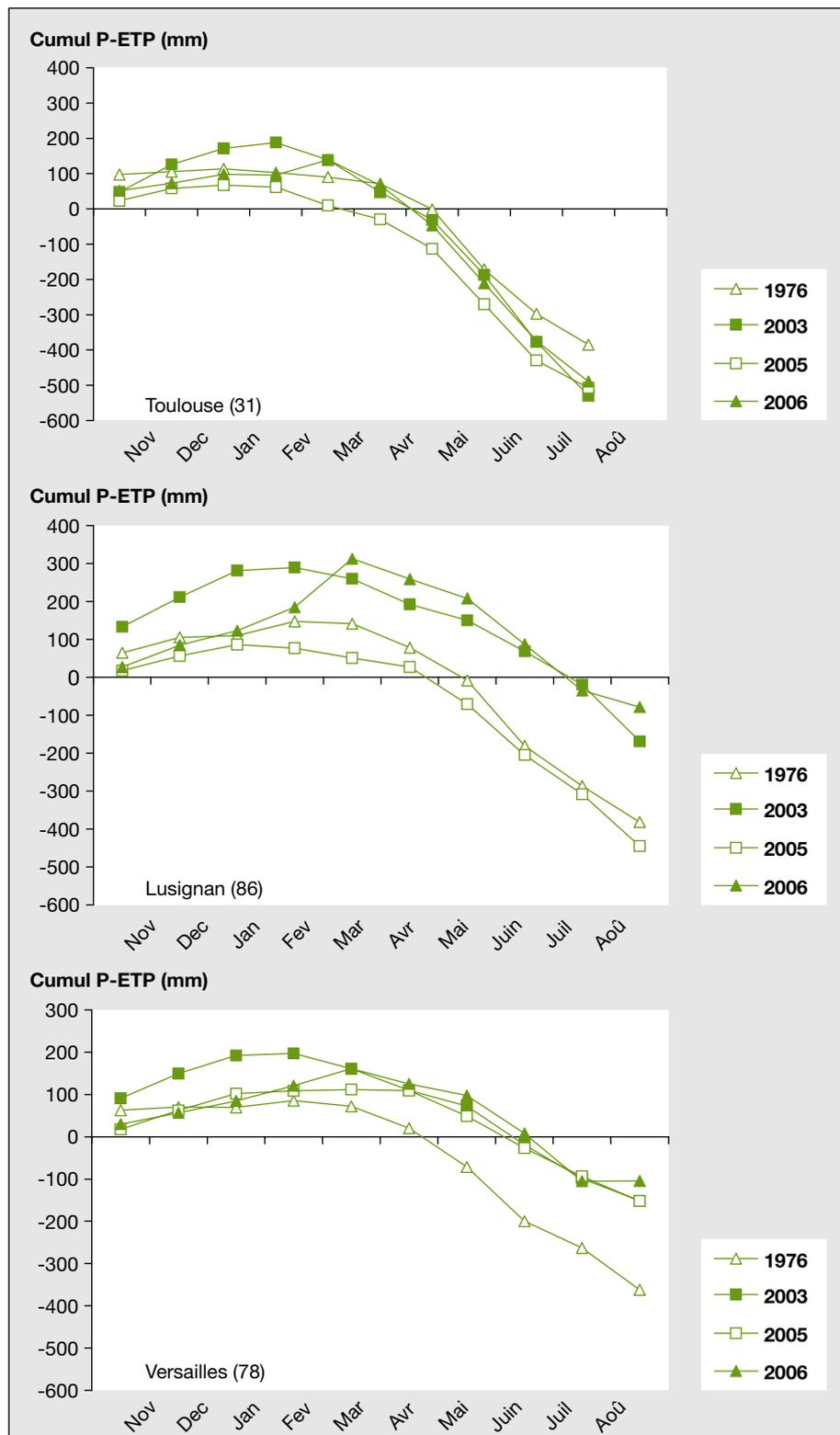


Figure 1. Bilan pluie (P)-évapotranspiration potentielle (ETP) cumulée de novembre à août pour trois sites français (postes climatiques Inra) : années 1976, 2003, 2005, 2006.

Figure 1. Cumulative precipitation (P)-evapotranspiration (ETP) balance from November to August at three French locations (Inra weather stations): seasons 1976, 2003, 2005, 2006.

(sécheresse édaphique). En 2005 et 2006, la recharge des sols et des nappes a été insuffisante au cours de la phase hivernale, avec des conséquences pour les ressources en eau d'irrigation (sécheresse hydrologique).

Résultats

Pertes de rendement à l'échelle nationale

À l'aide de la *figure 2*, on illustre bien la progression annuelle moyenne des rendements pour 7 grandes cultures à l'échelle nationale : + 1,6 % (maïs, betterave), + 1,5 % (blé tendre, pomme de terre), + 1,4 % (orge d'hiver), + 1,3 % (sorgho, colza). Pour le soja, la progression des rendements est plus faible (+ 1 %). Pour le tournesol, on distingue une période de fort accroissement des rendements jusqu'en 1988 (+ 2,1 %), puis une stagnation au-delà (soit + 0,7 % par an entre 1970 et 2006). C'est pourquoi, le rendement de l'année 2000 (25,2 q/ha), qui est le plus élevé, a été retenu comme niveau de référence après 1988. Pour le pois, après le maintien à des valeurs élevées entre 1989 et 1999, les rendements ont chuté depuis 2000.

La perte de rendement liée à la sécheresse a été pratiquement générale en 1976, 2003, 2005 et 2006, avec des exceptions pour le colza, la pomme de terre et la betterave pour les années récentes (*figure 2*). Dans le Sud-Ouest, d'autres épisodes de sécheresse ont davantage touché les cultures d'été non irriguées (comme le sorgho) en 1986, 1989, 1990 et 2004. En 2001, les céréales à paille et le colza ont été pénalisés par l'excès d'eau entre octobre et avril ; le rendement de la betterave a été très déprimé par des implantations tardives en conditions humides.

La variabilité non liée au progrès des rendements est la plus faible pour les cultures industrielles, les céréales à paille et le maïs puisque la part expliquée par ce progrès dans la variabilité interannuelle des rendements est comprise entre 82 et 90 % (r^2 de 0,82 à 0,90). Cette variabilité est plus forte pour le sorgho (culture non irriguée du Sud de la France), le soja (dont les modes d'irrigation ont beaucoup varié au gré des primes compensatoires), et le colza (culture subissant fortement les dégâts des ravageurs et pathogènes).

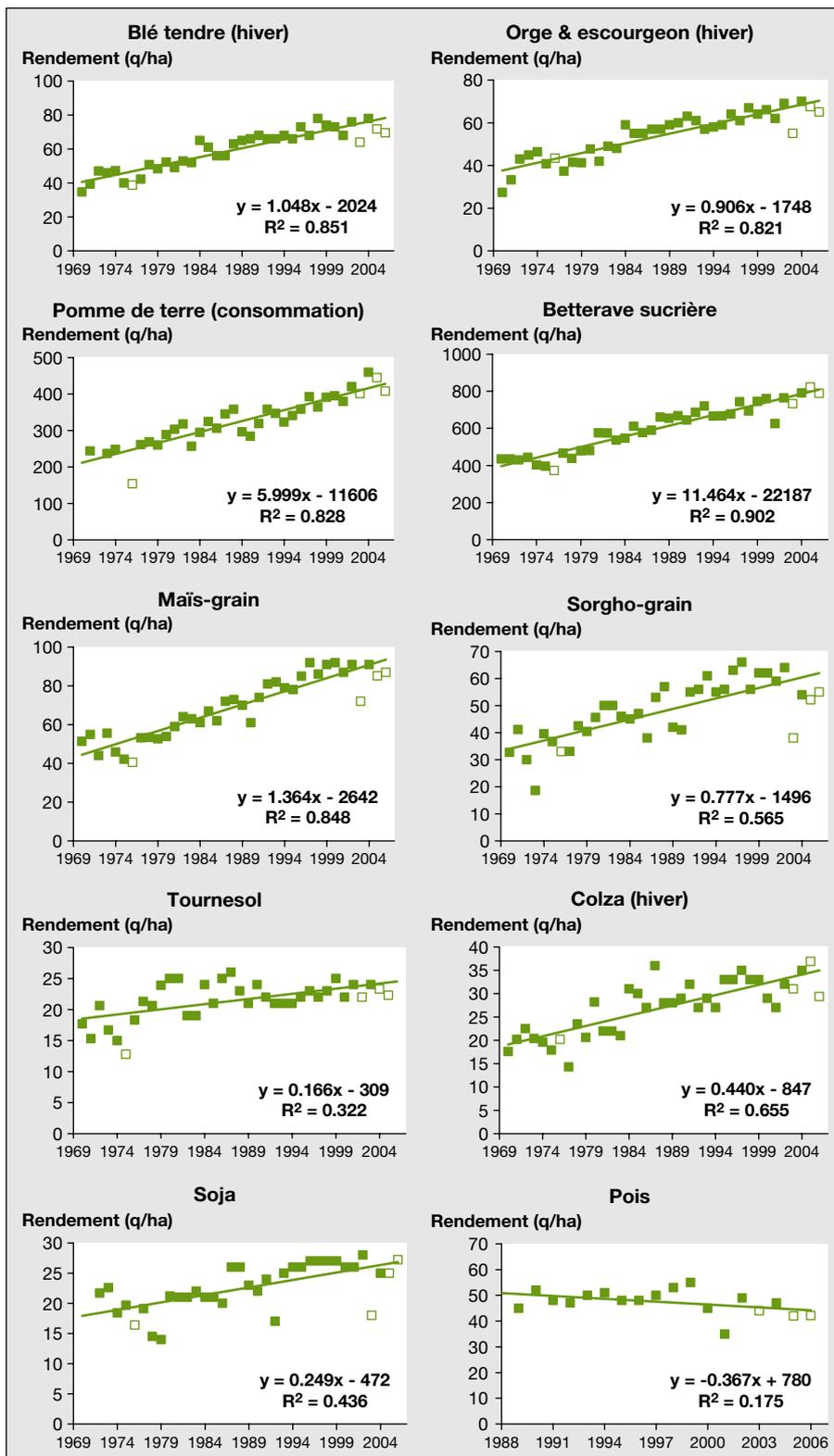


Figure 2. Évolution du rendement national des dix principales grandes cultures (1970-2006).

Figure 2. National yield level as a function of time (1970-2006) for ten crops.

Calcul de la progression – les carrés blancs indiquent les 4 années majeures de sécheresse nationale (1976, 2003, 2005, 2006).

À l'échelle nationale les plus fortes pertes de rendement ont été enregistrées en 1976 et 2003, puis en 2006 (tableau 1), la sécheresse 2005 ayant été plus modérée. Parmi les cultures d'hiver, le colza et l'orge sont souvent les moins pénalisés, en raison notamment de capacités d'esquive de la sécheresse de début d'été (semis précoces). Les pertes en blé tendre varient de 7 à 18 % selon les années. Les pertes en maïs-grain varient de 7 à 23 % : elles traduisent le fait qu'une proportion importante du maïs est pluviale (71 % en 1988, 55 % en 2000) et que des restrictions d'irrigation peuvent pénaliser la culture dans certaines régions (Glaises et Rieu, 2004). Si l'on compare la sensibilité à la sécheresse des cultures entre 1976 et 2003, les ordres de grandeur sont conservés pour le colza (8 %), le blé (16 %) et le maïs (21 %).

Depuis quelques années, le SCEES distingue rendements du maïs en sec et en irrigué. Une forte baisse du rendement a été observée en non irrigué en 2003 (-30 % par rapport à aux années 2002 et 2004, contre -12 % avec irrigation). Les baisses ont été plus faibles en 2005 et en 2006 (perte de 10 à 11 % sans irrigation) (tableau 2).

Ce sont les cultures d'été non irriguées (tournesol et surtout sorgho) qui sont les plus exposées à la sécheresse, en dépit de leur tolérance intrinsèque, car elles sont principalement conduites en sol superficiel à faibles potentialités dans la moitié Sud de la France. Les pertes varient ainsi de 12 à 37 % pour le sorgho (7 à 32 % pour le tournesol). La réponse du soja est très contrastée (< 3 à 31 %) : elle est liée à la proportion de surfaces irriguées, fluctuant de 50 à 90 % selon les contextes réglementaires.

De la même manière, alors que pomme de terre et betterave étaient fortement pénalisées en 1976 (38 et 20 % respectivement), l'extension de l'irrigation pour ces cultures (36 % des pommes de terre étaient irriguées en 2000) maintient les pertes en deçà de 5 % dans les sols profonds du Nord-Bassin parisien.

Variabilité des pertes de rendement à l'échelle régionale

Si les sécheresses de 1976, 2003, 2005 et 2006 ont eu une portée nationale, leur manifestation régionale a été plus variable. Ainsi, c'est l'année 2003 qui a été la plus pénalisante pour le blé d'hiver en Midi-Pyrénées alors que c'est 1976 qui

Tableau 1. Perte de rendement (%) liée à la sécheresse pour quelques grandes cultures (données France entière).

Table 1. Yield loss (%) due to drought for some major crops at national level (French data).

	Blé Tendre	Orge Hiver	Colza	Tournesol	Maïs	Sorgho	Soja	Pomme de terre	Betterave
1976	17,5	-	7,5	31,5*	23	15,5	15,5	38	20
2003	15	18,5	8	13,5**	19,5	36,5	31	-	5,5
2005	7	-	-	7,5**	7,5	15,5	6	-	-
2006	11,5	7,5	16	11,5**	7	11,5	-	4,5	-

* Période 1970-1988 ; ** période 1989-2006 : en référence au rendement 2000 (25,2 q/ha) ; - pertes nulles ou inférieures à 3 %.

Tableau 2. Rendement et surfaces couvertes par le maïs selon le mode d'irrigation.

Table 2. Maize: acreages and yields as a function of irrigation supply.

		2002	2003	2004	2005	2006
Maïs non irrigué	Surfaces (hectares)	1 027 000	900 500	1 011 000	931 500	827 500
	Rendement (q/ha)	84	59 (- 30 %)	83	74 (- 11 %)	75 (- 10 %)
Maïs irrigué	Surfaces (hectares)	753 000	735 000	755 500	683 500	636 500
	% du total maïs	42	45	43	42	43
	Rendement (q/ha)	101	89 (- 12 %)	103	98 (- 4 %)	104

Entre parenthèses : perte de rendement (%) par rapport à la moyenne des années 2002 et 2004.

reste la référence en Picardie et en Poitou-Charentes, la région Centre ayant été la plus sévèrement affectée tant en 1976 qu'en 2003 (tableau 3). Les pertes maximales varient assez peu selon les régions : 17 à 23 %. En 2005, c'est en Picardie que la perte de rendement du blé a été la plus forte (12 %) pour un rendement de référence de 92 q/ha. En 2006, les pertes pour le blé ont été modérées mais généralisées : 7 à 13 % selon les régions.

Toutes les régions productrices de maïs ont été fortement déprimées en 1976 (20 à 36 %). En 2003, la sécheresse a été plus marquée au Sud. En 2005, les restrictions d'utilisation de l'eau ont été très sévères en Poitou-Charentes d'où une perte de 31 % alors qu'en Midi-Pyrénées où la ressource est exogène et sécurisée, la perte

n'a pas excédé 5 % en dépit de déficits climatiques comparables (tableau 3). Pour les mêmes raisons, les pertes ont été limitées en 2006 pour le maïs en Midi-Pyrénées, alors qu'elles se situaient entre 7 et 10 % dans les autres régions.

Le taux d'irrigation du maïs-grain varie selon les régions : cette culture est majoritairement pluviale en Picardie, très inégalement irriguée en Poitou-Charentes (de 5 à plus de 75 % selon les cantons), majoritairement irriguée dans la région Centre et surtout en Midi-Pyrénées (Gleyses et Rieu, 2004).

Par ailleurs, le taux d'irrigation du maïs a très fortement augmenté depuis les années 1970, réduisant d'autant la sensibilité de la culture à la sécheresse dès lors que la ressource est disponible pour cet usage (Morardet *et al.*, 1998).

Enfin, Tollenaar et Wu (1999) indiquent qu'une partie du progrès génétique observé chez le maïs peut être attribuée à une meilleure tolérance au stress hydrique, d'où de possibles baisses des pertes de rendement entre 1976 et les années récentes lors de fortes sécheresses.

Discussion

La méthode proposée pour quantifier les pertes de rendement imputables à la sécheresse suppose qu'il existe une progression régulière des rendements. Ce fait est acquis pour la plupart des grandes cultures pour lesquelles des variétés gagnant en potentiel de rendement sont régulièrement inscrites au catalogue officiel. Ainsi, Brancourt-Hulmel *et al.* (2003)

Tableau 3. Pertes de rendement du blé tendre et du maïs (%) imputables à la sécheresse pour quatre régions et quatre années (1976, 2003, 2005, 2006).

Table 3. Bread wheat and maize yield losses (%) due to drought at regional level: 1976, 2003, 2005, 2006.

	Blé tendre				Maïs			
	Picardie	Centre	Poitou-Charentes	Midi-Pyrénées	Picardie	Centre	Poitou-Charentes	Midi-Pyrénées
Perte 1976 (%)	18	23	20,5	7	33,5	28	36	19,5
Perte 2003 (%)	10,5	21	7,5	17	7,5	12,5	16,5	30
Perte 2005 (%)	10,5	6	-	-	3,5	-	31	5
Perte 2006 (%)	11,5	13	10	7	7,5	9	9,5	-

attribuent au progrès génétique du blé d'hiver un accroissement annuel du rendement de 0,36 à 0,63 q/ha selon l'intensification de la conduite de culture. Derieux *et al.* (1987) chiffrent à 0,8 q/ha en moyenne le progrès génétique pour le maïs grain. L'amélioration des conduites de culture permet un gain à peu près équivalent (Turner, 2004). Pour le tournesol, si le gain génétique annuel est évalué à 0,33 q/ha (Vear *et al.*, 2003), l'extensification de la culture, sa localisation en situations pédoclimatiques séchantes et l'extension des maladies cryptogamiques ne permettent pas de valoriser ce progrès, d'où la stagnation des rendements (Debaeke *et al.*, 1998).

La méthode utilisée, basée sur la statistique publique permet d'avoir accès à une évaluation globale des pertes de rendement sur le plan national et régional. Barakat et Handoufe (1998) ont utilisé une démarche similaire pour la production de céréales au Maroc. Cependant, étant donné que l'on utilise une espérance de rendement, on sous-estime certaines années la perte réelle, en ne considérant pas la production potentielle accessible lors d'années climatiques favorables.

Par ailleurs, la perte théorique par rapport à une culture bien irriguée est encore supérieure à ces estimations. Ainsi, sur la période 1970-1992, dans le cadre du dispositif expérimental d'Auzeville, la perte moyenne en culture sèche (par rapport à un témoin bien irrigué) était de 25 % (tournesol), 28 % (sorgho), 33 % (soja) et 42 % (maïs) (Cabelguenne *et al.*, 1982 ; Debaeke et Hilaire, 1997), soit bien au-delà des pertes calculées dans le *tableau 1*.

L'étude met en évidence des pertes de rendement très variables selon les années et les cultures. Dans certains cas, les pertes dues à la sécheresse sont du même ordre que celles attribuées aux attaques parasitaires mal contrôlées (phomopsis sur tournesol, rouille brune sur blé...). Plusieurs causes peuvent expliquer les pertes importantes observées en 1976 par rapport aux sécheresses récentes : la précocité, l'intensité et la généralisation du déficit pluviométrique (*figure 1*), la plus faible proportion de cultures irriguées à cette époque (Morardet *et al.*, 1998), une plus faible rusticité des variétés de maïs ou de tournesol (Derieux *et al.*, 1987 ; Merrien et Champolivier, 1995 ; Tollenaar et Wu, 1999).

La sensibilité globale des cultures à la sécheresse dépend de la sensibilité intrin-

sèque des espèces cultivées (phases sensibles et critiques, capacités d'extraction d'eau, processus d'endurcissement et d'ajustement...), mais aussi des conditions de culture qui leur sont appliquées (période de semis, irrigation) et des choix variétaux qui sont faits (précocité...). La perte de rendement résulte *in fine* du stade où survient le plus fréquemment le déficit hydrique. Il faut superposer ces informations pour comprendre la sensibilité des cultures à la sécheresse telle qu'elle nous est révélée par la statistique agricole. Cela peut expliquer des classements d'espèces différents de ceux donnés par Doorenbos et Kassam (1979) ou Cabelguenne *et al.* (1982) qui ne considèrent que la réponse physiologique au défaut d'alimentation en eau.

Ainsi, le sorgho, réputé tolérant à la sécheresse (Krieg et Lascano, 1990), apparaît ici comme une culture sensible si on le compare au maïs. Le sorgho est en effet cultivé bien souvent sans irrigation d'appoint, en sol de coteau argilo-calcaire. De ce fait, il est affecté par les sécheresses précoces qui ne permettent pas une bonne implantation et un tallage suffisant. En revanche, il peut endurer des déficits hydriques marqués au cours de l'été en raison d'un enracinement efficace et d'une activité photosynthétique et transpiratoire maintenue pour une gamme étendue d'états hydriques du sol. Le tournesol, culture semée au printemps, confirme sa bonne tolérance à la sécheresse (Unger, 1990), les pertes calculées étant proches de celles du blé d'hiver. De même, le colza dont l'enracinement est profond et le cycle décalé par rapport aux fortes demandes évaporatives permet d'esquiver régulièrement la sécheresse de fin de cycle, mais la culture est plus sensible au risque de sécheresse d'automne en phase d'implantation.

Conclusion

Les modèles de simulation offrent des possibilités étendues en matière d'évaluation des impacts de la sécheresse et de recherche de voies d'adaptation. Des bases de données climatiques et pédologiques sont disponibles à cet effet (Brisson *et al.*, 2006). Des applications opérationnelles spatialisées existent pour la production fourragère (Ruget *et al.*, 2006) mais pas encore pour les grandes cultures. Cependant, la représentation réaliste

des pratiques agricoles pose un problème pour l'évaluation des conséquences de la sécheresse et son utilisation dans le cadre de procédures d'indemnisation.

L'approche satellitaire permet une représentation spatialisée des états de la végétation à plusieurs moments du cycle cultural (indice foliaire, indice de stress hydrique...). Ces données peuvent être assimilées dans les modèles de simulation des cultures évoqués plus haut. Cependant, la prévision du rendement est encore un objectif difficile à atteindre car de nombreux facteurs limitants peuvent survenir en fin de cycle.

Pour ces raisons, l'exploitation de données statistiques, dont il faudrait discuter par ailleurs la représentativité et la précision, reste une méthode de base pour l'évaluation des impacts de la sécheresse en grande culture aux échelles nationale et régionale. ■

Références

- Agreste, 1989-2006. Statistique agricole annuelle. Chiffres et Données Agriculture. Paris : ministère de l'Agriculture et de la Pêche. www.agreste.agriculture.gouv.fr.
- Amigues JP, Debaeke P, Itier B, *et al.* *Sécheresse et agriculture : adapter l'agriculture à un risque accru de manque d'eau*. Rapport d'expertise scientifique collective Paris : Inra éditions, 2006.
- Barakat F, Handoufe A. Approche agroclimatique de la sécheresse agricole au Maroc. *Sécheresse* 1998 ; 9 : 201-8.
- Bootsma A, Boisvert JB, de Jong R, Baier W. La sécheresse et l'agriculture canadienne : une revue des moyens d'action. *Sécheresse* 1996 ; 7 : 277-85.
- Brancourt-Hulmel M, Doussinault G, Lecomte C, Bérard P, Le Buanec B, Trotter M. Genetic improvement of agronomic traits of winter wheat cultivars released in France from 1946 to 1992. *Crop Sci* 2003 ; 43 : 37-45.
- Brisson N, Huard F, Graux AI, *et al.* *Évaluation régionale de l'impact de la sécheresse agricole à l'aide d'un modèle biophysique*. Étude réalisée par l'unité AGROCLIM de l'INRA pour le ministère de l'Agriculture. Paris : Inra éditions, 2006.
- Cabelguenne M, Marty JR, Hilaire A. Comparaison technico-économique de la valorisation de l'irrigation par quatre cultures d'été (maïs, soja, sorgho, tournesol). *Agronomie* 1982 ; 2 : 567-76.
- Choisnel E. Le risque sécheresse en agriculture. *Chambres d'Agriculture* 1993 ; 807 : 6-12.
- Debaeke P, Hilaire A. Production of rainfed and irrigated crops under different crop rotations and input levels in southwestern France. *Can J Plant Sci* 1997 ; 77 : 539-48.
- Debaeke P, Jouffret P, Reau R. Le tournesol en France : surfaces, conduites et résultats. *OCL* 1998 ; 5 : 86-91.

Derieux M, Darrigrand M, Gallais A, Barrière Y, Bloc D, Montalant Y. Estimation du progrès génétique réalisé chez le maïs grain en France entre 1950 et 1985. *Agronomie* 1987 ; 7 : 1-11.

Doorenbos J, Kassam AH. *Yield response to water*. Irrigation and Drainage Paper 33. Rome : FAO, 1979.

Gleyses G, Rieu T. *L'irrigation en France. État des lieux 2000 et évolution*. Antony : Cemagref éditions, 2004.

Keating BA, Meinke H. Assessing exceptional drought with a cropping systems simulator : a case study for grain production in Northeast Australia. *Agric Syst* 1998 ; 57 : 315-32.

Krieg DR, Lascano RJ. Sorghum. In : Stewart BA, Nielsen DR, eds. *Irrigation of Agricultural Crops*. Agronomy Monograph N°30. Madison (WI, USA) : ASA-CSSA-SSSA, 1990.

Merrien A, Champolivier L. Tournesol : existe-t-il une réponse variétale à la sécheresse ? *Oléoscope* 1995 ; 26 : 22-4.

Morardet S, Mailhol JC, Vidal A, et al. Sécheresse et demande en eau d'irrigation : éléments de réflexion. *Ingénieries-EAT* 1998 ; 13 : 15-28.

Ruget F, Novak S, Granger S. Du modèle STICS au système ISOP pour estimer la production fourragère. Adaptation à la prairie, application spatialisée. *Fourrages* 2006 ; 186 : 241-56.

Tollenaar M, Wu J. Yield improvement on temperate maize is attributable to greater stress tolerance. *Crop Sci* 1999 ; 39 : 1597-604.

Turner NC. Sustainable production of crops and pastures under drought in a Mediterranean environment. *Ann Appl Biol* 2004 ; 144 : 139-47.

Unganai LS, Kogan FN. Drought monitoring and corn yield estimation in southern Africa from AVHRR data. *Remote Sens Env* 1998 ; 63 : 219-32.

Unger PW. Sunflower. In : Stewart BA, Nielsen DR, eds. *Irrigation of Agricultural Crops*. Agronomy Monograph N°30. Madison (WI, USA) : ASA-CSSA-SSSA, 1990.

Vear F, Bony H, Joubert G, Tourvieille de Labrouhe D, Pauchet I, Pinochet X. 30 years of sunflower breeding in France. *OCL* 2003 ; 10 : 66-73.

Wu H, Hubbard KG, Wilhite DA. An agricultural drought risk-assessment model for corn and soybeans. *Int J Climatology* 2004 ; 24 : 723-41.

Yacoubi M, El Mourid M, Chbouki N, Stocle CO. Typologie de la sécheresse et recherche d'indicateurs d'alerte en climat semi-aride marocain. *Sécheresse* 1998 ; 9 : 269-76.