



HAL
open science

Sécheresse et agriculture. Réduire la vulnérabilité de l'agriculture à un risque accru de manque d'eau. Expertise scientifique collective. Synthèse du rapport

Jean-Pierre Amigues, Philippe P. Debaeke, Bernard B. Itier, Gilles G. Lemaire, Bernard Seguin, Francois F. Tardieu, Alban Thomas, . Expertise Scientifique Collective Uesc, . Ministère de L'Agriculture Et de La Pêche

► **To cite this version:**

Jean-Pierre Amigues, Philippe P. Debaeke, Bernard B. Itier, Gilles G. Lemaire, Bernard Seguin, et al.. Sécheresse et agriculture. Réduire la vulnérabilité de l'agriculture à un risque accru de manque d'eau. Expertise scientifique collective. Synthèse du rapport. [0] INRA. 2006, 72 p. hal-02824089

HAL Id: hal-02824089

<https://hal.inrae.fr/hal-02824089v1>

Submitted on 11 Mar 2021

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Sécheresse et agriculture

Réduire la vulnérabilité
de l'agriculture à un risque
accru de manque d'eau

Expertise scientifique collective

Synthèse du rapport d'expertise réalisé par l'INRA
à la demande du Ministère de l'Agriculture et de la Pêche

Octobre 2006

ALIMENTATION
AGRICULTURE
ENVIRONNEMENT

INRA

Directrice de la publication :

Claire Sabbagh, INRA, Unité Expertise scientifique collective

Conception du document et coordination éditoriale :

Isabelle Savini, INRA, Unité Expertise scientifique collective

Contacts :

Bernard Itier : itier@ensam.inra.fr ; Claire Sabbagh : sabbagh@paris.inra.fr

Le rapport d'expertise, source de cette synthèse, a été élaboré par les experts scientifiques sans condition d'approbation préalable par les commanditaires ou l'INRA. La synthèse a été validée par les auteurs du rapport.

La liste des auteurs et contributeurs de l'expertise figure en page 3 de couverture.

Les citations doivent faire référence aux éditeurs scientifiques nommés ci-contre :

Amigues J.P., P. Debaeke, B. Itier, G. Lemaire, B. Seguin, F. Tardieu, A. Thomas (éditeurs), 2006. *Sécheresse et agriculture. Réduire la vulnérabilité de l'agriculture à un risque accru de manque d'eau*. Expertise scientifique collective, synthèse du rapport, INRA (France), 72 p.

Expertise scientifique collective INRA

Sécheresse et agriculture

Réduire la vulnérabilité
de l'agriculture à un risque
accru de manque d'eau

Synthèse du rapport d'expertise

Jean-Pierre Amigues, Philippe Debaeke,
Bernard Itier, Gilles Lemaire, Bernard Seguin,
François Tardieu, Alban Thomas

Octobre 2006

Avant propos

La mission d'expertise en appui aux politiques publiques dans les domaines de compétence de l'INRA a été réaffirmée dans le document d'orientation 2005-2008. Organisme de recherche finalisé, l'Institut se doit d'éclairer la décision publique avec les éléments de connaissances scientifiques les plus récents et les plus pertinents et d'apporter une base solide au débat public. Le travail d'expertise en retour interpelle l'INRA, à partir des lacunes des connaissances constatées par les experts, sur les incidences de ces manques en terme de programmes et de priorités de recherche.

L'Institut a été saisi en juillet 2005 par le Ministère de l'agriculture et de la pêche (MAP) sur la question des rapports entre agriculture et sécheresse, dans l'hypothèse d'un changement climatique qui pourrait augmenter la probabilité et la sévérité d'épisodes secs. Dans ce contexte incertain, les pouvoirs publics s'interrogent, tant pour des raisons de coût économique que de tensions potentielles entre utilisateurs de l'eau, sur les moyens de limiter la vulnérabilité de notre agriculture au manque d'eau et d'inscrire une politique de gestion de la ressource dans le moyen terme.

Définition et mode de fonctionnement de l'expertise scientifique collective (ESCO)

L'ESCO consiste à extraire de la bibliographie mondiale et à assembler les connaissances scientifiques pertinentes pour éclairer une question posée par un commanditaire extérieur. Elle ne formule ni avis ni recommandations, mais présente des options techniques ; elle dégage les acquis, mais également pointe les incertitudes, les controverses et les lacunes repérées dans la littérature internationale. La bibliographie sur laquelle s'appuie l'ESCO est constituée en majorité de publications académiques. Lorsqu'elles celles-ci font défaut, il est fait appel à de la littérature grise : rapports, articles de revues techniques...

Le travail conduit par des experts de disciplines différentes est guidé par un cahier des charges qui résulte d'une co-construction entre maîtrise d'ouvrage et maîtrise d'œuvre pour délimiter le périmètre de l'ESCO et s'accorder sur les questions posées. Un comité de pilotage, dont la composition relève du commanditaire, s'assure régulièrement de l'avancée des travaux.

L'ESCO mobilise naturellement des experts de l'INRA puisque l'Institut n'accepte de commande d'expertise que dans son domaine de compétences, mais également, en fonction des compétences nécessaires qui ne se trouveraient pas dans l'Institut, des chercheurs appartenant à d'autres établissements de recherche publics.

Les experts signent le rapport d'ESCO et sont responsables de leur contribution. L'INRA s'engage sur les conditions dans lesquelles se déroule le processus d'expertise : qualité du travail documentaire de mise à jour des sources bibliographiques, transparence des débats, animation du groupe d'experts, rédaction des produits de communication de l'ESCO dans une forme qui concilie la rigueur scientifique et la lisibilité par un public large. La pluralité des approches au sein du groupe d'experts favorise l'expression de la controverse et l'exercice critique.

On compte à ce jour trois ESCo conduites sur des sujets vastes, complexes et traversés d'incertitudes : "Agriculture, territoire, environnement dans les politiques européennes", "Stocker du carbone dans les sols agricoles de France ?", "Pesticides, agriculture, environnement : réduire l'utilisation des pesticides et en limiter les impacts environnementaux".

"Sécheresse et agriculture", un sujet d'intérêt exemplaire pour un organisme de recherche finalisé

La question posée à l'INRA par le MAP est une question essentielle pour la recherche finalisée pour plusieurs raisons. La première concerne l'objectif qu'elle implique et qui constitue pour les chercheurs un défi pour les décennies à venir : quelles réponses apporte aujourd'hui la science au besoin d'adaptation de l'agriculture à une raréfaction possible des ressources en eau ? Quelles sont les lacunes importantes dans les connaissances actuelles qui nécessiteraient d'être comblées pour progresser dans la résolution des problèmes posés ? Ensuite, l'étendue des disciplines scientifiques mobilisées pour traiter cette question fait de ce processus de construction d'un argumentaire collectif un travail pluridisciplinaire qui constitue une véritable "somme" sur les différentes facettes de la question, traitées dans une perspective dynamique de mise en relation des connaissances scientifiques. Enfin, les enjeux techniques (modification des systèmes de production agricoles, marges de manœuvre), et de société, économiques, politiques, territoriaux, citoyens (gestion de l'eau, bien public) de moyen et long terme, font de cette ESCo, au-delà de la question strictement agricole, une base de réflexion et de dialogue entre les acteurs sociaux concernés par les utilisations de l'eau.

Sommaire

Introduction : l'ESCo "Sécheresse et agriculture"

1. Cycle de l'eau, climat, sécheresses

- 1.1. Le cycle de l'eau
- 1.2. Les sécheresses
- 1.3. Le changement climatique

2. Agriculture et ressources en eau

- 2.1. Bilans entre prélèvements et restitution de l'eau au milieu
- 2.2. Les prélèvements d'eau pour l'irrigation
- 2.3. Agriculture et gestion territoriale des ressources en eau

3. Le développement de l'usage agricole de l'eau et ses limites

- 3.1. Le développement de l'irrigation
- 3.2. Le contexte économique de ce développement
- 3.3. Le contexte juridique et politique de la gestion de l'eau et des sécheresses

4. Les effets de la sécheresse sur la production agricole

- 4.1. Les effets sur la croissance et le développement des cultures
- 4.2. Les conséquences sur le rendement des grandes cultures
- 4.3. Les effets sur le revenu agricole
- 4.4. Les effets sur les choix de culture et niveaux de prélèvement d'irrigation

5. La plante face au manque d'eau ; différences entre espèces et amélioration génétique de la tolérance

- 5.1. Les adaptations de la plante au manque d'eau et leurs limites
- 5.2. Les stratégies possibles de tolérance : différences entre espèces et pistes d'amélioration génétique
- 5.3. Amélioration génétique de la tolérance à la sécheresse

6. Les stratégies culturales

- 6.1. Les stratégies de réduction de la vulnérabilité au manque d'eau
- 6.2. Systèmes irrigués et stratégies d'économies d'eau

7. Raisonner l'adaptation des systèmes de culture à l'eau disponible

- 7.1. Systèmes de grande culture
- 7.2. Elevage d'herbivores et systèmes fourragers
- 7.3. Cultures pérennes : arboriculture fruitière et vigne

8. Adaptations des systèmes de culture : constats et limites

- 8.1. Les adaptations lors des sécheresses récentes
- 8.2. Les limites actuelles de ces adaptations ; freins et opportunités

9. Les modalités d'action économique et politique

- 9.1. Indemnités des pertes et assurance
- 9.2. Augmentation de la ressource
- 9.3. Action sur la demande en eau agricole
- 9.4. Rechercher l'équilibre entre offre et demande : les gestions locales concertées

10. Conclusions

Annexes

Auteurs et éditeurs de l'expertise

Introduction : l'ESCo "Sécheresse et agriculture"

Des épisodes de sécheresse récurrents

La sécheresse de 1976 avait été vécue comme un événement exceptionnel. Les sécheresses plus récentes, du début des années 1990 et surtout celles de 2003 et de 2005, ont été davantage perçues comme une des manifestations possibles du "changement climatique" annonçant un retour plus fréquent de ces "anomalies" qui, de statut de catastrophe exceptionnelle, pourraient passer au statut de phénomène récurrent.

Le GIEC (Groupe intergouvernemental d'experts sur le climat) prévoit en effet une augmentation de la variabilité du climat et de certains phénomènes extrêmes, et considère comme probable l'accroissement des risques de sécheresse estivale sur la plupart des zones terrestres continentales à moyenne latitude.

En France, de septembre 2004 à septembre 2005, une grande partie du territoire a connu une pluviométrie inférieure d'un tiers à la moyenne des 50 dernières années, et une sécheresse d'une intensité comparable à celles de 1976 et de 1989. Sur les 8 dernières années, une vingtaine de départements connaissent des limitations de consommation d'eau en année "normale" ; ce chiffre est doublé les années relativement sèches (1998, 2004), et atteint plus de 60 les années les plus sèches (2003, 2005). Même en année humide (2001), environ 6 départements connaissent des limitations d'usage de l'eau.

L'agriculture irriguée

Dans ce contexte, marqué par des tensions entre utilisations concurrentes de l'eau, la question de l'utilisation de l'eau par l'agriculture n'a pas manqué d'être posée, notamment pour l'irrigation dans les situations géographiques les plus critiques.

Après un doublement entre 1980 et 1990, les surfaces irriguées se sont stabilisées depuis la fin des années 90. Ces surfaces irriguées sont concentrées dans 5 grandes régions : sud-est, sud-ouest mais aussi régions Centre, Poitou-Charentes et Pays de Loire. Cette concentration sur un espace géographique limité génère des situations de concurrence entre différents usagers de l'eau, avec une mobilisation accrue des citoyens dans le cadre associatif, et des élus. L'eau destinée à l'irrigation représente en moyenne annuelle environ 50% de l'eau consommée en France et peut atteindre dans certaines régions 80% des prélèvements effectués en période estivale. L'équilibre entre l'offre et la demande nécessite dans certains cas des mesures relatives à l'irrigation, les agriculteurs étant les principaux consommateurs d'eau en période d'été.

En 2005, l'anticipation dès le mois de février de la réduction de la ressource a conduit à la mise en place d'assolements intégrant cette perspective et à une réduction des surfaces en maïs grain de 8% en moyenne nationale. Au plan national, il était attendu un rendement inférieur d'environ 10% pour le maïs irrigué. La sécheresse a pu entraîner des pertes allant jusqu'à 30 à 40% dans certains départements, et 40 départements ont été reconnus éligibles aux calamités agricoles concernant les récoltes fourragères.

La ressource en eau : le lien entre quantité et qualité

La gestion des ressources en eau se pose en termes de qualité et de quantité. La qualité de la ressource a été la préoccupation dominante dans les années 1980-90, et a fait alors l'objet de nombreux travaux. Suite aux sécheresses récentes, les aspects quantitatifs sont également devenus une question majeure, qui justifie d'être étudiée en tant que telle, sans oublier que gestion de la quantité et de la qualité sont fortement liées. Ainsi la prochaine mise en oeuvre de la DCE, qui fait obligation aux pays de l'Union européenne d'assurer un bon état écologique des masses d'eau, aura de fortes répercussions sur la gestion quantitative : la qualité des eaux sera un critère déterminant dans la fixation des débits d'été. Cependant, il n'entre pas dans le champ de cette expertise de traiter de la gestion qualitative des ressources en eau, ni même d'étudier toutes les répercussions possibles de la sécheresse et de l'adaptation de l'agriculture au manque d'eau sur la qualité des aquifères et des milieux aquatiques ; ces questions nécessiteraient une expertise en soi.

D'une manière générale, on peut indiquer que toute modification des quantités d'eau qui retournent vers les hydrosystèmes, soit du fait de la sécheresse elle-même, soit du fait des modes d'occupation des sols et des pratiques agricoles, aura tendance à diminuer les phénomènes de dilution des pollutions et donc à accroître ces dernières. Mais bien d'autres interactions existent en fonction des situations pédologiques locales et des systèmes de culture pratiqués, ce qui ne permet pas de généraliser une liaison simple entre flux d'eau d'une part et flux et concentration de polluants d'autre part.

Une préoccupation des pouvoirs publics

Dans ce contexte d'incertitude les décideurs publics ont à faire face à un double impératif : préserver les capacités de production et de compétitivité d'une agriculture pour qui l'eau constitue un facteur de production

majeur, et veiller à ce que l'eau, patrimoine commun de la nation, demeure accessible dans des conditions d'équité à l'ensemble de la collectivité.

Dès le lendemain de la canicule 2003, le Ministère de l'écologie et du développement durable (MEDD) a mis en place un comité de suivi "sécheresse" qui associe pouvoirs publics, syndicats agricoles, distributeurs d'eau et collectivités, et qui effectue une veille en temps réel des évolutions de la ressource en eau. Dans ce sens, un plan d'action sécheresse, à l'initiative du MEDD, a été créé en 2004 avec pour mission d'améliorer la gestion de crise, notamment en produisant une veille atmosphérique et hydrologique. Le MAP a eu également une importante activité d'alerte et de gestion de crise lors des épisodes récents de sécheresse : mise en place d'un comité et d'une cellule de vigilance sécheresse, demande d'autorisation de pâturage des jachères, organisation de transports de fourrage... Il a également dû gérer les conséquences des crises au travers des Calamités Agricoles.

Les préoccupations des pouvoirs publics sont d'ordre économique (Comment limiter la vulnérabilité des systèmes de production agricoles au manque d'eau ? Comment couvrir les pertes occasionnées par des épisodes de sécheresse si ceux-ci se répètent ?), sociaux (Comment assurer une répartition équitable de l'eau entre différents usages ?) et écologiques (Comment maintenir la qualité de l'eau et la biodiversité associée ?). De nombreux rapports attestent de cette volonté d'anticiper sur des situations à risques. Ainsi, le rapport du député Christian Ménard (janvier 2004), "Gestion des risques climatiques en agriculture", pose les questions de la pérennisation du régime d'indemnisation des agriculteurs au titre des calamités naturelles, de la mise en place d'assurances privées et de la prévention. Plus récemment, le CGGREF a produit, à la demande du MAP, un rapport sur l'irrigation durable.

Une demande d'expertise collective du MAP à l'INRA

C'est donc dans l'hypothèse de répétition possible d'épisodes de sécheresse que le MAP a demandé à l'INRA de conduire une ESCo sur les moyens de limiter la vulnérabilité des systèmes de production agricoles à la sécheresse conçue ici dans sa dimension spécifique de manque d'eau. En effet, pour faire face à des situations de crise comme celle de 2003 ou de 2005, il est apparu nécessaire que des décisions publiques ou privées puissent s'appuyer sur un état actualisé des connaissances sur les relations entre agriculture et ressource en eau.

C'est à cette fin qu'a été engagée l'expertise collective "Sécheresse et Agriculture", commanditée par le MAP et pilotée par l'INRA. Maîtres d'ouvrage et maître d'œuvre se sont mis d'accord sur le périmètre de l'ESCo (voir Annexe 1) : limitation au territoire métropolitain et aux zones agricoles *sensu lato* (agriculture et élevage), à l'exclusion des forêts dont la sensibilité à la sécheresse a fait l'objet d'une expertise spécifique, pilotée par le GIP ECOFOR en partenariat avec nos voisins allemands. Sont exclus également les aspects d'aménagements hydrauliques, et de fonctionnement des filières agricoles.

Les questions traitées par l'ESCo

Il s'agit dans un premier temps de **faire le point sur la sécheresse** : quelle est son occurrence passée et prévisible ?, à quels types spatio-temporels est-on confronté ? La canicule n'y est abordée qu'au travers de l'interaction canicule-sécheresse et de son incidence sur le cycle phénologique et la productivité des végétaux (les aspects liés à la santé des animaux et des humains sont exclus).

Dans un deuxième temps, est abordée la relation entre sécheresse et agriculture sous deux aspects qu'il est nécessaire de distinguer afin de mieux en étudier les interrelations :

- **Quelle est l'incidence de l'agriculture sur la ressource en eau ?** Cette question concerne aussi bien l'agriculture non irriguée que celle tributaire de l'irrigation. En effet, par ses modes d'occupation du sol, l'agriculture, au même titre que la forêt, agit sur les bilans hydrologiques et donc sur les quantités d'eau qui alimentent les aquifères et les cours d'eau.
- **Quelle est la sensibilité des systèmes de culture et des systèmes de production à la pénurie d'eau ?** Cette question, contrepoint de la précédente, concerne directement l'agriculteur confronté à l'aléa "sécheresse" et à une pénurie de ressources en eau, que cette pénurie soit liée à un déficit pluviométrique ou à un déficit de ressources hydrologiques. Au-delà de la sensibilité intrinsèque des plantes au manque d'eau, ce qui est en jeu est l'adéquation des systèmes de culture à des contextes pédoclimatiques, qui intègre l'aléa sécheresse dans sa dimension de prise en compte du risque. Elle concerne l'agriculture *stricto sensu* mais s'étend aussi à l'élevage des herbivores, pour lequel l'adaptation au risque de pénurie fourragère liée à la sécheresse devient primordiale.

Au-delà de la réponse aux deux questions posées ci-dessus, qui reste du domaine du constat, l'expertise s'est attachée à **étudier des pistes de changement** permettant de pointer des stratégies d'adaptation des systèmes de production agricole à une fréquence accrue de sécheresse.

Méthode et portée de l'ESCO

Le travail des experts consiste en une analyse critique d'articles scientifiques dont ils extraient, analysent et assemblent les éléments utiles pour éclairer les questions posées. La recherche de la littérature scientifique internationale existante est réalisée dans les quelques bases bibliographiques qui font autorité dans les domaines concernés (voir Annexe 2).

L'ESCO ne consiste pas seulement dans l'assemblage des résultats de recherche issus de l'analyse bibliographique. Elle fournit des clés pour la compréhension des questions posées, tant au plan des définitions, notions et concepts, que du rappel des grands mécanismes biophysiques, des phénomènes majeurs, de la hiérarchie des facteurs, traçant ainsi le cadre conceptuel qui permet de structurer l'analyse et de faciliter son appropriation par les acteurs sociaux impliqués dans le débat. L'ESCO ne formule ni avis ni recommandations, et ne comporte pas de dimension prospective.

Les compétences nécessaires pour traiter ces questions dans le collectif d'experts relèvent de l'hydrologie, la bioclimatologie, l'écophysiologie, l'agronomie aux différents niveaux d'organisation pertinents (culture, système, exploitation), l'économie des ressources naturelles, le droit, la géographie et la sociologie. Cette association de disciplines différentes a permis d'intégrer des niveaux de complexité croissants de la plante aux systèmes de culture et de production, en incluant les aspects socio-économiques.

Pour ce travail, l'INRA a mobilisé un collectif de vingt-cinq experts dont les deux tiers environ sont des chercheurs de l'INRA, les autres appartenant à d'autres établissements publics (Université, Cemagref, ENGREF, CNRS, Ecole des ponts et chaussées, Météo-France) ; une douzaine d'autres experts ont été sollicités pour des contributions plus ponctuelles.

Spécificité des conditions françaises et utilisation des ressources bibliographiques

La situation pédoclimatique française apparaît particulière, avec un risque de sécheresse que ne connaissent pas les pays plus septentrionaux, et qui ne correspond pas non plus à l'aridité observée dans les pays plus méridionaux. Cette spécificité limite les possibilités de transposition en termes d'analyse de cas dans cette étude demandée par des décideurs français. En France même, la reconnaissance encore récente de l'importance de ce risque de sécheresse explique que peu d'équipes de recherche travaillent sur ce sujet. Elles sont majoritairement situées dans la région toulousaine, qui possède le seul dispositif, pluri-organismes, d'essais agronomiques dédié à ces questions.

La bibliographie disponible concerne principalement les outils méthodologiques relatifs au bilan hydrique et la réponse des plantes et des systèmes de culture aux situations semi-arides, assez éloignées de nos conditions tempérées à sécheresses aléatoires, même si elles deviennent plus fréquentes. Le problème est identique pour la littérature en économie agricole, dans laquelle l'eau comme facteur de production limité (et coûteux) fait surtout l'objet de recherches dans les zones (semi)-arides (Israël, Ouest américain...) ; pour ces zones géographiques, les conditions climatiques extrêmes ne sont pas considérées comme des phénomènes épisodiques, mais sont intégrées depuis longtemps dans la définition des systèmes de culture viables.

La bibliographie produite à partir des travaux conduits sur les zones semi-arides reste appropriée à notre questionnement pour ce qui concerne les apports de la génétique. En revanche, elle ne suffit pas à répondre aux questionnements multiples concernant nos systèmes de culture et d'élevage dans les contextes pédoclimatiques très différenciés de l'hexagone. La bibliographie comporte aussi d'importantes lacunes : pour ne prendre que la question de la ressource en eau, aucune approche globale croisant systèmes de culture, climat et caractéristiques des sols n'a jamais été entreprise, les études publiées, méthodologiques ou études de cas, se contentant d'en émettre le vœu en conclusion.

Lacunes et controverses

L'ESCO se fixe pour objectif de dégager, dans le corpus des connaissances scientifiques disponibles, les incertitudes, lacunes et controverses. Si les questions de la mobilisation des ressources en eau communes par l'agriculture, de l'indemnisation par la collectivité des producteurs en cas de sécheresse ou des solutions que pourraient apporter les biotechnologies à moyen terme peuvent susciter des controverses sociétales, celles-ci ne renvoient pas toujours à des controverses à caractère scientifique. L'analyse a plutôt mis en évidence des lacunes et des incertitudes, liées notamment au caractère récent de l'intérêt que suscitent ces questions d'adaptation de l'agriculture au risque de sécheresse, à la diversité des situations de terrain, qui ne font pas l'objet des études systématiques qui permettraient d'affiner les analyses génériques, ou aux difficultés de la modélisation. Ainsi, l'existence d'un changement climatique n'est plus guère contestée dans la communauté scientifique, et les incertitudes se traduisent par des scénarios.

Des controverses existent en revanche en génétique quant à l'appréciation de la vitesse à laquelle les biotechnologies apporteront des solutions techniques à la sécheresse. Ces possibilités sont quasi-immédiates pour les auteurs qui s'intéressent surtout à la survie des plantes en conditions très sèches, à plus long terme pour ceux qui s'intéressent à la production en conditions de sécheresse agricole. Des foyers de controverses actifs existent également dans le domaine des sciences sociales, de nombreux chercheurs contestant l'idée même

d'une "sécheresse" pouvant être définie sur des bases physiques. Pour ces chercheurs, la sécheresse (du moins dans notre pays) doit être analysée comme un *construit social*, construit résultant des rapports contrastés (de représentations, de pouvoir, d'intérêts) qu'entretiennent entre eux les différents acteurs impliqués face à la ressource en eau, rapports qui, selon le contexte local, les opposent ou les unissent autour d'enjeux de partage de l'accès à l'eau.

Pour conclure, il est clair que l'ESCo n'apporte pas de solutions clé en main ou de réponses ponctuelles à des questions pratiques, ni de recettes pour répondre aux besoins d'une éventuelle sécheresse. Elle se situe dans un moyen terme pour l'action dont elle explore différentes options dans les limites des connaissances scientifiques et techniques disponibles à ce jour. Elle vise à dégager des typologies de situations permettant de formuler des propositions et conclusions à caractère générique, qui pourront ensuite être déclinées dans des études de cas, à réaliser en fonction des besoins des gestionnaires locaux.

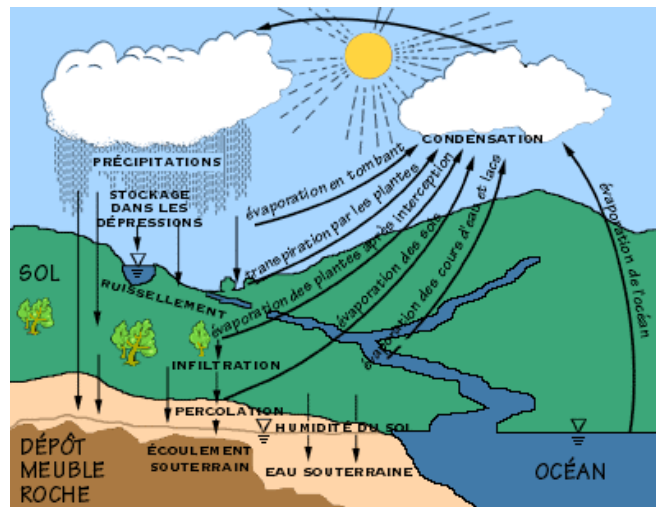
1. Cycle de l'eau, climat, sécheresses

Ce chapitre introductif présente les grandes lignes des relations entre agriculture et sécheresse. Il situe la signification de cette dernière dans le cadre global du cycle de l'eau et rappelle les principales définitions de base qui permettent de quantifier les échanges entre le couvert végétal et l'atmosphère en fonction des propriétés du sol (bilan hydrique et bilan énergétique). Ces échanges traduisent l'action directe du climat sur le fonctionnement hydrique des plantes, mais également l'action inverse de l'agriculture sur le climat. Ce rappel s'appuie sur des éléments bien établis au niveau français et international par des travaux considérés maintenant comme classiques, à travers une sélection d'une cinquantaine d'articles et d'ouvrages. Il est complété par deux parties plus originales : la première est une analyse historique des sécheresses vécues au niveau du territoire français depuis le début du XX^e siècle (à partir d'une recherche bibliographique spécifique exhaustive, qui a permis de collecter une trentaine de références) ; la seconde traite du changement climatique à la fois dans ses projections sur le futur du XXI^e siècle et dans ses manifestations dans le passé récent (un choix a été effectué pour retenir une quarantaine d'articles ou ouvrages considérés comme les plus représentatifs dans la littérature scientifique internationale récente).

1.1. Le cycle de l'eau

L'eau de la planète (environ 1 385 millions de km³) est répartie dans cinq réservoirs interconnectés : les océans, les glaces permanentes, les eaux douces terrestres, la vapeur d'eau atmosphérique et les tissus végétaux (qui représentent moins de 0,0001% de l'ensemble). Ces cinq réservoirs subissent des transferts incessants selon un cycle bien connu, dont la phase initiale est l'évaporation des eaux de surface des océans et des continents. Chaque jour, plus de 1 000 milliards de tonnes d'eau passent dans l'atmosphère, qu'elles quitteront un peu plus tard sous forme de précipitations. Une partie de l'eau retombée subit à nouveau les phénomènes d'évapotranspiration (évaporation à la surface des sols et des organes végétaux, et transpiration des plantes). Le reste est drainé vers les nappes ou ruisselle vers les cours d'eau, et enfin les océans.

Représentation schématique du cycle de l'eau à l'échelle globale (d'après le site www.oieau.fr)



Une partie des précipitations, suivant leur intensité, la topographie et l'imperméabilité de l'état de surface, ruisselle vers les exutoires et alimente plus ou moins immédiatement le réseau hydrographique. L'essentiel cependant pénètre dans le sol (après une interception éventuelle par le couvert végétal) et s'y stocke en remplissant le réservoir superficiel du sol, dont la capacité de rétention est déterminée par sa "réserve utile" (RU). L'eau stockée temporairement dans ce réservoir retournera vers l'atmosphère, par évaporation du sol ou transpiration des plantes.

A la borne inférieure du système sol, l'eau en excès s'évacue (drainage) par percolation. Si le sous-sol est perméable, l'infiltration est essentiellement verticale et va alimenter la nappe phréatique (eau interstitielle, dans des alluvions ou les pores d'une roche). Si l'eau rencontre une couche imperméable, elle s'écoule latéralement et rejoint alors le réseau hydrographique de surface. A l'inverse, dans les situations de forte sécheresse persistante, comme cela a pu être observé en 1976, le réservoir du sol peut être alimenté par des remontées capillaires venant des couches profondes du sol.

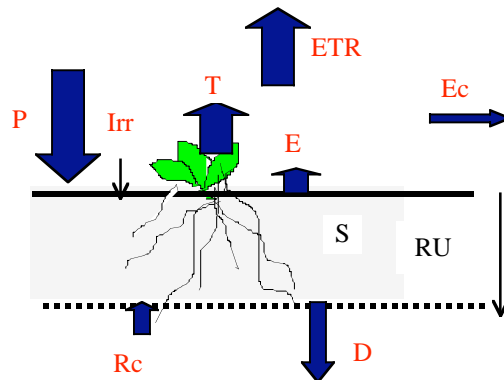
Lorsque l'on considère l'alimentation des ressources en eau d'un territoire, le bilan hydrologique permet d'évaluer la contribution de la recharge par les épisodes pluvieux par l'estimation de la "pluie efficace", somme du ruissellement R et du drainage D.

En moyenne, le territoire métropolitain reçoit annuellement 479 milliards de m³ de précipitations, dont environ 300 sont évaporés, 75 alimentent les rivières, lacs et retenues, et 100 les nappes. L'analyse au niveau du territoire français montre que la quantité d'eau restituée au milieu (par ruissellement et drainage) pour un sol couvert uniformément de prairie, avec une RU moyenne de 126 mm, peut s'exprimer par la relation : $D + R = 0,75 (P - 450)$ en mm. Ce résultat confirme la règle générale de répartition de la pluie entre 2/3 qui partent en évapotranspiration et 1/3 qui s'écoule vers un cours d'eau ou une nappe.

1.1.1. Bilan hydrique (échelle de la parcelle)

Parallèlement à cette vision hydrologique, privilégiée pour l'analyse de la ressource en eau, le point de vue agronomique conduit plutôt à évaluer le bilan hydrique à l'échelle d'un couvert végétal ou d'une parcelle cultivée.

Schéma du bilan hydrique à l'échelle d'un couvert végétal



Les éléments du bilan sont :

- le réservoir sol (S) de capacité RU (réserve utile),
- les entrées : P (pluie) - E_c (écoulement) + I_{rr} (irrigation) + R_c (remontées capillaires),
- les sorties : ETR (évapotranspiration, somme de l'évaporation du sol E et de la transpiration du couvert T) et D (drainage).

Sur un intervalle de temps donné (année, cycle cultural...), le bilan hydrique permet d'écrire la variation du stock d'eau du sol ΔS comme suit : $\Delta S = (P + I_{rr} + R_c) - (E_c + ETR + D)$

Ce bilan peut être considéré sous les deux angles vus précédemment :

- sous l'angle hydrologique : sachant que la variation de stock du sol est, en général, négligeable à l'échelle annuelle, la restitution au milieu est représentée par les sorties E_c+D (pluie efficace des hydrologues). En cas d'apport d'eau par irrigation, le bilan net pour la ressource en eau sera égal à (E_c+D) - I_{rr}
- sous l'angle agronomique : l'eau disponible pour l'évapotranspiration ETR (sur la saison de culture ou sur une période plus courte) proviendra de la pluie pénétrant dans le sol (P- E_c) et du stock d'eau disponible du sol, éventuellement complétés par l'eau d'irrigation I_{rr}.

Se placer, à titre de simplification, en situation topographique plate et à l'échelle de la parcelle qui permettent de négliger le terme de ruissellement ou d'écoulement E_c, revient à considérer :

- l'eau disponible pour la recharge du milieu : $D - I_{rr}$;
- celle utilisable par la culture : $P + \Delta S$.

Cette écriture du bilan hydrique, que ce soit sous l'angle hydrologique ou agronomique, fait intervenir indirectement une régulation par le terme d'évapotranspiration réelle ETR, dont il faut maintenant préciser la signification et le déterminisme.

L'évapotranspiration (ET) est la somme de l'évaporation du sol et de la transpiration de la végétation. Elle dépend du bilan de l'eau disponible, mais également de la demande en eau exprimée par le climat. Lorsque l'eau n'est pas limitante, en effet, l'ET d'une surface est déterminée par le bilan énergétique de surface. Ce qui conduit à considérer 3 niveaux :

- l'ETP (potentielle), appelée aussi ET_{réf}, qui est l'évapotranspiration d'un couvert standard en alimentation hydrique non limitante (gazon irrigué - de fétuque, ray-grass ou autre en fonction du climat). Elle est déterminée par le bilan énergétique de surface de ce couvert et peut être évaluée à partir des données climatiques ;
- l'ETM (maximale), qui est définie pour un climat et une végétation donnés en conditions d'eau non limitée ; elle exprime donc la demande en eau exercée sur ce couvert végétal ; elle est inférieure à l'ETP tant que le couvert végétal n'est pas couvrant. Elle équivaut à l'ETP dès que la surface foliaire atteint 3 m² / m² au sol et peut même être légèrement supérieure (de l'ordre de 10%) pour des végétations développées et irriguées ;
- l'ETR (réelle), qui est inférieure à ETM si l'eau est limitée.

L'évaporation du sol dépend de l'humidité du sol et de la "demande climatique" (fonction du rayonnement, du vent) ; elle est plus ou moins atténuée en présence d'un couvert végétal, et est réduite par l'effet "mulch" sur sol nu (couche superficielle desséchée qui diminue fortement la conductivité hydraulique du sol).

La transpiration de la végétation dépend en premier lieu de la demande climatique, modulée en fonction de la surface foliaire (donc du stade de développement et de la croissance de la plante) et de la "résistance" que la feuille oppose à la transpiration (résistance dépendant de la plus ou moins grande ouverture de ses stomates).

L'enjeu du calcul de l'évapotranspiration, qui suppose un certain nombre de choix méthodologiques et d'approximations, est l'estimation des besoins en eau d'une culture dans des conditions données, de son bilan hydrique propre et donc de sa contribution au bilan hydrique local. Des données expérimentales ont permis d'affiner progressivement les références pour toutes les cultures et les conditions climatiques, d'ajuster et de paramétrer les lois biophysiques qui, intégrées dans des modèles de fonctionnement des cultures, permettent de calculer les composantes des bilans hydriques pour toutes les combinaisons {climat x sol x culture}, avec une marge d'incertitude de l'ordre de 10%.

1.1.2. Bilan énergétique

Le niveau de l'ETR d'une surface naturelle dépend d'une interaction permanente entre son bilan hydrique et son bilan énergétique, par ajustement entre "l'offre possible" à partir du premier et la "demande climatique" exercée par le second. Cet ajustement résulte du fait que l'évaporation de l'eau nécessite la disponibilité d'énergie au niveau de la surface ; cette énergie consommée par le changement d'état de l'eau est la chaleur latente de vaporisation, notée L (de l'ordre de 600 calories pour un gramme d'eau).

Le bilan énergétique fait intervenir, en premier lieu, l'énergie radiative disponible pour une surface au sol, qui correspond au rayonnement net $R_n = (1 - \alpha) R_g - (R_a - R_s)$, tenant compte du rayonnement solaire absorbé $(1 - \alpha) R_g$ par une surface d'albedo α recevant un rayonnement solaire global R_g , mais aussi des rayonnements de grande longueur d'onde reçus par la surface en provenance de l'atmosphère (R_a) et émis par la surface (R_s).

A chaque instant, cette énergie est convertie en flux de chaleur échangés par la surface avec l'atmosphère sous forme latente ($L \times ETR$) ou sensible par convection (H), ainsi qu'avec le sol sous-jacent par conduction (G). Le bilan d'énergie instantané s'écrit donc : $R_n = L \times ETR + H + G$. A chaque instant, la conjonction de ce bilan énergétique et de la disponibilité de l'eau en surface résultant du bilan hydrique ne connaît mathématiquement qu'une solution traduisant l'état d'équilibre, qui peut d'ailleurs être déterminé par des modèles physiques opérationnels permettant de le caractériser.

1.1.3. Conséquences pour le microclimat (échelle locale) et le climat (échelle régionale)

Lorsque la disponibilité de l'eau est limitante, des quantités plus faibles que l'énergie potentiellement disponible sont dépensées ($ETR < ETM$), et l'énergie non dissipée par évaporation conduit à un échauffement de la surface. Au niveau d'une feuille ou d'un couvert végétal, cet échauffement peut atteindre plusieurs degrés. Il est encore plus élevé pour un sol nu et peut atteindre 20 à 30°C dans les situations sèches extrêmes.

Cet échauffement se transmet aux couches d'air proches, avec un amortissement de l'ordre de 1 à 10°C pour la température de l'air à 2 m, qui peut s'élever de plusieurs degrés. Ce phénomène peut avoir un impact sur le microclimat d'une parcelle bien alimentée en eau par rapport à une même culture en sec. Il est susceptible de créer des écarts du même ordre à l'échelle d'une petite région, si une part importante du territoire est soumise aux mêmes conditions. Cet effet a été mesuré dans le cas de la Crau, dont une partie est irriguée et l'autre non : la différence de température enregistrée entre les deux zones est de l'ordre de 2°C en été (à la hauteur standard de 2 m du sol), c'est-à-dire du même ordre de grandeur que le réchauffement climatique prévu pour la fin du siècle. Enfin, à l'échelle globale, les variations de flux d'évaporation (et donc de chaleur latente) sont susceptibles de créer des variations de température du même ordre, en fonction de modes d'usage des sols contrastés du point de vue hydrique.

Cette conjonction "sec/chaud" lorsque l'alimentation hydrique est la seule variable se retrouve donc à toutes les échelles, de la feuille au continent. Par rapport à la sécheresse, elle explique le lien qui existe fréquemment (voir 1976 ou 2003) avec la canicule, la faible humidité des sols entraînant un réchauffement qui peut entretenir la persistance de conditions sèches.

1.2. Les sécheresses

Le terme général de "sécheresse" recouvre des notions différentes. En premier lieu, dans son acception générale, elle est bien sûr toujours liée à un déficit de la pluviométrie. Toutefois, lorsque ce déficit est systématique, on parle d'aridité. Hors de ces zones désertiques ou arides, la sécheresse est plutôt ressentie comme un épisode, et classée, par les climatologues, dans la catégorie des événements extrêmes. Elle se définit alors par l'intensité de sa déviation par rapport aux valeurs moyennes ou normales de pluviométrie, avec des éléments quantitatifs sur sa durée, sa période d'occurrence et son extension géographique.

A l'heure actuelle, aussi bien au niveau mondial (Organisation Météorologique Mondiale) qu'au niveau du territoire français (Météo-France), la caractérisation de la sécheresse en tant qu'événement extrême est limitée à

la durée des épisodes (nombre de jours consécutifs sans pluie). Cette mesure reste assez peu informative lorsqu'on veut analyser les conséquences sur l'agriculture. Un exemple de caractérisation plus complète du point de vue climatologique est présenté dans un rapport récent de l'université Columbia de New York pour la Banque mondiale, qui a proposé une cartographie des risques de pertes économiques liés à la sécheresse à partir des données climatiques de la période 1980-2000 : le critère climatologique retenu est la fréquence d'épisodes avec 3 mois consécutifs de pluviométrie inférieure à 50% de la normale. Selon ce critère, le sud de la France figure parmi les zones du globe à risques de dommages élevés.

Quel que soit le critère retenu, cependant, ne considérer que la pluviométrie est évidemment insuffisant si l'on s'intéresse aux conséquences pour l'agriculture, puisque le rappel précédent sur le cycle de l'eau et le bilan hydrique des cultures a souligné le poids des autres facteurs climatiques intervenant sur l'ETP, ainsi que des propriétés du sol et de la culture. Au-delà du seul déficit pluviométrique, ou du déficit climatique ETP-P sur une saison, on est amené à distinguer :

- la sécheresse "édaphique", causée par une insuffisance de l'eau dans le réservoir superficiel du sol pendant la saison de culture. C'est la sécheresse classique en agriculture, causée par l'insuffisance des pluies de printemps et d'été ;
- la sécheresse "hydrologique", causée par une reconstitution déficiente des réserves hydrographiques, résultant plutôt de l'insuffisance des pluies d'automne-hiver.

Schématiquement, le premier type joue directement sur la production agricole, le second indirectement par la disponibilité de l'eau pour l'irrigation. A noter également que, dans ce cas, la sécheresse peut affecter le rendement par suite des effets néfastes pour le travail du sol et les semis.

Ces sécheresses se différencient par leur intensité, leur dynamique de mise en place (brutale ou progressive), leur durée (sécheresse intermittente ou prolongée) et leur époque d'apparition par rapport au cycle cultural :

- . sécheresse d'automne : liée à un retour différé des pluies (alors que le sol est sec en fin d'été) ;
- . sécheresse d'automne-hiver : liée à un déficit pluviométrique à une période où pluies et faible évaporation permettent en général un recomblement en profondeur de la réserve en eau du sol consommée lors de l'été précédent (cas de 1988-89 et 1989-90) ; elle compromet donc la recharge des nappes via le drainage et le remplissage des lacs collinaires et donc des possibilités d'irrigation l'été suivant ;
- . sécheresse de printemps : souvent intermittente, parfois durable (sécheresse de 1976...) ;
- . sécheresse d'été (parfois très marquée comme en 1986 et 2003), habituelle dans la plupart des régions, en raison du développement de la végétation, de l'augmentation de la demande évaporative, de pluies estivales plus aléatoires ; la sécheresse se manifeste plus ou moins précocement selon le type de sol et les besoins en eau. C'est le scénario le plus courant sur le plan agronomique.

L'analyse des principaux épisodes depuis 1976 fait apparaître une dizaine d'années marquées par la sécheresse à partir de 1986 ; les zones concernées se situent évidemment en majorité dans le sud, mais avec des occurrences notables également dans l'ouest et le nord. La situation de sécheresse hydrologique seule (suivie par un printemps-été pluvieux) est exceptionnelle (1992) ; le plus souvent, la sécheresse hydrologique se combine ensuite avec la sécheresse édaphique qui la suit. C'est souvent la conjonction d'une sécheresse d'hiver et/ou de printemps et d'une sécheresse estivale marquée qui est à l'origine des sécheresses exceptionnelles : on passe d'une sécheresse intermittente à une sécheresse continue, qui réduit les possibilités de récupération des cultures. Cela a été le cas en 1976, comme en 1989, 1996 et 2005. Par contre, l'été 2003 a été précédé par un hiver et un printemps normalement pluvieux. Il n'est pas possible à l'heure actuelle de tirer des enseignements précis de ces observations.

Types des principales sécheresses depuis 1976

Type	1976	1979	1985	1986	1989	1990	1991	1992	1996	2003	2004	2005
hydrologique								X				
édaphique		X Méditerran.	X Centre & Sud	X Centre & Sud		X Ouest & Sud	X Nord			X 2/3 du territoire		
succession hydrologique/édaphique	X Nord				X Ouest				X Nord & Ouest		X Sud	X 2/3 du territoire

1.3. Le changement climatique

Les interrogations sur l'influence possible des activités humaines sur le climat de la planète sont apparues dans les années 1970, en lien avec les observations sur l'augmentation de la concentration en dioxyde de carbone ou gaz carbonique (CO₂) dont le niveau actuel dépasse les 370 ppm, contre 260 à l'époque préindustrielle. Depuis 1750, la concentration atmosphérique de CO₂ s'est accrue d'un tiers. D'autres gaz, présents naturellement à l'état de traces, comme le méthane (CH₄) et le protoxyde d'azote ou oxyde nitreux (N₂O), s'accumulent également dans l'atmosphère et contribuent au renforcement de l'effet de serre naturel. Pour la fin du siècle, les modèles prévoient des concentrations atmosphériques en CO₂ comprises entre 540 et 970 ppm.

L'accroissement moyen de la température de surface est estimé devoir être de 1,5 à 6°C entre 1990 et 2100. Il est presque certain que toutes les surfaces continentales se réchaufferont plus rapidement que la moyenne, particulièrement celles situées à haute latitude, en saison froide. Les prédictions sur la pluviométrie sont un peu plus incertaines, compte tenu de la complexité du cycle de l'eau, mais elles font état en général d'une légère augmentation de la pluviométrie, avec une tendance à la diminution de la pluviométrie estivale dans les zones tempérées de moyenne latitude, qui serait plus marquée sur le pourtour méditerranéen. Par ailleurs, en dehors de ces variations du climat moyen, il est vraisemblable que le changement climatique s'accompagne d'un accroissement de la variabilité et des extrêmes.

. Scénarios de réchauffement et d'évolution des précipitations

La température moyenne de surface a augmenté de 0,6°C (avec une incertitude en plus ou en moins de 0,2°C) depuis 1860. Le XX^e siècle a probablement été le siècle le plus chaud depuis 1 000 ans et la décennie 1990 a connu le réchauffement le plus important de ce siècle. Ces données purement climatiques sont corroborées par des observations sur des indicateurs qui en dérivent directement : diminution de la surface de couverture neigeuse et des glaciers de montagne ou de la glace de mer, élévation du niveau de la mer, etc.

Le consensus est donc désormais quasi-général sur l'existence d'un réchauffement. Ses effets sont déjà observables : avancement avéré des dates de floraison en verger, de vendange, de moisson... Cette augmentation des températures a des effets directs sur la demande en eau (augmentation de la demande évaporative par accroissement du déficit de saturation de l'air), et des effets indirects par des impacts sur le cycle de développement des cultures (décalage phénologique, allongement de la période de végétation d'espèces pérennes et raccourcissement du cycle d'espèces annuelles...). L'accentuation du réchauffement pourra aussi conduire à un dépassement de l'optimum thermique pour certaines espèces, d'ailleurs encore mal identifié précisément.

Concernant les évolutions des niveaux et de la répartition, spatiale et temporelle, des précipitations, les modèles sont moins assurés que pour l'évolution des températures. Les scénarios disponibles prévoient plutôt une accentuation des différences régionales (Sud encore plus sec) et saisonnières (pluies plus abondantes en période hivernale et moindres en été), ainsi que des risques accrus d'événements extrêmes.

Valeurs typiques de changements climatiques : moyennes sur la France entre la période 2070-2099 et la période 1960-1989 (Simulations climatiques Météo-France et IPSL)

	Températures			Précipitations		
	Année	Hiver	Eté	Année	Hiver	Eté
Scénario B2	+2 à +2,5°	+1,5 à +2°	+2,5 à +3,5°	-5 à 0%	0 à +10%	-25 à -5%
Scénario A2	+3 à +3,5°	+2,5 à +3°	+4 à +5°	-10 à 0%	+5 à +20%	-35 à -20%

. Conséquences possibles pour l'agriculture

Le changement climatique va modifier les données d'entrée en créant des conditions, souvent plus favorables, parfois plus défavorables, suivant les productions. L'augmentation du CO₂ va potentiellement stimuler la photosynthèse des couverts végétaux et améliorer l'efficacité de l'eau par l'augmentation de la résistance stomatique, en créant des conditions permettant d'augmenter la production de biomasse de l'ordre de 20%. Les scénarios "fin de siècle" font cependant intervenir des effets de compensation, avec le raccourcissement du cycle de végétation. Il faut également prendre en compte une augmentation du rayonnement solaire (dû à une plus faible nébulosité dans les conditions de sécheresse, comme on a pu le voir depuis 2003).

A priori, les grandes cultures et les prairies devraient être plutôt favorisées, sauf dans le sud où apparaît le risque de sécheresses accentuées, accompagnées de températures élevées. Pour les arbres fruitiers et la vigne, l'avancée généralisée de la phénologie peut poser des problèmes de risque de gel au moment de la floraison, et de qualité par avancée des stades sensibles. Une adaptation locale basée sur les composantes techniques (choix des variétés, pratiques culturales), qui a fait ses preuves dans le passé, paraît en mesure d'amplifier les effets positifs et de limiter les effets négatifs, sous réserve que l'eau soit disponible pour l'irrigation. Un déplacement géographique des cultures vers le nord est à anticiper, mais il n'est pas directement envisageable pour les productions liées au terroir, comme le sont les AOC.

Par rapport à l'alimentation hydrique des cultures, le principal facteur d'inquiétude est la baisse prévue de la pluviométrie estivale, particulièrement en zone sud, qui amplifierait les risques de sécheresse édaphique ; il n'est toutefois guère possible de savoir si la baisse de la pluviométrie sera assez uniformément répartie entre les années ou si elle se traduira par un plus grand nombre d'années de forte sécheresse que dans le passé. Par contre, la situation devrait être un peu plus favorable pour les ressources en eau, sous réserve que les précipitations ne soient pas trop violentes. Au niveau de la demande en eau pour l'irrigation, si l'augmentation de température et surtout celle du rayonnement solaire liée à une couverture nuageuse plus faible conduisent à une demande climatique accentuée, le raccourcissement du cycle du végétal (et à plus long terme l'accroissement de la résistance stomatique avec l'élévation du CO₂ atmosphérique) introduisent des effets de compensation. C'est

donc plutôt, au total, le risque d'accroissement de sécheresse édaphique qui est à retenir ; dans cette logique, l'année 2003 est tout à fait représentative de ce qui nous attendrait une année sur deux aux alentours de 2050.

. Les sécheresses sont-elle plus fréquentes ?

Si les épisodes secs paraissent plus fréquents après 1976 (cf. tableau en section 1.2.), il ne faut pas oublier qu'on en a dénombré 5 de 1906 à 1938 (dont 1921, avec 238 mm de précipitations à Paris), puis une période sèche entre 1942 et 1949, et 4 sécheresses de 1953 à 1964. Cependant, d'après Météo-France, il apparaît une légère tendance en termes d'événements extrêmes (nombre de jours consécutifs sans pluie) dans le sud, confortée par une diminution de la pluviométrie estivale (de 10% sur les 20 dernières années), toujours dans le sud.

Par définition, les sécheresses sont des événements peu fréquents, pour lesquels les tendances sont plus difficiles à établir que pour des phénomènes continus comme l'augmentation des températures. Il est donc encore prématuré d'établir que ces sécheresses récentes sont des manifestations du changement climatique global. On peut toutefois remarquer que ces années, en particulier 2003, présentent des conditions proches des scénarios envisagés pour les dernières décennies du XXI^e siècle.

. Le futur et le passé récent

L'hypothèse qui apparaît maintenant la plus probable, si l'on considère l'horizon 2010-2020, est celle d'une persistance de ces épisodes secs plutôt que l'inverse. Les modèles de climat ne sont pas adaptés à des simulations concernant ce futur proche. En tenant compte de la tendance récente dans le même sens que les scénarios de changement climatique à long terme, il est difficile d'aller pour cet horizon au-delà des éléments suivants : 1°C en plus en moyenne, et plutôt une probabilité plus forte de risques de répétition d'épisodes du type 2003-2005/2006 que l'inverse. La préfiguration de l'avenir proche passe donc par l'analyse du passé récent.

L'hypothèse d'une accentuation des différences entre saisons, avec des précipitations accrues en période hivernale et une sécheresse estivale plus marquée, pose la question d'un renforcement, dans les régions où domine l'écoulement superficiel, des capacités de stockage d'eau pour l'irrigation. Mais elle constitue aussi un élément qui peut renforcer les choix d'espèces cultivées et les techniques de culture conduisant à exploiter au mieux, plus tôt dans la saison qu'actuellement, l'eau stockée dans le sol qui serait augmentée en début de saison.

2. Agriculture et ressources en eau

L'agriculture dépend évidemment des ressources en eau disponibles (pluies, réserves du sol et irrigation), puisque la production végétale est fortement dépendante de la quantité d'eau évapotranspirée par les cultures. Mais on peut aussi considérer le point de vue inverse : l'agriculture, par les modes d'occupation des sols qu'elle détermine au niveau local ou régional, participe directement au cycle de l'eau en déterminant la part de l'eau des pluies qui est évapotranspirée et retourne ainsi vers l'atmosphère, et la part qui ruisselle et/ou draine et rejoint ainsi les aquifères ou le réseau hydrographique pour reconstituer les réserves d'eau locales.

Ainsi l'impact des différentes formes d'agriculture sur la reconstitution des réserves hydriques à l'échelle d'un territoire doit en premier lieu s'analyser par comparaison avec des surfaces non cultivées et donc couvertes d'une végétation plus ou moins spontanée et pérenne : forêts, landes, prairies naturelles... Ces surfaces, du fait de leur couverture végétale pérenne, consomment de l'eau en permanence, et certaines (forêts) peuvent extraire de l'eau du sol sur de grandes profondeurs. Par contre les surfaces cultivées sont maintenues avec des proportions plus ou moins importantes de sols nus selon les périodes de l'année en fonction des systèmes de culture pratiqués, ce qui limite les pertes en eau. En effet, le sol en se desséchant en surface réduit fortement son évaporation par effet "mulch". Il en résulte en général de plus grandes quantités d'eau drainée en période hivernale sous les surfaces cultivées que sous les surfaces boisées ou en prairie.

2.1. Bilans entre prélèvements et restitution de l'eau au milieu

Peu de références bibliographiques sont disponibles concernant l'effet des modes d'occupation des sols à l'échelle régionale sur les bilans hydriques et la recharge des nappes. L'expertise s'est donc appuyée essentiellement sur trois études fondées sur la mise en œuvre de modélisations plus ou moins détaillées de bilan hydrique appliquées à différents scénarios de modes d'occupation des terres, en fonction du type de sol et de la variabilité climatique locale. Ces études ont donc un caractère exploratoire permettant de dégager de grandes tendances.

Les études de bilans hydriques sous différents modes d'occupation des sols ont permis de quantifier dans certaines conditions ce surplus d'eau drainée des surfaces agricoles par rapport aux surfaces non cultivées. Ainsi, dans des sols à réserve hydrique moyenne dans les Charentes, une rotation maïs-blé permet d'augmenter en moyenne de 100 mm la hauteur de la lame d'eau drainante par rapport à un même sol qui serait maintenu

sous un couvert de prairie. On voit par ailleurs que la pratique de l'agriculture ne réduit que de 50 mm la quantité d'eau drainée par rapport à un sol maintenu nu toute l'année.

Drainage annuel moyen en fonction du mode d'occupation du sol
Moyenne 1971-2000, à Ruffec (Charentes), pour un sol de réserve utile de 100 mm
(d'après F. Levraut, Agro-Transfert Poitou-Charentes, 2005)

	Sol nu	Maïs / blé	Prairie
Drainage annuel (mm)	406	353	251

Ce surplus de drainage entre culture et prairie serait augmenté dans des sols à réserve utile plus grande, mais diminué dans des sols à faible réserve utile. Enfin, une forêt, du fait de son enracinement profond, aurait tendance à accroître cet écart.

Cet effet est également dépendant du système de culture pratiqué. Les cultures d'hiver (céréales à paille, colza), dont la phase de croissance active se déroule durant la phase de faible demande évaporative mais dont la durée de végétation est plus longue, consomment globalement à peu près autant d'eau que les cultures d'été (maïs, soja, sorgho, tournesol) à cycle plus court mais soumis à une demande évaporative plus forte. La différence essentielle entre ces deux types de culture tient au fait que les premières ne sollicitent pas les réserves hydriques du sol en période estivale, ce qui permet une reprise du drainage plus précoce à l'automne au retour des pluies. Cette différence entre cultures d'hiver et d'été sera accentuée dans les sols à forte réserve hydrique.

Par le choix des systèmes de culture et leur localisation en fonction des types de sols, on voit qu'il est théoriquement possible d'agir de manière conséquente à l'échelle d'un bassin versant sur les quantités d'eau qui retournent vers les aquifères. La pratique de l'irrigation contribue évidemment à augmenter les pertes par évapotranspiration, mais d'une manière générale, on évite par là une sollicitation importante des réserves hydriques des sols en été, ce qui se traduit par un supplément de drainage à l'automne et en hiver.

L'effet global de l'agriculture à l'échelle d'un territoire sur les ressources en eau peut être évalué par le bilan entre drainage et irrigation. Ce bilan correspond à la restitution nette d'eau au milieu. A titre d'illustration, ce bilan a été calculé pour un certain nombre de régions françaises en supposant le sol couvert par une prairie irriguée. Cela revient à maximiser le poste irrigation puisque la prairie irriguée consomme globalement une quantité d'eau qui est par définition égale à l'évapotranspiration potentielle.

Différences moyennes entre le drainage D et l'irrigation I (en mm) pour une prairie irriguée
(d'après Brisson et al., 2006)

Picardie	Ile-de-France	Bretagne	Poitou-Charentes	Midi-Pyrénées	Champagne-Ardennes	Alsace	Bourgogne	Auvergne	PACA
-9	102	84	209	-82	161	-124	131	171	-178

Ce solde D-I est positif dans la majorité des régions étudiées, ce qui signifie qu'à l'échelle d'un territoire l'irrigation peut être théoriquement assurée par la reconstitution des réserves hydriques locales. Par contre, trois régions, Midi-Pyrénées, Alsace et PACA, présentent un solde négatif, ce qui implique que l'irrigation dans ces régions ne peut se concevoir sans l'appoint de réserves hydriques exogènes au territoire considéré.

Il est possible d'analyser ces bilans d'une manière plus réaliste au niveau agricole en étudiant l'impact de différents systèmes de culture sur ce bilan Drainage - Irrigation. Le tableau ci-dessous indique les systèmes de culture qui ont été étudiés dans trois régions différentes.

Région	Système A <i>Irrigué à 100% des besoins</i>	Système B <i>Irrigation de complément</i>	Système C <i>Non irrigué</i>
Ile-de-France (Versailles)	Maïs Blé dur Betterave Blé tendre	Colza (sec) Blé tendre (irrigation à 50% des besoins) Escourgeon (sec)	Tournesol Blé tendre Pois Blé tendre
Poitou-Charentes (Lusignan)	Maïs	Colza (sec) Blé tendre (irrigation à 50%) Escourgeon (sec)	Tournesol Blé tendre Escourgeon
Midi-Pyrénées (Toulouse)	Maïs	Sorgho (sec) Blé dur (irrigation à 50%) Blé dur (irrigué à 50%)	Tournesol Blé dur

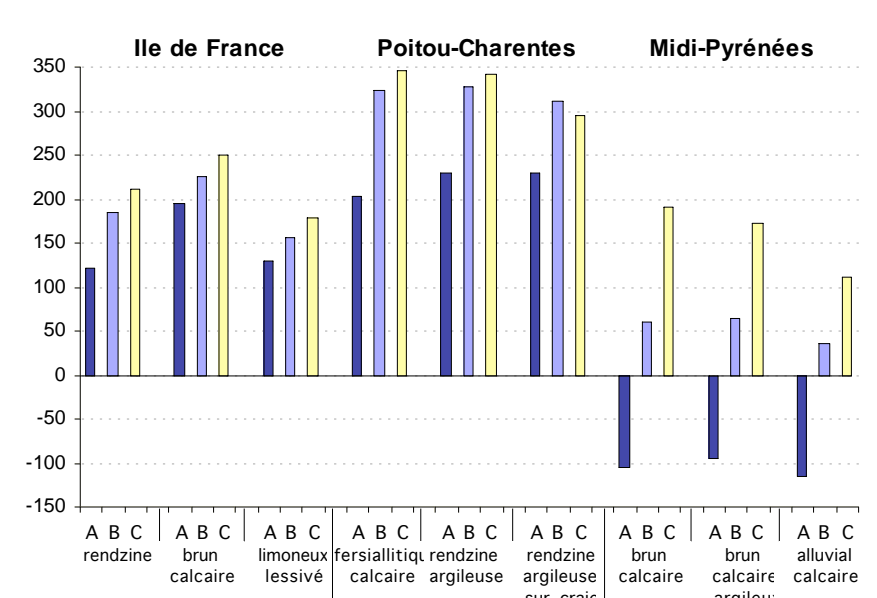
Ces systèmes de culture ont été appliqués sur trois types de sol à réserves utiles contrastées dans chacune des régions.

Bilans Drainage – Irrigation (en mm) pour une prairie et un système de culture non irrigués, dans différentes situations pédoclimatiques (d'après Brisson et al., 2006)

Région	Type de sol	Prairie en sec	Système C
Ile de France	Rendzine	195	240
	Brun calcaire	200	280
	Limoneux lessivé	140	220
Poitou-Charentes	Fersialitique calcaire	330	380
	Rendzine argileuse	305	385
	Rendzine argileuse sur craie	260	330
Midi-Pyrénées	Brun calcaire argileux	155	210
	Alluvial calcaire	130	195
	Brun calcaire	90	135

Les résultats confirment qu'un système de culture de type pluvial permet d'augmenter d'environ 50 à 80 mm la hauteur de la lame d'eau drainante par rapport à une couverture permanente du sol par la végétation. Ainsi, l'occupation des sols par la prairie, bien qu'elle présente des avantages indéniables vis-à-vis de la qualité des eaux et de la régulation du cycle de l'eau (lutte contre l'érosion), est un élément dont il convient de tenir compte dans la gestion quantitative des ressources en eau à l'échelle d'un territoire.

Différences moyennes entre l'irrigation et le drainage (en mm) par type de sol (en abscisse), les sols étant regroupés par région (d'après Brisson et al. 2006)



Lorsque l'on croise les différents systèmes de culture et les différents types de sol dans les trois régions, il ressort que le système A (monoculture de maïs irrigué) en Midi-Pyrénées est déficitaire en terme de reconstitution de réserve hydrique. Il ne peut donc être maintenu dans la durée à l'échelle d'un territoire que si (i) des surfaces suffisantes en système de culture pluvial (C) lui sont spatialement associées, ou que (ii) l'eau d'irrigation est fournie par des ressources hydriques exogènes au territoire. Dans cette région, un système de culture basé sur une irrigation partielle de complément (type B) apparaît en revanche "durable" sur le plan de l'autonomie des réserves hydriques. Cet exemple montre qu'à l'échelle d'un bassin il doit exister une forme d'interdépendance entre les systèmes irrigués et les systèmes pluviaux, et qu'il est impossible de raisonner la gestion des ressources en eau à cette échelle sans prendre en compte de manière explicite cette interdépendance.

Le cas de la région Poitou-Charentes est particulièrement illustratif. C'est la région qui restitue le plus d'eau au milieu (200 à 350 mm en moyenne), et pourtant c'est celle où se pose de manière la plus cruciale le problème de la gestion quantitative des ressources en eau. Cette restitution importante au milieu est essentiellement due à une pluviométrie hivernale importante. L'absence d'aquifères capables de stocker ces eaux excédentaires du fait de l'hydrogéologie de la région est en fait un obstacle à une politique d'extension de l'irrigation. Il n'apparaît alors pas déraisonnable de penser que, dans de telles conditions, une politique favorisant un stockage d'une partie de ces eaux "de passage" afin d'augmenter la ressource utilisable pourrait être compatible avec une politique de gestion durable de la ressource. Cependant l'ensemble des conséquences environnementales liées à la construction de tels ouvrages doit être pris en considération ; ces éléments n'entrent pas dans le champ de notre expertise.

2.2. Les prélèvements d'eau pour l'irrigation

2.2.1. Les prélèvements agricoles

Il s'agit de prélèvements directs dans les masses d'eau naturelles (cours d'eau ou nappes) ou dans des stocks constitués. Ces prélèvements sont évalués par l'IFEN (2003) à 4,8 milliards de m³, soit 14% des prélèvements totaux. L'agriculture restituant moins l'eau (qui s'évapore) au milieu local que les autres activités (production d'énergie, eau potable et industrie), sa consommation nette est estimée à 48%. Les besoins pour l'irrigation étant concentrés en été, la part agricole des prélèvements peut atteindre 80-90% en période d'étiage. Ces données sont cependant peu fiables et il s'agit ici de donner des ordres de grandeur.

Les ressources mobilisées sont aux ¾ des eaux de surfaces, mais les situations sont très contrastées selon les bassins hydrologiques.

Prélèvements pour l'irrigation en 2001 (en millions de m³)

Bassin hydrologique	Rhône-Méditerranée-Corse	Adour-Garonne	Loire-Bretagne	Seine-Normandie	Rhin-Meuse	Artois-Picardie	Total
Prélèvements totaux (Mm ³)	3 009	1 032	505	116	80	25	4 867
dont : eaux superficielles,	2 813 (93%)	671 (65%)	154 (30%)	9 (8%)	9 (11%)	1 (4%)	3 657
eaux souterraines	196 (7%)	361 (35%)	351 (70%)	107 (92%)	71 (89%)	24 (96%)	1 110

Source : IFEN 2004 (données 2001)

2.2.2. Types de ressources en eau et logiques de gestion

Les différents types de masses d'eau superficielles et souterraines ne posent pas les mêmes problèmes de gestion.

. Nappes phréatiques

Il s'agit ici d'aquifères essentiellement alimentés par des écoulements verticaux en provenance du drainage des sols. Il est nécessaire cependant de distinguer les nappes profondes qui se trouvent isolées des sols par l'existence d'une couche géologique imperméable et dont on ignore le taux de renouvellement. Elles constituent des réserves d'eau protégée des pollutions. La loi sur l'eau de 1992 prévoyait que ces nappes soient réservées en priorité aux prélèvements pour l'eau potable. Elles sont malgré tout parfois utilisées pour l'irrigation : par exemple en Poitou-Charentes où elles auraient fourni près de 10% des prélèvements en 2002 (source Agence Adour-Garonne). Dans la majorité des situations, il s'agit donc de nappes peu profondes qui sont en partie réalimentées par le drainage des eaux de surfaces.

Ces nappes posent un double problème de gestion quantitative et qualitative. La Directive "fille" de la DCE portant sur les eaux souterraines oblige au maintien du niveau de ces nappes sur le long terme. Il s'agit d'assurer sur le moyen terme un équilibre entre (i) l'ensemble des prélèvements liés aux différents usages, (ii) les pertes à l'exutoire de ces nappes pouvant alimenter éventuellement des rivières (cas de la Conie pour la nappe de Beauce), et (iii) les apports par le drainage des eaux de surface. Ainsi, selon le caractère plus ou moins fermé de ces nappes, on est amené à promouvoir une gestion de type **réservoir** en tolérant un certain battement du niveau de la nappe, compte tenu de la variabilité interannuelle du climat (pluies hivernales) et du temps de résidence de l'eau entre le sol et la nappe qui détermine l'inertie du système. A ce titre, la gestion de ces types de nappes souffre d'une connaissance imparfaite de leur fonctionnement hydrologique (temps de transit de l'eau, écoulements latéraux et connexion avec d'autres aquifères), qui ne permet pas toujours de prévoir correctement les fluctuations des niveaux piézométriques. Il existe, en particulier, un défaut de continuité entre les études d'hydrologie de surface et les études d'hydrogéologie, qui ne permet pas de faire correctement la liaison entre les effets des modes d'occupation des sols à l'échelle d'un impluvium de nappe et les comportements de celle-ci, faute d'information sur les transferts dans la zone insaturée.

. Cours d'eau et nappes alluviales

Pour ces hydrosystèmes de surface, il s'agit de maintenir un niveau d'alimentation suffisant en période d'étiage, compatible avec leur fonctionnement écologique et avec un certain nombre d'usages tels que la pêche ou la navigation. Ces systèmes sont caractérisés par des écoulements, c'est donc une approche en terme de **débit** et non plus en terme de bilan qu'il est nécessaire d'adopter pour leur gestion. Il s'agit donc dans ces cas (i) de fixer des débits d'étiage pour permettre la survie des espèces aquatiques et éviter en outre une trop forte concentration en polluants ; (ii) d'estimer ainsi le niveau des prélèvements qui peuvent être réalisés à chaque période de l'année compatibles avec le maintien de l'étiage ; (iii) répartir ces prélèvements entre les différents usages selon des priorités à négocier. La caractéristique de ces systèmes tient donc essentiellement à la temporalité des écoulements et donc à la forte temporalité des prélèvements possibles. Ce sont ces

hydrosystèmes qui font essentiellement l'objet des plus grandes restrictions d'usage et des conflits les plus aigus, du fait du retentissement sociétal direct des périodes "d'à sec" des rivières. Là encore, des connaissances plus précises sur le fonctionnement de chacun des systèmes nappe-rivière sont essentielles pour assurer une gestion durable de la ressource, sachant qu'il est techniquement impossible (ou du moins très difficile) d'identifier l'alimentation par les nappes alluviales à l'intérieur des débits des rivières.

. Réservoirs artificiels (barrages-réservoirs et retenues collinaires)

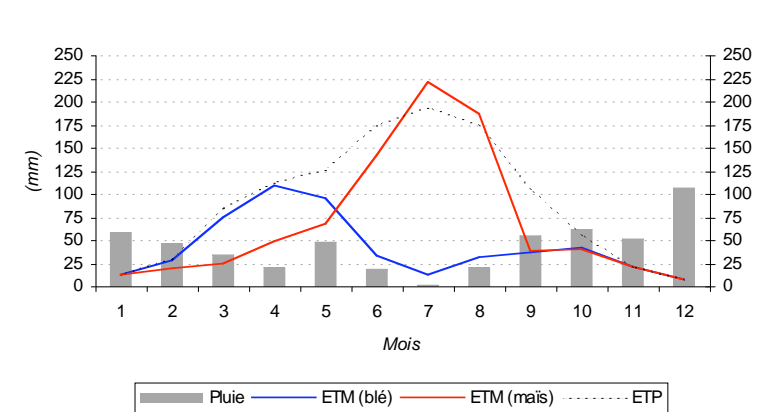
Le principe consiste à stocker de l'eau prélevée dans les cours d'eau ou les nappes d'accompagnement aux périodes où elle est abondante et serait "perdue" par un écoulement vers la mer, voire cause de crues dévastatrices. Ces réservoirs peuvent avoir des tailles très variables et des fonctions différentes : des grands barrages-réservoirs (Serre-Ponçon...), aux simples retenues collectives ou individuelles destinées uniquement à l'irrigation, et des fonctions différentes (production hydroélectrique, soutien d'étiage, irrigation, écrêtage des crues, activités de loisirs...). Les retenues collinaires sont des réservoirs creusés directement à proximité du lit des cours d'eau permettant le pompage dans la nappe alluviale ("bassines" en Charente). Le problème de gestion de ces ressources est du type gestion de bilan. Il s'agit en effet de dimensionner le réservoir en fonction des besoins pour les différents usages, ou à l'inverse adapter les usages à la dimension de la réserve. Concernant les réserves d'eau liées aux barrages hydro-électriques, le problème de la temporalité de l'utilisation de l'eau reste cependant posée puisque ces barrages servent surtout à produire des appoints d'électricité en période de pointe en hiver. Pour les réserves collinaires, il ne peut s'agir simplement d'une captation d'eau considérée comme "perdue" en hiver. Il est cependant important de considérer que les périodes de crues font partie du fonctionnement normal du réseau hydrographique et que même si celles-ci peuvent être avantageusement régulées, on ne peut pas considérer que toute l'eau qui retourne à la mer peut être stockée. Cette possibilité de stockage d'eau pendant les périodes excédentaires doit donc être traitée avec la plus grande prudence en fonction du contexte hydrographique local.

2.3. Agriculture et gestion territoriale des ressources en eau

La gestion quantitative des ressources en eau doit s'analyser au cas par cas à l'échelle des territoires pertinents de manière à prendre en compte les croisements entre (i) les systèmes de culture pratiqués et leur distribution spatiale, (ii) les types de sols, et (iii) les types d'hydrosystèmes. Il est en effet important de considérer les différents types de ressources en eau selon qu'il s'agit (i) de nappes "réservoir" du type de celle de la Beauce où une approche de type bilan annuel reste pertinente, (ii) de rivières avec leurs nappes alluviales associées où l'approche de type bilan n'est plus pertinente et doit être remplacée par une approche de type "débit" qui tienne compte de la temporalité des prélèvements et des restitutions au milieu. Ainsi dans les situations de nappes "réservoir", il doit être possible de déterminer annuellement le volume d'eau moyen qui peut être prélevé dans la nappe pour l'irrigation, compte tenu des autres usages. Il convient alors de valoriser au mieux cette quantité d'eau en l'utilisant sur la culture qui présente la meilleure efficacité de transformation. Dans ce cas l'irrigation du maïs est parfaitement justifiée et compte tenu des besoins moyens en eau de cette culture dans un climat donné, il convient alors de déterminer les surfaces maximales qu'il est possible d'irriguer pour assurer en moyenne une restitution suffisante d'eau à la nappe.

Dans les situations où l'approche temporelle de type "débit" s'impose, le problème est totalement différent. Malgré sa meilleure efficacité de l'eau, le maïs présente alors l'immense inconvénient de positionner son pic de demande en eau au moment des périodes d'étiage (Figure ci-dessous) même si ce pic peut être parfois décalé par rapport au déficit pluviométrique compte tenu de l'inertie du système nappe-rivière. Il peut alors s'avérer plus judicieux d'irriguer des cultures moins exigeantes en eau telles que le sorgho, ou des cultures ayant des besoins plus précoces dans le temps comme les céréales à paille.

Evolution des valeurs mensuelles des variables climatiques (pluie et ETP) et des besoins en eau (ETM) d'une culture d'hiver (blé) et d'été (maïs), pour Toulouse en 2003



Les besoins en eau des cultures d'été (maïs) sont maximaux en été (juillet-août) avec des valeurs de 6 à 7 mm/jour alors que la pluviométrie est faible.

Par contre, les cultures d'hiver (blé) voient leur ETM culminer en fin de printemps, avec des valeurs nettement plus faibles (3 à 4 mm/jour), qui coïncident par ailleurs avec une période de bon apport pluviométrique.

En conclusion on peut donc dire que **l'agriculture doit être considérée à la fois comme une contributrice et comme une consommatrice de la ressource en eau à l'échelle d'un territoire**. Ces deux fonctions sont très interdépendantes et doivent s'analyser simultanément et spatialement à l'échelle d'un bassin. Cela revient à dire qu'on ne peut pas analyser les prélèvements d'eau pour l'irrigation par l'agriculture sur un territoire sans en même temps analyser sa contribution globale à la reconstitution des ressources. **Il y a donc interdépendance entre agriculture irriguée et agriculture pluviale au sein d'un territoire de gestion quantitative de l'eau**. Or ces deux ensembles ont trop souvent été étudiés indépendamment l'un de l'autre. Seules des études croisant la répartition spatiale des systèmes de culture, la répartition spatiale des types de sols et la typologie et le fonctionnement des hydrosystèmes permettront d'aboutir localement à de véritables outils de gestion quantitative des ressources en eau qui puissent être réellement partagés entre les acteurs sur la base de références physiques incontestables.

3. Le développement de l'usage agricole de l'eau et ses limites

L'irrigation s'est d'abord développée (dès le XIX^e siècle) dans les zones à tendance aride (Sud-Est) mais qui bénéficiaient d'apports d'eau de montagne (Rhône). Elle s'est ensuite étendue à d'autres régions, par une politique active d'aménagement (barrages...), d'investissements dans les réseaux d'irrigation comme dans l'irrigation individuelle et de mise en valeur des ressources localement disponibles : pompes individuelles en nappe et en rivière, retenues collinaires...

3.1. Le développement de l'irrigation

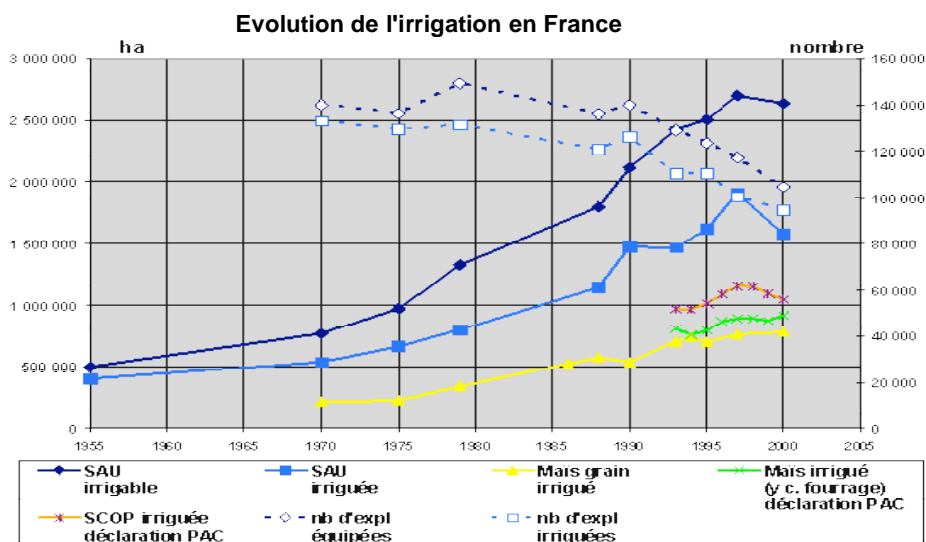
Les données statistiques les plus complètes concernent les surfaces, qui sont chiffrées dans les recensements de l'agriculture successifs (1970, 1979, 1988, 2000) et dans les enquêtes "Structures", ainsi qu'au travers des déclarations PAC pour la SCOP (Surfaces Céréales, Oléagineux, Protéagineux). Concernant les volumes d'eau consommés, on ne dispose que de données récentes, fondées sur les redevances irrigation¹ versées aux Agences de l'eau, mais très inégalement accessibles et étudiées. Pour les quantités apportées par ha, les informations sont limitées à celles fournies par l'enquête "Pratiques culturales" du SCEES pour 2001 (année plutôt humide), et à des données pour des zones plus restreintes. Les données de prélèvement pour irrigation fournies par les Agences de l'Eau étaient considérées comme peu fiables avant 2000 (notamment en raison de la possible sous-évaluation des surfaces déclarées au forfait, encore importantes à l'époque). La généralisation des compteurs permet depuis quelques années d'estimer avec bien plus de précision les volumes effectivement prélevés, via notamment l'utilisation de différentes bases de données statistiques (Recensement Agricole, enquêtes Pratiques Culturelles SCEES, déclarations PAC, etc.). La littérature professionnelle et les études produites par les Chambres d'Agriculture offrent par ailleurs des informations plus ponctuelles, et des études de terrain menées par le Cemagref peuvent également être mobilisées. L'insuffisante élaboration et organisation des sources de données disponibles au niveau national constituent cependant un frein sérieux aux études des pratiques d'irrigation en France, un point déjà souligné dans le rapport du CG GREF (2005), même si des progrès sont réels (via les services statistiques des DRAF par exemple).

. L'augmentation des superficies équipées/irriguées

Les surfaces "irrigables" étant difficiles à estimer (en raison des équipements mobiles), les données les plus utilisées sont celles qui portent sur les surfaces réellement irriguées une année donnée (cette année n'étant pas forcément sèche, une sous-estimation est possible). Les surfaces irriguées sont assez nettement inférieures aux surfaces équipées (proportion variable selon les régions, et les années).

Ces données montrent une multiplication par 3 des surfaces irriguées entre 1970 et 2000, avec une certaine stabilisation depuis 1995. Les sécheresses récentes (1976, 1989-91) ont eu des effets visibles sur la création de "ressources".

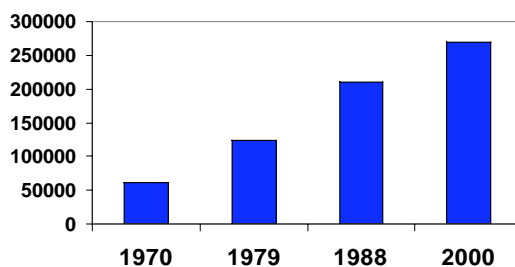
1. Ces données sont incomplètes ou imprécises (pompes individuelles, tarification forfaitaire...) ; leur qualité s'améliore avec la progression de l'équipement en compteurs des irrigants. Les chiffres globaux par bassin hydrologique sont donc souvent "redressés" par les Agences de l'eau et l'IFEN, pour tenir compte du caractère non exhaustif des données de base.



Source : AGPM 2006

Dans la mesure où le Sud-Est est une zone ancienne d'irrigation, le développement très rapide des surfaces irriguées observé à partir des années 80 a concerné essentiellement le grand Sud-ouest (Aquitaine, Midi-Pyrénées et Poitou-Charentes), avec un triplement des surfaces en 10 ans, et des prélèvements nets en période d'étiage estimés à 800 Mm³, représentant 87% des consommations estivales dans le bassin Adour-Garonne.

Evolution des surfaces irriguées en Midi-Pyrénées (en hectares)



Les surfaces irriguées en 2000 (1 575 625 ha) représentent 5,7% de la SAU totale française. Les prairies permanentes irriguées ne représentent que 2% des surfaces irriguées, et sont presque pour moitié localisées en Crau. Il est donc plus significatif de considérer le taux d'irrigation des terres cultivées hors STH : les surfaces irriguées représentent 7,9% de cette SAU cultivée (près de 10% en 2003). L'irrigation étant concentrée dans certaines zones, on atteint des taux d'irrigation régionaux (rapportés à la SAU totale) de 10 à 20%, des taux départementaux de 20% et plus, et des taux cantonaux de plus de 60%, en Aquitaine notamment (monoculture de maïs sur sable).

Dans les régions méridionales à déficit estival quasi-systématique (P-ETP fort et irrigation de 400 mm, provenant de ressources extérieures au système), l'irrigation est indispensable à de nombreuses productions, l'alternative étant la vigne ou les céréales à paille à faible rendement. Par contre, dans les régions d'extension plus récente, le déficit P-ETP est plus réduit, et l'irrigation de 100 à 300 mm (maïs) ; il s'agit d'une irrigation indispensable pour le maïs mais d'une irrigation d'appoint, de garantie, pour les autres productions. Le prélèvement s'effectue dans les nappes et rivières, d'où une tension plus vive en été.

. Les modes d'accès à l'eau

Des données plus précises concernant les modes d'accès à l'eau des irrigants, qu'il s'agisse du type d'irrigation, individuelle ou collective, ou du type de ressources prélevées (part des pompages en nappe profonde, en nappe alluviale ou en cours d'eau), ne sont disponibles que depuis quelques années (Recensement Agricole 2000).

Excepté dans le bassin Rhône-Méditerranée-Corse, où 70% des exploitations irriguées sont raccordées à un réseau collectif, les ressources individuelles dominent ; il s'agit, dans l'ordre d'importance décroissante, de forages, pompages en rivières et retenues collinaires. D'après les données du recensement agricole 2000, les superficies irriguées à partir de ces ressources en eau individuelle ont été estimées à 0,9-1 million d'ha, soit environ 60% des surfaces irriguées totales.

Depuis 2000, l'accès aux aides européennes SCOP est conditionné par l'obligation de disposer d'une autorisation de prélèvement et d'être équipé d'un compteur (cette obligation datant de la loi sur l'eau de 1992). En 2003, 85%

La part du maïs dans les surfaces irriguées est très forte dans le grand Sud-Ouest, celle des vergers et de l'horticulture dans le Sud-Est. Ces différences se reflètent dans les apports moyens par ha : de l'ordre de 140 mm dans le Sud-Ouest, et de 400 mm dans le Sud-Est. A noter que ces chiffres sont des valeurs en année "normale" (2002 est même plutôt une année humide) ; les volumes d'irrigation peuvent être bien supérieurs en année sèche (comme en 2003).

3.2. Le contexte économique de ce développement

Si la répétition des sécheresses accroît l'intérêt des agriculteurs pour l'irrigation, les conditions économiques ont un rôle déterminant dans l'adoption de l'irrigation. On distingue quatre motivations économiques à l'irrigation :

- Cultures en zones déficitaires en pluviométrie (cas du Sud-Est de la France). Les apports en eau d'irrigation peuvent alors être considérés comme un intrant indispensable, au même titre que les fertilisants ou l'énergie, pour permettre la production et donc une partie du revenu.
- Cultures en zones au climat aléatoire. Observé principalement dans le Sud-Ouest, ce type d'irrigation a pour objectif économique à la fois la sécurisation des rendements (et donc des revenus) en cas de sécheresse et l'augmentation des rendements moyens, les conditions de température étant favorables à des cultures comme le maïs.
- Irrigation de complément ou de sécurisation. L'objectif de cette pratique, observée dans le Centre ou le Bassin Parisien, est essentiellement de lisser les fluctuations possibles de rendement d'une année sur l'autre (notamment pour les céréales à paille).
- Irrigation à enjeu de qualité. Dans ce cas, c'est l'objectif de qualité des produits qui prime sur l'objectif quantitatif de rendement. L'irrigation peut aussi faire partie des obligations contractuelles liant les exploitants aux filières de valorisation aval (légumes, semences).

Dans tous les cas, l'irrigation suppose des investissements coûteux et une mobilisation accrue de main d'œuvre, efforts financiers et humains qui doivent être raisonnés au plus juste en terme de gains de revenus et d'accroissement de charge. Or les cours agricoles ont évolué tendanciellement à la baisse en euros constants depuis le début des années 80 dans un contexte de léger accroissement des charges, toujours en euros constants. Dans ce contexte peu porteur, la rentabilité de l'irrigation est particulièrement sensible aux effets de ciseau : accroissement des charges et baisse des cours une année donnée. C'est ainsi qu'en 2003, année de sécheresse sévère, les pertes de rendements ont pu être compensées par des cours plus soutenus du maïs cette année là, alors qu'une année comme 2005 a au contraire connu des baisses plus importantes du revenu agricole, par conjugaison de baisses de rendements, de baisses des prix et d'augmentation des coûts de l'énergie.

. Coûts et bénéfices de l'irrigation

Comme le mentionne d'ailleurs le rapport du CGGREF, on ne dispose pas de données économiques récentes et générales sur les coûts et bénéfices de l'irrigation. Les données sont fragmentaires, diversement précises selon les régions, voire inexistantes (des données très complètes sont celles collectées par la Chambre régionale d'agriculture Midi-Pyrénées, et un travail de reconstitution des coûts de l'irrigation à l'échelle régionale est mené par la DRAF Midi-Pyrénées). Mentionnons les études du Cemagref de 2003 (Charente, systèmes d'irrigation individuels), 2001 (financement et amortissements des infrastructures) et 1998 (tarification dans les réseaux collectifs).

Les coûts "privés" d'irrigation (pour l'exploitant) sont très variables selon les cultures et les régions : 35-80 €/ha pour le sorgho, 43-106 pour le soja, 84-143 pour le maïs. Ces charges d'irrigation par ha représentent de 12 à 20% des charges totales (environ 1000 €/ha en Midi-Pyrénées), avec une prépondérance des charges fixes ; la part de la redevance "prélèvement" versée à l'Agence de l'Eau est faible (2 à 8%).

Ces coûts d'irrigation varient aussi, du simple au double, selon le mode d'accès à l'eau : pompage individuel, réseaux collectifs sous pression, gravitaire, etc. Une synthèse de la tarification effectuée par l'agence de bassin Rhône - Méditerranée et Corse donne les résultats suivants.

Type de réseau	Tarification			Coût	
	Coût fixe à l'hectare sur la base d'une consommation de 4 m ³ /h/ha		Coût variable au volume	Coût total pour 3 000 m ³ /ha	
	Moyenne	Variation		A l'hectare	Au m ³
Gravitaire	183 €/ha	± 76 €/ha	0	183 €/ha	0,061 €/m ³
Réseau sous pression collectif	107 €/ha	± 46 €/ha	0,076 €/m ³	335 €/ha	0,111 €/m ³
Pompage individuel	122 €/ha	± 21 €/ha	0,009 €/m ³	149 €/ha	0,05 €/m ³

Source : CGGREF 2005 (d'après étude Agence de l'Eau RMC, 2001)

Certaines études (Solagro, 2004) concluent à un différentiel de marge nette faible entre le maïs et les autres céréales (blé tendre, sorgho), une fois que l'ensemble des charges fixes d'irrigation (amortissement du matériel) ont été intégrées. D'autres études (ARVALIS – Institut du végétal, 2005) montrent que le remplacement du maïs irrigué par du sorgho irrigué abaisse plus nettement la marge nette. Les hypothèses de calcul (en particulier coût de l'irrigation) peuvent différer selon les études. Quant aux rendements, la plupart des sources confirment les écarts importants (+35 q/ha pour le maïs irrigué par rapport au non irrigué), ainsi que le rôle de l'irrigation sur la variabilité du rendement (travaux de l'INRA et du Cemagref).

. L'évolution des aides agricoles européennes

Dans le cadre de la réforme de la PAC engagée en 1992, la France a opté pour une différenciation des primes à l'ha de SCOP (Surfaces en céréales et oléo-protéagineux) selon la culture (distinction du maïs et/ou des cultures irriguées). Ce choix a conduit, dans certains départements, à des montants supérieurs de 100 à 200 €/ha pour le maïs irrigué vis-à-vis du non irrigué. Ces montants fonctionnaient donc comme une "prime à l'irrigation" (justifiée par le soutien financier aux exploitants qui s'équipaient en matériel d'irrigation, permettant par ailleurs le maintien des revenus passés), et s'ajoutaient aux bénéfices liés au gain de rendement permis par l'irrigation². L'Agenda 2000 puis l'accord de Luxembourg de juin 2003 ont renforcé la tendance au découplage des aides de la production. La réforme adoptée en 2003, et entrée en vigueur en France en 2006, instaure le découplage partiel, à 75% pour les COP, des aides : cette mesure réduit fortement le bonus accordé aux cultures irriguées (qui subsiste sur les 25% d'aides couplées). Cependant, la fixation du montant des nouvelles aides découplées sur une base historique (primes perçues en 2000-2002) maintient un avantage aux anciens irrigants.

Dans la nouvelle PAC, le versement des aides est conditionné au respect des directives en vigueur (maintien des zones humides, biodiversité...), et au respect de BCAE (Bonnes conditions agricoles et environnementales), définies par les Etats. La modalité de conditionnalité retenue par la France pour favoriser le maintien de la teneur en matières organiques des sols porte sur la rotation des cultures : elle fait obligation aux producteurs d'avoir au moins 3 cultures ou 2 familles de cultures. Une dérogation est toutefois prévue, lorsque la diversification des productions n'est pas possible sur l'exploitation : l'obligation est ramenée à l'implantation d'une culture intermédiaire en hiver, ou même à simplement la gestion des résidus de culture. La monoculture de maïs, par exemple, reste donc possible.

La réforme de 2003 va dans le sens d'une suppression de la référence à la nature de la culture (irriguée ou non) et conditionne les aides au respect de directives environnementales (même si celles-ci visent plus la qualité de l'eau, la biodiversité, etc. que la modification du comportement des irrigants).

. Les conséquences de la réforme de 2003

La logique même du découplage est de neutraliser l'effet des aides sur les décisions de productions des agriculteurs. Néanmoins l'obtention de revenus sécurisés est susceptible de modifier les choix économiques des producteurs en influençant leurs stratégies de diversification des risques, tant de cours que de production. Selon les degrés d'aversion au risque des exploitants, on devrait donc constater des évolutions divergentes de leurs paniers de cultures, avec des conséquences encore mal mesurées sur les productions à l'échelle agrégée.

Les simulations économiques des effets du découplage (conduites sous hypothèses de neutralité au risque) ont conclu à un effet mineur pour les grandes cultures, mais à une incidence forte dans l'affectation des surfaces entre grandes cultures et fourrages pour les exploitations d'élevage bovins-viande et ovins, avec une augmentation des surfaces en prairie. Le découplage pousse à la simplification des assolements et à la monoculture, même si les mesures d'éco-conditionnalité jouent dans le sens contraire.

Le MEDD a fait réaliser en 2005 une étude spécifique sur l'impact de la réforme sur l'agriculture irriguée (Buisson, 2005). Les simulations économiques réalisées montrent une tendance à la baisse des surfaces irriguées et de la consommation d'eau, pour les prix du maïs comparables à ceux de 2002. L'effet sur la production est en revanche quasi-nul si le prix du maïs augmente de 25%. On retrouve là une illustration de l'effet de ciseau précédemment décrit. L'étude prédit également des baisses de consommation d'eau de l'ordre de 20% dans le Sud-Ouest, réductions plus que proportionnelles aux baisses de surface. L'étude mobilisait les techniques de programmation mathématique positive avec calibrage par les surfaces. Ce choix de calibration est logique au vu du peu de précision des données disponibles sur les volumes d'eau consommés, les surfaces irriguées étant mieux connues. Mais l'on sait que la méthode retenue peut être sensible au choix de calibration, et les résultats en termes de variation des volumes consommés sont sensibles à la fiabilité des données de prélèvement avant la réforme. C'est ainsi qu'une autre étude (CACG), conduite selon une autre méthodologie, conclut à des réductions de surfaces irriguées pour le Sud-Ouest d'un même ordre de grandeur mais assorties d'un accroissement des consommations, par effet d'intensification du maïs sur les zones les plus favorables à cette culture. Il est donc encore nécessaire de poursuivre l'effort d'étude avant de pouvoir avancer des conclusions définitives.

2. Ce soutien était néanmoins limité par le plafonnement des paiements compensatoires modulés à l'échelon régional.

**Simulations de l'impact de la réforme PAC 2003 sur les surfaces irriguées
et les volumes d'eau consommés pour l'irrigation (Buisson, 2005)**

Région	A prix du maïs inchangé		Avec hausse du prix du maïs de 25%	
	Surfaces irriguées	Volumes d'eau	Surfaces irriguées	Volumes d'eau
Midi-Pyrénées	-16,4%	-20,8%	-13,3%	-4,9%
Poitou-Charentes	-11%	-12%	-9%	+3,1%
Aquitaine	-7,4%	-8,3%	-6,5%	-0,3%
Rhône-Alpes	-5,3%	-10,3%	-4,8%	+3%
Pays de Loire	-4,6%	-7,3%	-4,2%	+2,9%
Alsace	-3,5%	-3,9%	-3,1%	+5,9%
PACA	-1,3%	-0,2%	-1,3%	0%
Languedoc-Roussillon	0,2%	-0,3%	+0,2%	0%
Ensemble	-7,9%	-7,9%	-6,9%	0%

3.3. Le contexte juridique et politique de la gestion de l'eau et des sécheresses

Le droit de l'eau se caractérise par la dispersion des sources, l'enchevêtrement des textes, régimes et compétences juridiques, et il est souvent techniquement d'une grande complexité. On peut néanmoins en isoler quelques grands principes : l'eau fait partie du patrimoine commun de la nation, sa mise en valeur et sa protection sont d'intérêt général, le droit de l'eau a pour objet la gestion équilibrée de la ressource en eau, l'usage de l'eau appartient à tous. Il est à noter que la loi concède certains droits de propriété ou d'usage sur l'eau de nature privative qui peuvent interférer dans la gestion du risque sécheresse.

. Evolution des cadres législatif et réglementaire

Les principales étapes sont constituées par les lois sur l'eau de 1964 et 1992, les lois pêche et les lois successives de décentralisation. Les années 1950 voient le début des politiques de décentralisation dans un contexte d'activisme fort en matière d'aménagement et de développement de grandes infrastructures hydrauliques. La DATAR est créée à cette époque, elle sera à l'origine des Agences de l'eau.

La Loi sur l'Eau de 1964 met en place le cadre actuel de la gestion de l'eau : création des Agences financières de bassin (qui deviendront les Agences de l'eau), affirmation du principe pollueur-payeur comme base du système de redevances et d'aides des Agences, instauration d'une gestion décentralisée participative par les Comités de Bassin qui rassemblent élus, industriels, agriculteurs et usagers des milieux aquatiques. Il est à noter que la loi ne comporte guère de préoccupations quantitatives, mais vise surtout un objectif de reconquête de la qualité des eaux et, notamment, de réduction des pollutions d'origine industrielle.

La Loi sur l'eau de 1992 introduit la notion de gestion équilibrée au bénéfice de la protection des milieux naturels et instaure deux instruments de planification nouveaux : les SAGE et les SDAGE. Plus récemment, on a vu apparaître dans le contexte des SDAGE de nouveaux instruments de gestion, comme les zones de répartition des eaux (ZRE, suite à la loi sur l'eau de 1992). Ces ZRE ont été étendues en 2003 ; elles concernent à peu près toutes les régions de forte irrigation, mais pas toutes les ressources de ces régions. L'ensemble de ces dispositifs est aujourd'hui repris au travers des SDAGE dans le processus de mise en application de la DCE, processus discuté plus loin.

A côté de ces dispositions administratives d'intérêt général, se sont développées depuis une quinzaine d'années des initiatives dites de "gestion concertée". Elles peuvent concerner : des collectivités, comme les Contrats de Rivière ; ou des catégories d'usagers particuliers, comme les accords de gestion volumétrique entre irrigants, en Charente, en Beauce ou dans la Drôme. Elles peuvent également résulter d'accords entre différentes catégories d'usagers et l'administration. C'est le cas des plans de gestion des étiages (PGE). Au départ issus de démarches d'engagement volontaires de collectivités ou d'usagers souhaitant "aller plus loin" dans la protection de la ressource, les dispositifs de gestion concertée tendent à devenir aujourd'hui un des outils de gouvernance possibles pour une gestion équilibrée de la ressource, soucieuse à la fois de la protection des milieux naturels et de la satisfaction au mieux des besoins des usagers.

Il faut toutefois rappeler que les statuts juridiques multiples de l'eau (objet de protection, de conciliation, d'appropriation) traduisent la diversité des enjeux auxquels doit faire face le législateur. C'est ainsi que le caractère patrimonial de la ressource est un facteur récurrent de fragilité juridique des accords de partage négocié entre acteurs particuliers, accords qui résisteraient mal à une contestation auprès des tribunaux. Ce caractère patrimonial permet cependant de protéger la ressource des intérêts privés abusifs. Notons enfin que ces ambiguïtés et difficultés juridiques ne seront pas réglées par le projet de nouvelle Loi sur l'eau, dont un des objectifs majeurs est de lever l'inconstitutionnalité du système des aides et redevances des Agences de l'eau.

. Acteurs et dispositifs de la gestion de l'eau

Ce qu'il est convenu d'appeler la "gouvernance" de l'eau en France se caractérise par une grande multiplicité d'acteurs intervenant dans la gestion de la ressource, acteurs aux compétences souvent enchevêtrées, produit d'une stratification historique qui puise son origine dans l'Ancien Régime, et en permanence remaniée en fonction des objectifs des politiques publiques : développement industriel, énergétique et agricole, adduction d'eau potable dans l'immédiat après guerre, protection de l'environnement aujourd'hui.

Ces gestionnaires de la ressource peuvent être classés en trois grandes catégories :

- les collectivités territoriales et les collectivités locales, qui doivent assurer l'approvisionnement en eau potable des populations ainsi que l'assainissement de leurs rejets. Les collectivités jouent également un rôle central en matière de gestion de l'eau sur leur territoire de compétences, tant au plan juridique qu'économique ;
- les établissements publics locaux : Agences de l'eau ou Etablissements Publics Territoriaux de Bassin (EPTB) ;
- les pouvoirs publics dans leur ensemble : services déconcentrés de l'Etat et administration centrale (ministères).

Ces acteurs sont porteurs de "modèles" hydrauliques différents, concernant notamment la répartition entre "eau des villes" et "eau des champs". A côté de ces acteurs publics, coexistent des acteurs privés (industriels, sociétés privées de distribution d'eau, exploitants agricoles), des entreprises publiques (EDF) et un tissu associatif fourni (associations de consommateurs, associations de protection de la nature, fédérations de pêche).

La grande diversité des acteurs de l'eau

Une clé de description spatiale descendante des acteurs et de leurs compétences illustre bien la complexité du dispositif. Elle conduit à distinguer :

- la Commission européenne, qui a adopté de nombreuses directives concernant l'eau depuis 25 ans ("nitrates", "eaux résiduaires urbaines"), et en 2000 la Directive Cadre sur l'Eau (DCE), base projetée de l'appareil réglementaire européen. Ces Directives sont conçues dans un esprit normatif et d'application du principe de subsidiarité : les Etats membres ont en charge leur mise en œuvre, mais avec des obligations/recommandations.
- Echelon national : divers ministères dont le MEDD (le plus important dans ce cadre ; il a la tutelle des 6 Agences de l'Eau), le MAP, mais aussi l'Equipement, la Santé et le Secrétariat à l'Industrie.
- Echelon local : Préfets de département (décisions de restrictions d'eau en cas de sécheresse, constitution de cellules de crise), DRIRE (contrôle des rejets polluants), DDASS (salubrité des eaux de boisson et de baignade), DDA (cours d'eau non domaniaux, hydraulique agricole...), DDE (contrôle droits concession du domaine public par EDF), collectivités locales et territoriales, etc.
- Agences de l'Eau : acteurs essentiels de la gouvernance territoriale de l'eau ; politique structurée autour des SDAGE (Schémas Directeurs d'Aménagement et de Gestion des Eaux, plans à 20 ans, rôle pilote dans la nouvelle DCE) et leur équivalent plus local, les SAGE (durée 5 ans).
- EPTB (Etablissements Publics Territoriaux de Bassin) : importance depuis fin des années 1990, rassemblent des collectivités territoriales autour d'enjeux locaux de gestion.
- SAR (Sociétés d'Aménagement Régional, grands périmètres irrigués) et ASA (Associations syndicales autorisées, petits périmètres irrigués) : structures publiques sous concession d'Etat, rôle opérationnel important en matière agricole, mais aussi au-delà en matière de gestion quantitative sur leur territoire de compétence.
- organismes mandataires : souvent des Chambres d'Agriculture, les organismes mandataires regroupent l'ensemble des demandes d'autorisation temporaire des irrigants sur un territoire.

. Les gestionnaires de l'irrigation

En agriculture, on rencontre deux types de gestionnaires : les ASA, Associations syndicales autorisées, et les SAR, Sociétés d'aménagement régional (CACG, SCP). Mais il faut noter l'importance prépondérante des irrigations individuelles, seulement soumises au régime d'autorisation de prélèvement par l'administration. Leurs autorisations de prélèvement sont toutefois très souvent regroupées par un organisme mandataire. Les ASA gèrent 22% des superficies irriguées, les SAR 18% alors que l'irrigation individuelle représente 60% de ces mêmes superficies.

Répartitions des superficies irriguées par acteurs

Acteurs	Superficies irriguées(en hectares)	Superficies irriguées(en % du total)
SAR	365 000	18
ASA	450 000	22
Irrigation Individuelle	1 200 000	60
Total	2 015 000	100

Source : Ministère des Affaires Etrangères, 2000

Les ASA, très présentes en zone méditerranéenne et dans le Sud-Ouest, souffrent de cloisonnement par rapport aux autres acteurs, et ont besoin d'être modernisées. La base régionale est retenue à partir des années 1950 (décret de juin 1955), époque à laquelle sont créées les SAR du Canal de Provence, du Bas-Rhône-Languedoc,

et la CACG. Cette politique ambitieuse s'inscrivait dans le cadre d'une vision convergente d'aménagement du territoire et de gestion collective et planifiée de la ressource en eau.

D'origine plus récente, l'irrigation individuelle s'explique par les difficultés des politiques locales de l'eau à imposer réellement une vision collective partagée des enjeux de gestion de la ressource. Partant, elle s'intègre mal aux projets de développement associant des usagers divers autour d'enjeux de gestion territoriale de l'eau. Les gestionnaires éprouvent des difficultés pour impliquer financièrement les acteurs privés aux dispositifs de gestion existants. Mais la tendance actuelle, en partie explicable par les tensions de plus en plus vives sur la ressource et le risque de multiplication des conflits d'usage locaux, est à un retour vers des approches plus collectives, sinon toujours consensuelles. Bien qu'encourageantes pour l'avenir, il faut tout de même noter qu'elles ont aussi leurs limites. Les règles de partage instaurées par certains PGE, par exemple, restent encore insuffisantes pour annuler les écarts entre disponibilités et demandes, surtout en cas de sécheresses récurrentes.

. Les enjeux de la politique de l'eau

Les Agences de l'eau se sont historiquement surtout préoccupées de gestion qualitative de la ressource. La sécheresse de 1976 a contribué à infléchir cette attitude dans les années 1980, mais sans que les enjeux de quantité soient réellement traités à parité avec les objectifs de qualité des eaux brutes poursuivis par les Agences. Mais, jusqu'à très récemment, l'agriculture était largement absente de l'effort de reconquête de la qualité entrepris par la collectivité nationale par défaut de réduction notable de ses pollutions. Elle ne contribuait également que très peu au coût financier de la politique de l'eau.

A partir du début des années 90, s'inaugure donc un contexte social et médiatique tendu, l'agriculture étant de plus en plus souvent accusée dans le débat public d'être cause de multiples atteintes à l'environnement. De plus, l'Etat se désengage progressivement des politiques d'aménagement agricole lourd et du financement des ASA ; les exploitants doivent donc assumer seuls la maintenance des réseaux collectifs d'irrigation. Enfin, la mise en place de la DCE au début des années 2000 va se traduire par la combinaison de contraintes fortes sur la qualité des cours d'eau et des impératifs de protection continue en cours d'année des écosystèmes aquatiques, une évolution qui ne peut manquer d'avoir des impacts négatifs sur l'agriculture irriguée, même en dehors de situations de sécheresse.

. Acceptabilité sociale de l'irrigation

La sécheresse de 2003 a induit une prise de conscience du caractère limité de la ressource ; cette évolution de la société est perceptible dans les sondages d'opinion, qui montrent que les risques de pénurie d'eau sont désormais classés parmi les préoccupations importantes, et dans les médias, qui relaient les mises en cause de l'irrigation, du maïs notamment. On constate de plus la multiplication des conflits d'usage territoriaux, et leur judiciarisation croissante (recours juridiques, contentieux administratifs), même si les aspects qualitatifs sont encore prépondérants et pas toujours directement liés aux situations de sécheresse.

Les modes d'intervention publique sont critiqués : l'Etat est accusé de laxisme dans l'application des mesures, et les modes de régulation eux-mêmes sont remis en cause. La contestation s'exprime notamment vis-à-vis de la création de nouvelles réserves, grands barrages (projet de Charlas) et autres retenues (annulation par le Conseil d'Etat du projet de barrage-réservoir de Trézence). Dans la contestation de l'utilité de ces projets, les arguments ne se limitent pas aux caractéristiques et impacts des aménagements, et les critiques "remontent" de plus en plus vers l'évaluation des besoins en eau et le modèle agricole qui sous-tend ces "besoins". Consciente des risques de blocage issue de cette situation, on constate qu'actuellement, la profession agricole demande surtout un appui public à la création de retenues collinaires. Les sécheresses récentes ont mis en évidence l'existence de fortes controverses sociétales sur le partage de l'eau entre ses divers usages. Ces controverses sont moins vives dans le domaine scientifique. Même si de nombreuses zones d'ombre subsistent, liées souvent à un manque de références validées scientifiquement, le diagnostic de la situation et de ses causes ne fait pas l'objet d'oppositions au sein des communautés scientifiques.

. La Directive cadre sur l'eau (DCE) et sa transposition dans la nouvelle Loi sur l'eau

La protection de la ressource en eau est renforcée par la Directive Cadre sur l'Eau d'octobre 2000 : elle a pour finalité la protection des milieux par renforcement des normes (rejets industriels, urbains et pollutions agricoles) et la restauration des zones humides dégradées par des prélèvements trop importants. Elle instaure le principe de la gestion par bassin hydrographique (extension à l'UE du modèle français des Agences de l'Eau) et recommande la mise en place de gouvernances locales associant fortement les usagers et les porteurs d'enjeu. Enfin elle réaffirme le principe pollueur payeur, et elle introduit le principe de récupération des coûts et services de l'eau sur les usagers en proportion de leurs impacts propres sur les milieux naturels. Le surcoût pour la gestion de l'eau, induit par la DCE, serait de l'ordre de 10 à 15%.

Les ambitions de la DCE portent surtout sur la qualité des eaux et la protection des milieux, objectif dit de "bon état écologique" défini en référence à des indicateurs biologiques et physico-chimiques. Pour les réaliser, la DCE impose aux Etats d'établir à l'échelle de chaque bassin versant une liste de masses d'eau, de les classer vis-à-vis de l'objectif du bon état écologique, de définir les mesures envisagées pour l'atteindre et d'estimer le coût

financier de ces mesures pour la collectivité. La mise en œuvre de la DCE est étalée dans le temps, une nouveauté par rapport à des directives antérieures (comme la directive "nitrates") qui fixaient simplement un horizon de mise en conformité aux normes. Les Etats ont fourni à Bruxelles un premier état des lieux de la qualité des eaux par masses d'eau en 2005. En 2007, ils doivent préciser leurs programmes de mesures et demander éventuellement des dérogations (cas des masses d'eau dites "fortement modifiées") dans des situations où l'atteinte du bon état écologique supposerait des dépenses financières prohibitives. L'horizon est 2015 pour la mise en conformité des masses d'eau aux normes de la Directive, avec étalement jusqu'en 2025 pour les masses d'eau "fortement modifiées". La directive "eaux souterraines" (directive "fille" de la DCE) comporte, elle, des objectifs quantitatifs : les prélèvements dans les nappes ne doivent pas dépasser leur réalimentation.

Atteindre les objectifs de la DCE, qui consistent à assurer les conditions nécessaires à la survie des organismes aquatiques et au transport et à la dilution des pollutions, imposera le maintien de débits d'étiage conséquents, qui conduiront à des restrictions fortes de l'irrigation en été dans un certain nombre de régions. Des études socio-économiques sur les conséquences de la mise en place de la DCE seront donc vraisemblablement nécessaires, à destination notamment de la profession agricole.

4. Les effets de la sécheresse sur la production agricole

4.1. Les effets sur la croissance et le développement des cultures

La croissance et le développement de la plante au sein du peuplement cultivé sont directement affectés par la sécheresse édaphique (cf. chapitre 5.). Des arrières effets peuvent également pénaliser la culture suivante (non reconstitution de la réserve en eau). Ces effets sont plus marqués dès lors qu'il s'agit d'espèces pérennes : effets sur la fructification des ligneux l'année suivant la sécheresse (vignes et vergers), évolution de la composition floristique des prairies...

. Les effets directs sur le développement des cultures

En grande culture, les effets le plus souvent observés au champ sont :

- une levée retardée, incomplète, irrégulière, qui crée un peuplement défectueux et hétérogène jusqu'à la récolte,
- une implantation racinaire médiocre et superficielle : couverture du sol retardée, carences précoces, sensibilité à la sécheresse de fin de cycle...,
- une mauvaise utilisation des engrais azotés, due à des défauts de mise en solution des engrais puis de prélèvement par la plante,
- une réduction du développement foliaire puis du nombre de grains due aux régulations internes de la plante (stratégie d'évitement, cf. plus loin),
- une sénescence accélérée et un défaut de remplissage du grain.

Sous nos climats, les arrières effets d'une sécheresse, au travers d'un non-remplissage de la réserve du sol, sont généralement limités à la culture suivante.

Les conséquences sont diverses pour le sol et le peuplement selon la période d'occurrence de la sécheresse (tableau ci-dessous).

Effets de la sécheresse sur le sol et la culture selon la période à laquelle elle se manifeste

Processus affectés	automne	hiver	printemps	été
Recomblement de la réserve en eau du sol	+	++	+	
Implantation des cultures (y compris travail du sol)	++ (cultures d'hiver)	+	++ (cult. de printemps)	
Prélèvement d'azote (croissance pré-floraison)		++ (cultures d'hiver)	++ (cultures d'hiver et de printemps)	++ (cult. de printemps)
Alimentation hydrique			+	++

+ : effet modéré de la sécheresse ; ++ : effet important de la sécheresse

En cultures pérennes fruitières (vigne, vergers), la période de sécheresse affecte :

- au printemps : la mise en place des organes végétatifs et l'élaboration du nombre de fruits ;
- en été : la croissance des fruits (accumulation de matière sèche et d'eau) et l'élaboration de leur qualité, ainsi que l'induction florale qui détermine la fructification de l'année suivante ;

- à l'automne (après récolte) : l'activité de l'appareil végétatif et donc la reconstitution des réserves carbonées et azotées utiles au démarrage du cycle végétatif suivant.

. Les effets indirects, sur les bio-agresseurs des cultures

Les années sèches sont en général défavorables aux **maladies cryptogamiques**, tant pour l'infection initiale que pour la progression au sein du peuplement ; des alternances de petites pluies et de périodes sèches peuvent cependant favoriser certains pathogènes (oïdium des céréales, mildiou de la vigne).

Les impacts sont variables sur les **ravageurs**, qui sont surtout sensibles aux régimes thermiques qui accompagnent la sécheresse. Des températures élevées accélèrent les cycles de développement de nombreux insectes ravageurs des cultures (cycles supplémentaires, nouveaux ravageurs "tropicaux"). Les conditions sèches peuvent être défavorables, en compromettant la survie des œufs et des jeunes larves.

L'impact des **adventices** sur les cultures serait plus marqué en raison de la forte compétition pour l'eau, notamment en culture d'été. Une sécheresse précoce peut réduire la levée des adventices, mais aussi la capacité du peuplement cultivé à les concurrencer, ou l'efficacité de certains herbicides de pré-levée (faible migration en profondeur).

En dehors de la réduction des maladies du feuillage, les effets apparaissent variables et incertains, sur les maladies telluriques, les ravageurs ou les adventices. Les plantes affaiblies par la sécheresse pourraient aussi être plus sensibles aux attaques de pathogènes ou de certains insectes.

. Les effets sur la composition des graines et fruits

La complexité des mécanismes en jeu ne permet pas de dégager une règle générale simple, du type "la sécheresse améliore la qualité des produits". Une sécheresse après la fécondation réduit la taille des organes et, si elle se poursuit pendant la phase de remplissage, affecte leur composition. Les différents métabolismes étant inégalement affectés par le déficit hydrique (le métabolisme carboné l'est davantage que le métabolisme azoté), les concentrations relatives des différents composés sont modifiées : un manque d'eau induit généralement une baisse des teneurs en amidon et en huile des graines, et une augmentation des teneurs en protéines. Pour les fruits, une légère sécheresse est souvent favorable à la qualité car elle augmente la concentration en acides organiques.

. Les effets sur les prairies permanentes

La production de fourrages à partir des prairies permanentes présente une très forte variation interannuelle. Cette variation est essentiellement due à la sécheresse, mais elle peut être amplifiée par des périodes froides de début de printemps. Ces baisses de production dues à la sécheresse sont bien plus importantes en valeur relative que celles observées sur les systèmes cultivés : en 1976, la production du blé n'a été réduite que de 10 à 20% selon les régions, alors qu'en moyenne la production d'herbe a chuté de 50%.

Les systèmes fourragers mis en place par les éleveurs doivent donc tenir compte de cette grande variabilité. Les besoins du troupeau dans un système d'élevage donné étant relativement constants, l'éleveur doit anticiper chaque année la sécheresse à venir en se basant non pas sur une production fourragère moyenne, mais sur un risque de sécheresse accepté, quitte à avoir un excès de fourrage en année humide ou normale. Cette anticipation de la sécheresse se traduit donc toujours au niveau du système fourrager par une certaine diminution du chargement animal par hectare, et la constitution de stocks fourragers suffisants pour sécuriser le système d'élevage dans la majorité des situations.

Aux effets directs et immédiats de la sécheresse sur la production de fourrage, peuvent s'ajouter des effets sur la pérennité des prairies. En règle générale, la plupart des espèces fourragères s'auto-protègent de la sécheresse par une sorte de "mise en dormance" qui leur permet de reprendre une végétation assez vigoureuse lors du retour des pluies à l'automne. Cependant dans un certain nombre de situations, notamment lorsque la période sèche est précédée par un sur-pâturage, la reprise de la végétation est hétérogène, avec des "trous" de sol nu, qui laissent la place à des espèces invasives indésirables. La qualité des prairies et même leur pérennité peuvent alors être fortement compromises, et dans de nombreux cas ces dégradations prolongent l'effet sécheresse jusqu'au printemps suivant. Les études sur ces phénomènes sont peu nombreuses et essentiellement de l'ordre du constat. La recherche devrait permettre d'élucider les mécanismes en cause et de pouvoir diagnostiquer les situations où la résilience de la végétation peut permettre la restauration d'une flore prairiale de bonne valeur, et celles qui nécessitent des interventions plus importantes, re-semis ou sur-semis.

4.2. Les conséquences sur la production des grandes cultures

La sensibilité des cultures à la sécheresse dépend de leur sensibilité intrinsèque (phases sensibles et critiques, capacités d'extraction d'eau, processus d'ajustement...) mais aussi des conditions de culture qui leur sont appliquées (période de semis, fertilisation, irrigation...) et des choix variétaux opérés (précocité...). La perte de

rendement résulte *in fine* du stade où survient le déficit hydrique. Si de nombreux travaux expérimentaux ont renseigné la sensibilité intrinsèque des principales espèces cultivées à la contrainte hydrique, l'évaluation des conséquences réelles de la sécheresse dans les conditions agricoles françaises n'a pas fait l'objet d'études très détaillées.

Plusieurs sources de données peuvent renseigner sur les baisses de rendement liées à la sécheresse :

- les expérimentations agronomiques, qui ont le défaut d'être locales et souvent menées en milieu favorable (sols profonds) ;
- les modèles de simulation, qui s'appuient sur la connaissance agronomique mais dont le paramétrage est délicat ;
- les données statistiques régionalisées sur les rendements moyens (SCEES).

Notre estimation s'est basée sur ces données régionales disponibles sur la période 1970-2005. Ces données rendent compte de la sensibilité des cultures dans leur système de culture (en particulier mode d'irrigation et sols).

Les baisses de rendement ont été évaluées par rapport à un rendement de référence moyen, qui croît avec le temps, étant donné le progrès génétique, l'amélioration des techniques culturales et l'évolution climatique (hausse des températures). La progression annuelle moyenne de ces rendements est de l'ordre de 1,5% pour les céréales, betterave et pomme de terre, et de 1% pour tournesol (soit +30 à +50 q/ha pour les céréales, +5 à +15 q/ha pour les oléagineux depuis 1970).

Les séries statistiques montrent que la perte de rendement liée à la sécheresse est générale en 1976, 2003 et 2005 ; les autres épisodes de sécheresse, 1982, 1986, 1989, 1990, 1997 et 2004, ont davantage touché le Sud-Ouest.

Lors des grandes sécheresses de 1976 et 2003, ces pertes de rendement sont évaluées :

- sur blé, à 10 à 30% selon les régions (les petites terres du Centre étant plus sensibles),
- sur maïs, à 10 à 55% (selon les régions, l'équipement d'irrigation et les restrictions),
- sur tournesol, à 5 à 20% en 2003, 40 à 70% en 1976 (tournesol majoritairement non irrigué),
- sur sorgho, à 14 à 37% (sorgho majoritairement non irrigué).

En 2005, les pertes ont été plus faibles, inférieures à 10% même pour les cultures les plus affectées que sont le sorgho (-10%), le maïs (-9%), le blé (-6,5%) et le soja (-6%). Pour les autres productions (dont le tournesol, l'orge, le colza, la pomme de terre et la betterave), les pertes n'ont pas dépassé 2%.

Ces pertes de 10 à 25% lors des grandes sécheresses sont du même ordre de grandeur que celles induites par des problèmes sanitaires mal maîtrisés.

Les séries statistiques permettent de classer les cultures selon leur sensibilité à la sécheresse, en tenant compte des systèmes de culture pratiqués : le colza et le tournesol apparaissent peu sensibles, le blé moyennement sensible, le sorgho (en sec) et le maïs (sec + irrigué) assez sensibles. Notons que le sorgho est plus sensible si la sécheresse se manifeste tôt car l'implantation est alors pénalisée ; par contre, le sorgho tolère bien une sécheresse au cours du remplissage des graines. Le sorgho (comme le tournesol) est souvent cultivé sur des sols plus superficiels que le maïs, ce qui le pénalise d'autant dans les statistiques.

La sensibilité à la sécheresse évolue avec le déplacement des cultures vers certains sols ou avec l'adoption de l'irrigation. Les sensibilités en 1976 et 2003 restent comparables pour le colza (8%), le blé (17%), et le maïs (21%) ; celles de la pomme de terre et de la betterave ont en revanche été beaucoup réduites (développement de l'irrigation). Le sorgho et le tournesol montrent des résultats contrastés : sur ces cultures 'jeunes', l'amélioration génétique a beaucoup progressé au cours de la période.

Depuis quelques années seulement, les statistiques du SCEES distinguent les rendements du maïs en sec et en irrigué. Une forte baisse du rendement en non irrigué est observée en 2003 (-30% par rapport à 2002, contre -12% avec irrigation), mais les baisses sont plus faibles en 2005 (-12% en sec, -3% en irrigué).

Répartition des surfaces et rendement du maïs selon l'irrigation

	2002	2003	2004	2005
Maïs non irrigué : Surfaces (ha)	1 027 095	900 610	1 011 183	931 476
Rendement (q/ha)	84	59 (-30%)	83	74
Maïs irrigué : Surfaces (ha)	753 055	735 160	755 392	683 317
% du total maïs	(42%)	(45%)	(43%)	(42%)
Rendement (q/ha)	101	89 (-12%)	103	98

4.3. Les effets sur le revenu agricole

. Impact des sécheresses passées (1989-1990, 2003, 2005) sur l'agriculture française

L'examen des chroniques des années 1976, 1989, 2003 et 2005 montre que l'impact économique des sécheresses dépend beaucoup de l'environnement formé par les politiques agricoles, la situation sur les marchés des produits et sur ceux des consommations intermédiaires. La conjoncture joue par conséquent un rôle majeur : les années caractérisées par l'"effet de ciseau" (faible augmentation des prix agricoles et forte hausse du prix des consommations intermédiaires) sont particulièrement propices à une diminution importante du revenu agricole. Excepté pour la sécheresse de 1976, les études économiques font encore défaut quant à l'impact de la sécheresse sur l'ensemble du secteur (industries agro-alimentaires), les données existantes se limitant le plus souvent aux conséquences en termes de revenu agricole par actif.

En 1976, la sécheresse intervient dans un contexte déjà très tendu (plusieurs années consécutives de baisse du revenu, renchérissement de l'énergie et des intrants, endettement), et le prix de la plupart des produits, qui était fixé au niveau communautaire, connaît une hausse plus faible que la diminution des volumes de production. La baisse du revenu agricole est d'environ 9% ; une aide sécheresse exceptionnelle fixée à 6 milliards F en septembre 1976 est accordée aux professionnels à cette occasion.

La situation est comparable en 2005, avec les conséquences de la hausse du prix du pétrole, et des prix de vente qui ont stagné ou baissé (en raison de très bonnes récoltes en Argentine et au Brésil). La baisse est d'environ 9% pour les rendements en maïs (par rapport à 2004, maïs qui était une année exceptionnelle), les régions Poitou-Charentes, Aquitaine et Midi-Pyrénées étant les plus touchées. Les prix de vente pour les céréales ayant stagné et les consommations intermédiaires ayant augmenté (prix du pétrole et donc des engrais), le revenu par actif non salarié (RNEA) baisse de 22% par rapport à 2004 (-6% par rapport à 2003).

En 2003 au contraire, de fortes hausses des prix agricoles compensent presque la baisse des volumes récoltés. Cette baisse de la production est comparable à celle de 2005, mais de fortes hausses des prix de vente (+16%), et la stabilité ou la baisse des charges aboutissent à une variation faible du RNEA (-2% en COP), excepté pour le vin. L'élevage est le secteur potentiellement le plus exposé, mais la conversion de surfaces vers l'ensilage (200 000 ha) a permis de pallier l'insuffisance des fourrages. Le caractère mondial du marché des produits agricoles de base déconnecte fortement les mouvements des cours internationaux des aléas locaux de sécheresse. En particulier pour le maïs, la production française est trop faible à l'échelle du marché mondial pour que des sécheresses en France fassent bouger les cours (ce qui n'est pas le cas des Etats-Unis). Au total, les agriculteurs ont perçu 368 millions d'euros au travers du FNGCA en 2004 pour la sécheresse de 2003. Par ailleurs l'OFIVAL, au titre de 2003 et 2004, a reçu 86 000 demandes représentant l'achat de 3,8 millions de tonnes de fourrages. L'aide moyenne versée s'est élevée à 15 euros par tonne. Ces aides aux fourrages ont représenté 19,5 millions d'euros en 2003 et 38,6 millions d'euros en 2004. A ces montants doivent être ajoutés des prêts à taux réduits (1,5%) de l'ordre de 553 millions d'euros pour la sécheresse 2003 et 99 millions d'euros supplémentaires d'aménagement de dettes.

Il faut rappeler qu'à chaque sécheresse majeure, les exploitations les plus touchées sont les élevages, qui reçoivent donc la plus grande part des indemnités versées au titre des calamités agricoles.

4.4. Les effets sur les choix de culture et les niveaux de prélèvement d'irrigation

Les statistiques relatives aux consommations d'eau d'irrigation à l'échelle d'un territoire, d'une exploitation ou d'une parcelle font largement défaut. La généralisation des compteurs volumétriques permettra à l'avenir de fournir des évaluations plus détaillées. C'est pourquoi on ne dispose que des données 2003 pour évaluer l'impact de la sécheresse sur les prélèvements en eau. Rappelons que les données de prélèvement pour irrigation issues des Agences de l'Eau sont à prendre avec précaution en raison de leur manque de fiabilité.

. Augmentation des superficies irriguées

Les comparaisons 2000-2003, avec 1,6 Mha irrigués en France en 2000 (année plutôt humide) et 1,9 Mha en 2003, confirment un recours accru à l'irrigation en année sèche. Les données par culture (pour les exploitations professionnelles) montrent : une baisse des surfaces en maïs grain due à la conversion d'une partie des surfaces semées en ressources fourragères ; la multiplication par 3,7 de l'irrigation sur les céréales autres que le maïs.

Superficies irriguées des exploitations professionnelles en 2000 et 2003 (milliers d'ha)

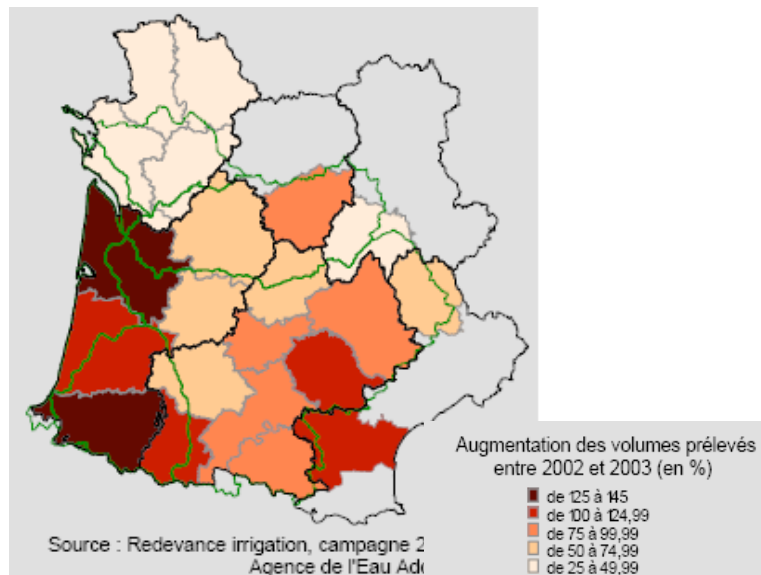
	Maïs	Autres céréales	Oléagineux, protéagineux	Légumes frais	Fourrages	Autres Cultures	Cultures permanentes	STH	Total cultures irriguées
2000	734	91	107	126	134	135	138	30	1 495
2003	701	336	127	142	175	170	148	28	1 827

Source : RGA – 2000 et Enquêtes Structures du SCEES - 2003

. Augmentation des volumes

Dans le bassin Adour-Garonne, la sécheresse de 2003 a provoqué une progression sans précédent des volumes prélevés : +85% par rapport à 2002, soit plus de 1 milliard de m³ supplémentaires. Cette augmentation a particulièrement concerné la région Aquitaine, qui a doublé ses prélèvements durant la campagne 2003 (+145% pour la Gironde, +112% pour les Landes et +138% pour les Pyrénées atlantiques), les plus fortes augmentations correspondant aux prélèvements individuels dans les nappes profondes. Cette progression des prélèvements a été plus faible en Poitou-Charentes, plafonnée par les restrictions de pompage. En Midi-Pyrénées, les volumes d'irrigation moyens sur maïs ont été de 140, 100 et 220 mm/ha pour les années 2001, 2002 et 2003 respectivement.

Effet de la sécheresse 2003 sur les prélèvements d'eau dans le bassin Adour-Garonne



5. La plante face au manque d'eau ; différences entre espèces et amélioration génétique de la tolérance

L'expertise s'est appuyée sur environ 200 références bibliographiques sélectionnées parmi les plus significatives de la littérature internationale. Les organismes les plus actifs sur le sujet sont les laboratoires de recherche français ou étrangers. Parmi ces derniers, on peut en particulier citer des organismes australiens (CSIRO, U Queensland et Camberra), américains (plusieurs universités) et des centres internationaux (CIMMYT, Mexique ; ICARDA, Syrie et IRRI, Philippines). Ces informations bibliographiques ont été complétées par des entretiens avec des spécialistes d'ARVALIS - Institut du Végétal et avec des agriculteurs, concernant leurs perceptions de l'évolution récente des génotypes (en particulier de maïs) quant à leurs réactions à la sécheresse.

5.1. Les adaptations de la plante au manque d'eau et leurs limites

5.1.1. La réduction de la transpiration

La principale réaction de la plante soumise à un manque d'eau est de réduire de manière active sa transpiration, par la fermeture de ses stomates dès que le déficit hydrique apparaît, et par une réduction de sa surface foliaire (réduction de la vitesse de croissance des feuilles ou de leur nombre, sénescence accélérée des feuilles).

. L'échange "eau contre carbone"

De même que l'eau, le CO₂ nécessaire à la photosynthèse passe par les stomates. La fermeture de ceux-ci réduit donc à la fois la transpiration, la photosynthèse et la production de biomasse. Cet échange "eau contre carbone" constitue la principale limitation de la tolérance à la sécheresse : on ne pourra jamais obtenir des plantes qui maintiennent leur productivité sans un niveau élevé de transpiration. Ce rapport entre la quantité de biomasse produite et la quantité d'eau transpirée, nommé efficacité de l'eau, varie d'une part avec les conditions climatiques, d'autre part avec l'espèce. Pour un génotype donné, l'efficacité de l'eau est d'autant plus faible que la demande climatique est plus importante, puisque la plante transpire plus. Les plantes croissant en été sont ainsi moins efficaces que celles croissant au printemps. Pour un climat donné, l'efficacité de l'eau peut être très

différente selon les espèces ; elle est maximale chez les espèces disposant d'un métabolisme dit C4 (maïs, sorgho) et plus faible chez les autres espèces (dites C3), avec une variabilité génétique importante à l'intérieur de chaque espèce.

. L'échange "eau contre chaleur"

Une partie importante de l'énergie solaire incidente est dissipée sous forme de transpiration. Une réduction de la transpiration par fermeture stomatique se traduit donc par un échauffement de la feuille, souvent de plusieurs degrés, qui peut devenir délétère pour les tissus. Le déficit hydrique se trouve ainsi souvent associé au stress thermique, parce que les périodes sèches sont souvent chaudes, mais aussi à cause des réductions de transpiration. Cet échange "eau contre chaleur" constitue donc une seconde limitation de la tolérance à la sécheresse, puisqu'une stratégie génétique visant à réduire la transpiration par le contrôle stomatique se trouve confrontée au risque de stress thermique.

5.1.2. La réduction de l'appareil reproducteur

La croissance des jeunes organes reproducteurs (fleurs puis graines) ainsi que leur nombre (défini par des processus de ramification) sont limités en cas de déficit hydrique. Il en résulte une réduction du nombre de grains, qui aura un effet sur le rendement même si les conditions hydriques redeviennent favorables. D'un point de vue évolutif, cette réduction du nombre de graines accompagnant celle de la photosynthèse et donc de la production de biomasse, s'interprète comme une adaptation de la plante pour assurer la production de graines moins nombreuses mais viables. Cette sensibilité de l'appareil reproducteur et ses effets irréversibles sur le rendement ont conduit à identifier une "période critique" autour de la floraison, dont l'existence a été démontrée pour plusieurs espèces dans les années 60. Cependant des études plus récentes suggèrent que les génotypes actuels de certaines espèces, comme le maïs, ont une sensibilité mieux répartie au cours du cycle cultural (cf. infra).

La sensibilité du développement reproducteur présente une grande variabilité génétique, inter- et intra-espèce. Certaines espèces comme la tomate ou le tournesol peuvent maintenir un développement reproducteur chez des plantes dont l'appareil végétatif est fortement stressé, alors que d'autres comme le maïs ont un appareil reproducteur plus sensible. Il existe également une variabilité génétique intra-espèce importante de cette sensibilité, en particulier chez le maïs.

5.1.3. Choix et stratégies de tolérance au manque d'eau de la plante

. Survie ou maintien de la production de biomasse

Les adaptations mises en oeuvre par la plante pour se protéger d'un stress hydrique dépendent de l'intensité du déficit auquel elle est soumise. Elles seront différentes pour une plante qui subit un stress sévère mettant en cause sa survie, et pour une plante cultivée qui, choisie en fonction du risque climatique local, ne sera soumise qu'à un déficit hydrique plus modéré. La survie des plantes n'est en général pas un mécanisme pertinent en situation agricole pour des plantes de grandes cultures, alors qu'elle peut l'être pour des couverts spontanés méditerranéens ou pour des espèces prairiales.

. Protection contre le stress hydrique ou maintien des capacités de croissance

En dehors des situations qui mettent en jeu la survie de la plante, celle-ci est confrontée à ce "choix", puisque les protections contre le stress hydrique ont un coût en termes de productivité : le contrôle stomatique et la réduction de surface foliaire nécessaires au maintien de l'état hydrique de la plante se traduisent par une baisse de photosynthèse ; la réduction de transpiration se paie en terme de risque de stress thermique ; le maintien de la viabilité des graines se fait au détriment de leur nombre.

C'est donc en terme d'optimisation entre des processus partiellement contradictoires, et non d'amélioration pure, qu'il faut définir des objectifs d'amélioration génétique : à chaque instant, on ne peut pas favoriser à la fois la protection de la plante, qui implique une réduction de la transpiration et du nombre d'organes, et le maintien du potentiel de rendement qui implique l'inverse. L'optimisation consiste à identifier les périodes et les processus clés, pour lesquels il faut favoriser la croissance, entre d'autres processus qu'on peut au contraire réduire.

5.2. Les stratégies possibles de tolérance : différences entre espèces et pistes d'amélioration génétique

5.2.1. Stratégies : esquive, évitement, efficacité de l'eau et tolérance

Les adaptations des plantes au manque d'eau, et les améliorations génétiques de la tolérance à la sécheresse, peuvent être classées en quatre stratégies. Les deux premières (esquive et évitement) sont de nature "conservatrice", et permettent une réduction du risque de perte de rendement en échange d'une réduction du rendement maximum atteignable. La troisième (amélioration de l'efficacité de l'eau) consiste à obtenir plus de production par volume d'eau transpirée. Elle est de nature plutôt conservatrice. La dernière (tolérance) est au contraire de nature "dépendante" en privilégiant le maintien de la production en augmentant le risque de perte totale de rendement.

L'évolution naturelle a eu tendance à privilégier les stratégies conservatrices, qui permettent à un génotype de se perpétuer alors que l'agriculture favorise, dans certaines limites, les stratégies dépensières de maintien du rendement puisque la production de quelques graines par plante a peu d'intérêt économique. Les stratégies conservatrices ont cependant un intérêt agronomique dans certains contextes pédoclimatiques.

L'esquive consiste à éviter de subir le déficit hydrique en effectuant le cycle de développement pendant des périodes pluvieuses et/ou à demande climatique faible. On réduit alors le risque de perte de rendement, en échange d'une réduction du rendement maximum atteignable (stratégie "conservatrice").

- Le décalage du cycle cultural depuis des périodes à forte demande climatique vers des périodes à plus faible risque est la stratégie des cultures d'hiver, qui réalisent leur cycle sur une période à faible risque de déficit hydrique et compensent une croissance à une saison où le rayonnement incident est réduit par une durée plus longue du cycle. Il est envisageable de l'appliquer à des cultures de printemps dont le semis pourrait être avancé de plusieurs mois, grâce à une sélection sur la tolérance au froid.

- Le raccourcissement du cycle cultural réduit la consommation totale d'eau et permet que les derniers stades du cycle végétatif se produisent avec une humidité du sol encore élevée. Son inconvénient est de réduire aussi le rayonnement intercepté et donc le rendement maximum atteignable.

L'évitement consiste à empêcher que la plante, soumise à des conditions hydriques défavorables, ne subisse un stress hydrique trop important. Ces adaptations réduisent le risque de perte de rendement, mais ont le plus souvent un coût en terme de rendement maximum (stratégie "conservatrice").

- Réduction de la conductance stomatique et de la croissance foliaire

La réduction de la transpiration qui s'ensuit économise l'eau du sol. Elle limite aussi la photosynthèse cumulée ; on échange donc une réduction du risque contre une réduction du rendement potentiel. Les mécanismes qui gouvernent cet évitement commencent à être connus et peuvent être manipulés génétiquement, par exemple *via* la biosynthèse d'hormones ou de protéines contrôlant la croissance.

- Développement racinaire accru

La sélection pour une croissance racinaire plus forte n'a d'intérêt que si elle permet à la plante d'accéder à une ressource en eau supplémentaire. Elle a eu dans certains cas des résultats spectaculaires en sols très profonds ou dans des milieux comportant une nappe d'eau profonde qui peut être atteinte par les racines des génotypes améliorés. Dans le cas contraire, l'augmentation de la masse racinaire peut être contre-productive en raison de son coût en carbone. Les sélections récurrentes pour améliorer la tolérance du maïs à la sécheresse ont ainsi abouti à *diminuer* la biomasse racinaire, et la réduction d'efficacité du système racinaire est même parfois recherchée en climat très sec afin d'économiser l'eau du sol pour la fin du cycle.

L'amélioration de l'efficacité de l'eau. Le rapport entre la quantité de biomasse produite et la quantité d'eau transpirée, nommé efficacité de l'eau, a une variabilité génétique importante. Elle est déjà élevée chez les espèces C4 (maïs, sorgho). Pour les autres espèces (C3), il existe une variabilité génétique naturelle dont on commence à connaître les déterminants génétiques pour plusieurs espèces. Il est à noter que les espèces oléagineuses et les légumineuses ont des efficacités de l'eau apparemment plus faibles que les autres espèces. Ceci est lié pour les premières à une forte teneur en huile des récoltes, sachant que l'huile est plus "coûteuse" à produire que l'amidon, et pour les secondes au coût énergétique de la fixation symbiotique de l'azote. La sélection pour une meilleure efficacité de l'eau a souvent conduit à retenir des plantes ayant des conductances stomatiques faibles, et donc abouti à une photosynthèse réduite (stratégie "conservatrice"). La sélection conjointe d'une meilleure efficacité de l'eau et d'une conductance stomatique élevée a donné des résultats importants chez le blé, dans des conditions de sécheresse intense australienne. Deux variétés tolérantes ont ainsi été commercialisées, qui ont un gain de production appréciable en conditions très sèches (pluies de 250 mm par an). L'utilisation de ces variétés en Europe ne serait vraisemblablement pas intéressante puisque leur intérêt comparatif s'annule pour des déficits plus modérés comme ceux qui prévalent en France.

La tolérance consiste à maintenir les fonctions de la plante, croissance, nombre d'organes, transpiration, photosynthèse, malgré le déficit hydrique (stratégie "dépensière"). Ces adaptations permettent le maintien du rendement maximal mais ont tendance à augmenter le risque de perte totale de rendement. Elles sont favorables en conditions modérément sèches, mais pourraient s'avérer contre-productives en situation de déficit hydrique plus sévère (ne permettant plus l'alimentation hydrique d'un couvert trop développé ou le remplissage de grains trop nombreux).

- Maintien de la croissance foliaire

Le maintien de la croissance foliaire augmente la photosynthèse cumulée, mais aussi la transpiration. Cependant, comme elle réduit aussi l'évaporation du sol, la croissance foliaire est généralement retenue comme un caractère favorable pour la tolérance au déficit hydrique, avec des effets généralement positifs sur le rendement, du moins tant que le climat n'est pas très sec. Plusieurs programmes d'amélioration génétique ont porté sur les mécanismes impliqués dans la réduction adaptative de la croissance foliaire comme le maintien de la turgescence (ajustement osmotique), le maintien de la croissance et de la division cellulaires, les caractéristiques mécaniques et hydrauliques des parois cellulaires, la signalétique hormonale... Ils ont plus porté pour l'instant sur

l'identification de la variabilité génétique de ces caractères et leurs déterminismes moléculaires que sur la production de génotypes tolérants.

- Maintien de la croissance reproductrice

Les effets irréversibles sur le rendement de la réduction de l'appareil reproducteur expliquent qu'une grande partie de l'effort génétique sur la sécheresse ait porté sur le maintien du nombre de grains, bien que cette stratégie comporte un risque de non-viabilité des graines. Des progrès déterminants ont ainsi été obtenus pour le maintien du rendement en sec, en particulier pour le maïs. Des méthodes biotechnologiques d'introgession de fragments de génome permettant le maintien de la croissance reproductrice ont permis d'obtenir des variétés de maïs tolérantes, utilisées en Afrique et au Mexique (cf. infra). Ces génotypes ne sont pas utilisables en France, mais un travail est en cours, dans le cadre de Génoplante, pour transférer des allèles d'intérêt dans du matériel européen.

- Retard de la sénescence foliaire ("stay green")

Le déficit hydrique se traduit généralement par une accélération de la sénescence des feuilles, qui permet la translocation des réserves carbonées et azotées depuis les feuilles vers les grains, au détriment du maintien de la photosynthèse. Des travaux sont menés (en particulier sur sorgho et blé) pour maintenir plus longtemps une surface foliaire verte. Ils ont eu des résultats le plus souvent positifs, mais parfois négatifs en climats très secs.

5.2.2. Classification de quelques espèces importantes quant aux stratégies de tolérance

Les critères sont de plusieurs ordres, et suivent les stratégies ci-dessus. Ils sont présentés pour plusieurs d'espèces dans le tableau ci-dessous, dont la fonction est plus de montrer les différences d'acceptations de la tolérance que de réaliser un inventaire exhaustif des espèces. Ce tableau est issu de dires d'experts, et peut donc être contesté. Ses conclusions pourraient aussi être profondément altérées à la suite de progrès génétiques.

Espèce	Risque climatique, esquivé / évitement			Efficience de l'eau		Tolérance		Global Appréciation, "réputation"
	Cycle cultural	Système racinaire	Degré de esquivé / évitement	Efficience climatique	Efficience intrinsèque	Robustesse système végétatif	Robustesse système reproducteur	
Colza	automne-printemps	profond	++++	+++	+	+	+	++++
Luzerne	pérenne	très profond	+++	++	+	+	+	++++
Vigne	pérenne	très profond	++++	+	++	+	+	++++
Blé	hiver-printemps	profond	+++	+++	+	++	++	+++
Tournesol	printemps-été	profond	+	+	-	++	+++	++
Orge	printemps-été	moyen	++	+	+	++	+++	+++
Sorgho	été	moyen	+	-	+++	++	+++	+++
Pois	printemps-été	faible	-	+	+	+	+	-
Maïs	été	moyen	+	-	+++	++	-	-

Il est d'abord important de noter que la consommation en eau des cultures est proche entre espèces, lorsque celles-ci sont soumises à un même climat aux périodes de leur cycle où leur feuillage est pleinement développé et non encore sénescent. Ainsi, des couverts de maïs, de tournesol, de sorgho ou de blé ont des consommations en eau similaires aux alentours de leur floraison à caractéristiques climatiques similaires (de 1 à 6 l/m²/j, suivant les caractéristiques météorologiques de la journée considérée). La consommation en eau des cultures dépend donc pour l'essentiel d'une part de la durée de leur cycle, d'autre part du climat moyen pendant ce cycle. Ainsi, des couverts de blé et de maïs ont des consommations en eau similaires (environ 500 l d'eau par m² et par an) : le blé a un cycle plus long que le maïs, mais celui-ci réalise son cycle pour l'essentiel en été.

. Un premier groupe d'espèces n'a pas de caractéristique particulière de tolérance au déficit hydrique, mais leur cycle cultural se déroule pour l'essentiel pendant les périodes automnale et hivernale pendant lesquelles le risque de déficit hydrique est très faible (esquive). Il s'agit des espèces d'hiver comme le colza ou, dans une moindre mesure, le blé d'hiver. Ils ont dès lors une bonne tolérance globale et une bonne efficience de l'eau liée au fait que la demande transpiratoire est faible pendant leur cycle végétatif.

. D'autres espèces, non particulièrement tolérantes intrinsèquement, le sont en raison d'un système racinaire pérenne et très développé, qui parvient à coloniser même des sols peu favorables (évitement). Il s'agit par exemple de la vigne et de la luzerne. Ces espèces perdent leur caractère de tolérance si elles sont placées dans un sol dont les couches profondes ne sont pas colonisables, même par leur système racinaire.

. D'autres espèces d'été ont une tolérance intrinsèque forte, tant des appareils végétatif que reproducteur, et parviennent donc à des productions acceptables en l'absence d'irrigation. Il s'agit notamment du tournesol ou du sorgho. Il est à noter que ce caractère n'est pas lié à l'efficience de l'eau transpirée : le tournesol a une conductance stomatique élevée en conditions irriguées et une faible efficience intrinsèque de l'eau, au contraire du sorgho qui a une efficience de l'eau élevée en raison de son métabolisme C4 et de son contrôle stomatique. Une caractéristique commune de toutes ces espèces est la forte tolérance au déficit hydrique de leur développement reproducteur.

. Enfin d'autres espèces d'été ont une tolérance intrinsèque faible, et ne peuvent être cultivées que soit en sol profond pour celles qui ont un système racinaire bien développé, soit avec de l'irrigation. Il s'agit par exemple du pois et du maïs. Ce dernier mérite quelques remarques particulières. C'est l'espèce ayant l'efficacité de l'eau la plus élevée, à cause de son système photosynthétique C4 et de ses capacités de croissance élevées, il a des mécanismes de régulation particulièrement efficaces en ce qui concerne son système végétatif (croissance racinaire rapide et contrôle stomatique élaboré), mais son système reproducteur est particulièrement fragile ce qui nécessite son irrigation. C'est ce paradoxe qui justifie le fait que de nombreuses recherches sur la tolérance au déficit hydrique sont menées sur cette espèce.

5.3. Amélioration génétique de la tolérance à la sécheresse

5.3.1. Les résultats de la sélection "classique"

Cette méthode consiste à effectuer des croisements puis à sélectionner des génotypes favorables parmi les milliers de descendants au cours des générations suivantes. Le critère utilisé est l'évaluation phénotypique (phénotype : caractère observable ou mesurable de la plante dans un environnement donné), guidée par des méthodes qui varient selon l'espèce et l'héritabilité du caractère sélectionné. Cette méthode ne peut exploiter que la variabilité génétique présente dans l'espèce considérée et dans des espèces apparentées. Presque toutes les variétés commercialisées actuellement ont été obtenues par cette méthode. Cette sélection s'est essentiellement réalisée sans référence à la tolérance à la sécheresse. Elle a amené une amélioration génétique des rendements dans des conditions "moyennes", en général plutôt favorables. Cette amélioration des rendements ne s'est toutefois pas opérée aux dépens de la tolérance au déficit hydrique, du moins dans le cas du maïs, dont les génotypes récents ont une production améliorée en condition de sécheresse par rapport aux génotypes anciens.

L'augmentation de la biomasse affectée aux grains (en proportion de la biomasse totale : indice de récolte) a été l'une des voies principales d'amélioration du rendement, tant en conditions sèches qu'irriguées. La sélection a abouti à augmenter cette proportion, mais aussi à la maintenir élevée en conditions défavorables. On atteint cependant probablement une limite, avec 50-60% de la biomasse totale affectée aux grains chez les génotypes récents de plusieurs espèces (maïs, tournesol, blé). Il est donc probable que la stratégie visant à maintenir le développement reproducteur trouvera rapidement une limite pour les conditions bien irriguées. Un effort reste nécessaire pour les conditions de sécheresse, mais la sensibilité du développement reproducteur à la floraison du maïs semble avoir déjà été réduite, de façon non intentionnelle, par la sélection classique sur le rendement. Plusieurs études, ainsi que la perception des spécialistes consultés, suggèrent que des génotypes récents sont moins sensibles que les anciens au manque d'eau durant la floraison. Même si ce type d'étude n'existe pas encore pour le matériel européen, il est possible que l'importance des sécheresses autour de la floraison, qui est probablement l'un des résultats scientifiques les mieux diffusés et acceptés par les agriculteurs, soit surestimée avec les génotypes actuels, et que les irrigations pléthoriques du maïs au moment de sa floraison se justifient de moins en moins.

L'amélioration des rendements en conditions modérément sèches ne s'est pas accompagnée d'une augmentation notable de consommation d'eau par les plantes. Cette dernière est liée à la surface foliaire et la conductance stomatique mais de façon non proportionnelle. L'augmentation de consommation en eau a donc été nulle quand le progrès génétique a été obtenu par augmentation de l'indice de récolte (pas d'augmentation de surface foliaire), et modérée quand il a été obtenu par augmentation de la croissance foliaire par maintien de la surface foliaire en fin de cycle (augmentation de biomasse non proportionnelle à la transpiration).

5.3.2. Les perspectives ouvertes par les biotechnologies

. Les apports de la sélection assistée par marqueurs

Comme la sélection classique, celle-ci s'appuie sur la variabilité naturelle existant dans l'espèce à améliorer, mais permet une plus grande efficacité en ajoutant une évaluation génétique à l'évaluation phénotypique des plantes. Il s'agit d'identifier des fragments de chromosomes, repérés par des marqueurs moléculaires, qui sont associés à des caractères liés à la tolérance au déficit hydrique. Cette identification est opérée par des analyses statistiques de centaines de lignées (croisements de lignées ayant des caractères contrastés, ou collections de lignées non apparentées). Ces fragments de chromosomes sont ensuite transférés dans du matériel génétique intéressant agronomiquement, ce qui permet l'obtention de variétés commerciales tolérantes.

L'essentiel de l'effort actuel d'amélioration génétique utilise cette méthode. Les résultats, incontestables, obtenus par le CIMMYT pour améliorer le maintien de l'appareil reproducteur du maïs en conditions sèches ont été obtenus par sélection assistée par marqueurs. Ils se poursuivent en France, sur du matériel européen, pour le maintien des croissances végétative et reproductrice du maïs dans le cadre de Génoplante. Les résultats obtenus sur sorgho pour le maintien de la surface verte en fin de cycle, et les travaux actuels sur l'amélioration de l'efficacité de l'eau du blé en Australie sont également obtenus avec cette méthode. Même si elle n'a pas encore fourni un grand nombre de génotypes tolérants, elle a un grand potentiel pour améliorer les adaptations présentées au paragraphe 5.2.

. L'analyse des modifications de l'expression des gènes, des quantités de protéines et des métabolismes en déficit hydrique

Depuis quelques années, de nouveaux outils permettent de suivre simultanément les variations d'accumulation de milliers d'ARNm transcrits des gènes (transcriptôme), de l'accumulation de protéines (protéome), ou de l'activité de celles-ci (activitome, métabolome). Ces analyses montrent que le déficit hydrique met en jeu une série de mécanismes à l'échelle de gènes et de protéines, qui sous-tendent les réactions adaptatives présentées au paragraphe 5.2. En particulier, certains gènes dont l'expression est déclenchée en cas de déficit hydrique contrôlent plusieurs fonctions, en pilotant l'expression d'autres gènes directement impliqués dans ces fonctions physiologiques. L'analyse des quantités de protéines et celles de l'activité de ces protéines sont en plein développement, et devraient permettre de mieux en mieux comprendre les réactions des plantes. Même si les résultats sont difficiles à synthétiser actuellement, du fait de l'hétérogénéité des conditions dans lesquelles les expériences sont réalisées, ces approches permettent une analyse intégrée des mécanismes d'adaptation des plantes. Elles fournissent des gènes candidats intéressants pour la sélection assistée par marqueurs et, au-delà, des stratégies possibles pour l'optimisation des échanges eau contre carbone et eau contre chaleur (ré-ingénierie du développement en stress, cf. infra).

. Les perspectives ouvertes par la transgénèse

Cette technique consiste à transférer, dans une plante modèle ou dans un génotype cultivé déjà performant, un gène d'intérêt, dont on connaît ou suspecte l'effet. Ce gène peut provenir d'espèces, voire de règnes différents, mais il peut aussi s'agir d'un gène présent dans l'espèce, dont on modifie l'expression.

Des plantes transgéniques expérimentales, dont l'expression d'un gène a été modifiée, sont utilisées dans les recherches cognitives sur la résistance à la sécheresse. La sur- ou la sous-expression d'un gène que l'on pense impliqué dans les réactions au déficit hydrique permet en effet de mettre en évidence ses effets aux niveaux moléculaire, physiologique et agronomique en fonction des conditions climatiques. Des transferts de gènes (gènes de synthèse d'hormones végétales, gènes codant des protéines impliquées dans la signalisation cellulaire du stress...) ont ainsi fourni des résultats importants pour la compréhension des mécanismes impliqués dans les adaptations à la sécheresse. Dans tous les programmes modernes de sélection, la transgénèse accompagne la sélection assistée par marqueurs et l'analyse génomique présentées aux deux paragraphes précédents. Elle permet en effet de tester rapidement l'effet d'un gène, et ainsi de guider la sélection assistée par marqueurs.

Il est cependant à noter qu'il n'existe actuellement aucune variété transgénique commercialisée pour sa tolérance à la sécheresse. Des résultats spectaculaires ont été obtenus en ce qui concerne la survie des plantes au déficit hydrique, mais sans débouché agronomique jusqu'à présent en ce qui concerne la productivité des plantes soumises à des déficits hydriques compatibles avec l'agriculture. Ceci est largement dû à la complexité des adaptations, et aux caractères partiellement contradictoires des échanges "eau contre carbone" et "eau contre chaleur". Le chemin à parcourir entre la maîtrise de l'expression d'un gène et l'utilisation de ce gène pour l'amélioration génétique est en effet long. Pour la tolérance à la sécheresse, la transgénèse reste donc pour l'instant un outil de recherche.

. Vers une "réingénierie" du développement des plantes en stress

Sous nos climats non arides, les scénarios de sécheresse agricole sont multiples quant à leur calendrier, leur sévérité ou leur probabilité. Les paragraphes précédents montrent que la tolérance à la sécheresse ne peut pas se définir par des critères universels : un caractère qui confère une tolérance dans un scénario peut être sans intérêt ou même contre-productif dans un autre. Il ne s'agit donc pas de rechercher une tolérance à la sécheresse, mais aux différentes sécheresses qui peuvent survenir sous nos climats, c'est-à-dire une adaptation plus fine à des scénarios climatiques.

L'amélioration du comportement des plantes en stress se heurte donc à des exigences contradictoires de protection (stratégies conservatrices) ou de maintien de la productivité (stratégies dépensières), avec des optimums qui diffèrent suivant les scénarios climatiques. Pour dépasser cette contradiction, le progrès génétique devra favoriser spécifiquement certaines fonctions, dans les organes et aux périodes essentielles pour la production dans les conditions pédoclimatiques considérées. Ceci suppose une ré-ingénierie du développement des plantes en stress, mettant en jeu les "plates formes" de contrôle de plusieurs fonctions (hormones, facteurs de transcription). Cette option impliquerait une spécialisation accrue des génotypes vis-à-vis de scénarios pédoclimatiques précis, optimisant les contrôles pour ces scénarios et pour un risque accepté par l'agriculteur (plus de sécurité ou plus de production).

Certains de ces progrès sont déjà présents et peuvent maintenant être étendus. Il s'agit, par exemple, de maïs à développement reproducteur plus robuste. D'autres devraient voir le jour dans quelques années, en particulier des plantes ayant une stratégie cohérente par rapport au maintien de la production en condition sèche (par exemple, maïs ayant la tolérance du sorgho tout en gardant des potentialités élevées). Il sera à terme envisageable que l'agriculteur oriente lui-même le développement des plantes en cours de saison agricole en fonction de l'état des réserves en eau du sol (par exemple, degré d'évitement via le choix de la date de floraison, ou choix de stratégies "conservatrices" ou "dépensière"). Ces progrès ne permettront en aucun cas une production abondante dans des conditions arides, mais une optimisation de l'utilisation de l'eau pour maintenir les rendements tout en réduisant les apports d'eau.

5.3.3. Une certification de la "tolérance à la sécheresse" pour des scénarios climatiques définis ?

Dans le contexte décrit précédemment, où un génotype tolérant est défini par rapport à un contexte pédoclimatique, il peut être tentant pour un obtenteur de rechercher les conditions qui optimisent le comportement du génotype en conditions de sécheresse, même si ces conditions s'éloignent de celles rencontrées dans les systèmes de culture européens. Dans ces conditions, il ne semble pas souhaitable qu'une qualification "variété tolérante à la sécheresse" soit définie par les obtenteurs eux-mêmes sans être labellisée par une instance indépendante comme le CTPS. Celle-ci se chargerait de tester la tolérance dans des protocoles standardisés qui se rapprochent le plus possible des conditions environnementales rencontrées dans les parcelles agricoles européennes. Il ne s'agirait pas de caractériser ainsi l'ensemble des variétés inscrites (plus d'une centaine par espèce et par an) mais seulement celles pour lesquelles les obtenteurs souhaiteraient obtenir le label "tolérant à la sécheresse".

6. Les stratégies culturelles

La littérature scientifique abonde en références sur les stratégies d'adaptation à la contrainte hydrique, qu'il s'agisse de systèmes non irrigués ou bénéficiant d'une irrigation de complément. Ces travaux sont souvent menés dans des régions semi-arides où le déficit hydrique est structurel (Australie, Chine, Inde, USA...). La transposition des solutions techniques ne peut se faire directement, bien que les concepts de base restent valables. Force est de constater que très peu de travaux européens abordent les stratégies d'adaptation à la sécheresse. Les études sur l'irrigation de complément sont plus nombreuses en particulier en France (INRA, ARVALIS-Institut du végétal, Cetiom, Cemagref) et en Italie.

Les informations sur les techniques culturelles réellement appliquées par les agriculteurs sont peu nombreuses. Les seules données statistiques nationales sont celles des enquêtes "Pratiques culturelles" du SCEES (1994 et 2001) ; elles restent peu exploitées de manière générale. Les résultats publiés le sont sous forme de statistiques régionales par pratique. Ceux de l'enquête 2001 comportent quelques données sur l'irrigation du maïs (pour 8 régions), du pois (région Centre), de la pomme de terre (Picardie et Nord), mais aucune information sur l'irrigation des autres cultures susceptibles de recevoir un complément (céréales par exemple). Ces chiffres, et surtout toutes les données sur les autres pratiques (date et densité de semis, fertilisation...) qui jouent sur les besoins en eau des cultures, seraient exploitables³ pour évaluer l'adaptation des itinéraires techniques au manque d'eau.

Concernant les choix d'assolement, les règles de décision des agriculteurs n'ont pas fait l'objet de beaucoup d'enquêtes. Outre les potentiels de production des différentes espèces, sont aussi à considérer les débouchés, les prix de vente, les coûts de production et marges, les niveaux de charges de structure et de primes incitatives, le temps de travail... autant d'éléments de la décision dont on mesure mal la hiérarchie dans la pratique.

6.1. Les stratégies de réduction de la vulnérabilité au manque d'eau

Ces stratégies concernent en premier lieu les systèmes non irrigués (qui représentent plus de 90% des surfaces cultivées), mais aussi les systèmes irrigués dont on chercherait à réduire la consommation en eau, par un passage à une irrigation restrictive ou de complément (cf. infra).

Les trois stratégies d'adaptation (esquive, évitement et tolérance) présentées plus haut s'appliquent également à la conduite de culture. S'y ajoute la stratégie d'accroissement de l'eau disponible pour la culture, par maximisation du stockage d'eau dans le sol, augmentation des capacités d'extraction (système racinaire dense et profond) ou recours à l'irrigation.

6.1.1. Les stratégies d'esquive

Elles consistent à modifier le positionnement ou la durée du cycle cultural pour l'ajuster à la ressource en eau disponible, c'est-à-dire :

- achever le cycle cultural avant l'apparition d'une sécheresse terminale,
- éviter la coïncidence entre périodes de forte demande évaporative ou de faible pluviométrie et périodes clés du cycle cultural (phases critiques ou sensibles, correspondant notamment à la floraison et au remplissage du grain).

. Choix de cultures semées à l'automne ou en fin d'hiver

Les cycles d'hiver décalent la phase de croissance active vers les périodes de demande évaporative modérée mais ne réduisent pas la quantité d'eau transpirée totale par rapport aux cultures d'été (non irriguées), en raison

3. Les données brutes (par parcelle géoréférencée) devraient permettre, au prix d'un important travail de traitement, de "reconstituer" et localiser les systèmes de culture (cadre dans lequel la lecture des pratiques culturelles réalisées trouve sa cohérence) et d'évaluer leur sensibilité vis-à-vis du risque de manque d'eau.

d'une durée de végétation supérieure (8-9 mois pour le blé contre 5-6 mois pour les cultures d'été). Les phases sensibles sont avancées par rapport aux périodes de plus fort risque de déficit hydrique. Cette stratégie utilise le fait que l'efficacité de l'eau est plus élevée lors des phases de faible demande évaporative. Il en résulte un plus faible besoin en eau d'irrigation.

Sont concernées les cultures d'hiver classiques, colza, blé et orge, mais aussi le passage au pois d'hiver, dont le rendement reste inférieur à celui du pois de printemps, mais qui permet de se passer de l'irrigation. On pourrait également envisager de semer le tournesol en hiver, comme cela se pratique déjà en Espagne du sud et au Maroc ; cette option nécessiterait la sélection de variétés tolérantes au froid, et l'adaptation de tout l'itinéraire technique (fertilisation, désherbage...).

. Choix d'une avancée de la date de semis

Il s'agit, sans changement majeur du cycle cultural, de choisir une date de semis permettant une esquivance de la sécheresse par un décalage du cycle. La culture d'été semée tôt au printemps nécessite que la plante tolère les basses températures. La culture d'hiver semée tôt à l'automne ne présente pas d'avantage en terme d'esquivance.

. Semis de variétés plus précoces

Les variétés plus précoces, c'est-à-dire dont le cycle est plus court, peuvent esquivancer le stress de fin de cycle. Assurant une couverture rapide du sol et présentant un indice foliaire plus faible, ces variétés sont aussi généralement moins exigeantes en eau. Cette esquivance par utilisation de variétés très précoces (à la floraison et/ou à la maturité) n'est intéressante, en moyenne, que pour des situations à sécheresse terminale ou à très faible réserve utile.

Le positionnement optimal du cycle de culture dépend de la variabilité et de l'intensité de la contrainte hydrique. En conditions méditerranéennes semi-arides, le meilleur choix est généralement de privilégier l'esquivance par des variétés à floraison précoce, alors qu'en conditions plus océaniques (à pluviométrie mieux répartie) la réduction de potentiel est probablement plus pénalisante que le risque de limitation sévère par le manque d'eau.

6.1.2. Les stratégies d'évitement

L'objectif est de diminuer la demande en eau en période végétative afin de conserver une partie de la ressource pour les phases ultérieures de forts besoins (floraison, remplissage du grain). Il s'obtient par un "rationnement végétatif" de la culture, qui consiste à réduire la densité de peuplement et/ou la fertilisation azotée pour limiter le développement de la surface foliaire et donc la transpiration.

Cette stratégie est en concurrence avec une autre, qui consiste à rechercher une fermeture rapide du couvert pour réduire l'évaporation du sol et contrôler les adventices, et donc à favoriser une croissance précoce et un fort indice foliaire... qui contribuent aussi à l'épuisement précoce de la réserve en eau. D'autres objectifs liés à la structure du peuplement ou à la fertilisation sont à prendre en compte : le désherbage (semis dense pour étouffer les adventices ou interrang large pour intervenir mécaniquement), la protection phytosanitaire (risques de maladies accrues par l'excès de végétation)...

La stratégie optimale dépend de la fréquence, de l'intensité et de la période d'apparition des sécheresses. Lorsque l'eau disponible dans le sol est très limitée, on recommande en général de réduire la densité de semis pour augmenter la quantité disponible par plante, mais de maintenir l'apport d'azote dont les effets positifs liés à l'augmentation de l'indice foliaire l'emporteraient sur l'effet de sur-consommation d'eau. Pour atteindre le juste rationnement par la densité ou l'azote, la prise en compte du rendement accessible sans irrigation apparaît suffisant.

6.1.3. Les stratégies de tolérance

Elles consistent à choisir une espèce ou une variété intrinsèquement tolérante à la contrainte hydrique (ou peu consommatrice en eau).

. Choix d'espèces d'été intrinsèquement tolérantes à la sécheresse

Il s'agit principalement de cultures aptes à prélever l'eau en profondeur ou tolérant mieux le défaut d'alimentation en eau par des mécanismes d'adaptation (réduction de la surface foliaire, ajustement osmotique...). Les plus importantes sont :

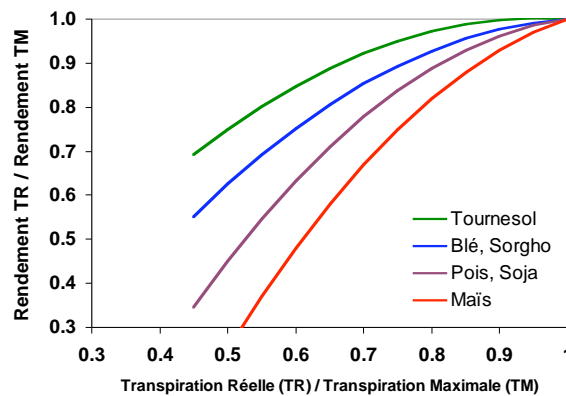
- le sorgho, espèce biologiquement proche du maïs, mais dont l'enracinement est particulièrement efficace en profondeur et qui maintient son activité photosynthétique et transpiratoire pour une gamme étendue d'états hydriques du sol ;

- le tournesol, espèce qui possède également un système racinaire très efficace, et qui s'adapte à la ressource en eau disponible en diminuant sa croissance végétative au profit de la phase de remplissage des graines.

La littérature abonde d'articles consacrés à ces deux espèces qui offrent une alternative intéressante au maïs en situation de pénurie d'eau.

La Figure ci-dessous illustre la sensibilité de 4 types de cultures à la contrainte hydrique, maïs et tournesol ayant des comportements très opposés.

Réponse du rendement de 4 types de cultures au niveau de satisfaction du besoin en eau
(Debaeke et Nolot, 2006)



. **Choix de variétés** intrinsèquement plus tolérantes à la sécheresse

Les catalogues variétaux ne mentionnent pas ces tolérances intrinsèques particulières, qui ne font pas l'objet d'une sélection et ne sont donc pas testées dans les essais variétaux. Depuis quelques années, le GEVES a introduit cependant 2 conduites (avec et sans irrigation) dans les sites d'évaluation en vue de l'inscription des variétés de sorgho.

6.1.4. L'augmentation de la disponibilité initiale en eau

Dans les régions semi-arides, le stock d'eau au semis est déterminant pour le rendement de la culture, et diverses pratiques sont préconisées pour le maximiser : effectuer un travail minimum du sol avec mulch de résidus de culture pour limiter l'évaporation et faciliter l'infiltration en réduisant le ruissellement ; maintenir le sol nu pour limiter les pertes par transpiration ; introduire une jachère pour stocker et conserver l'eau. On peut aussi augmenter l'extraction par la culture d'eau disponible en profondeur en effectuant un sous-solage.

Si la fréquence des sécheresses d'automne-hiver devait augmenter dans nos conditions, ces techniques de "conservation", qui relèvent de l'aridoculture, pourraient alors être considérées. Dans l'état actuel, la fréquence de recombement de la réserve en eau en sortie d'hiver est élevée, sauf en sols profonds et/ou après une culture à forte extraction en profondeur (tournesol, par exemple).

On pouvait penser que la pratique des cultures intermédiaires pièges à nitrates allait contribuer à dessécher davantage le profil de sol au printemps : en fait, l'effet positif sur la réduction de l'évaporation du sol et sur l'infiltration compenserait le supplément de transpiration lié au couvert, pourvu que celui-ci soit détruit assez tôt.

6.1.5. Les combinaisons de stratégies et marges de manoeuvre

L'agriculteur dispose donc de plusieurs stratégies d'adaptation aux faibles disponibilités hydriques. Dans les zones où le rendement est régulièrement limité par l'eau, c'est l'application d'une combinaison de ces stratégies qui permet de réduire les impacts du stress hydrique, en évitant de trop pénaliser le rendement les années les plus favorables (recherche de "productivité sous contrainte hydrique" et non de "tolérance à la sécheresse").

Du fait d'effets contradictoires (une fermeture rapide du couvert diminue l'évaporation du sol mais accroît la transpiration...), et de la variabilité pluviométrique qui caractérise nos climats, seul un modèle de simulation sol-plante-itinéraire technique prenant en compte cette variabilité climatique et l'intensité des contraintes, permettrait d'évaluer les stratégies de rationnement et d'esquive pour nos conditions de milieu. L'expérimentation classique ne peut en effet prendre en charge l'extrême variabilité interannuelle et intra-saisonnière des précipitations, la gamme très large des scénarios culturels à tester et les interactions qui en résultent.

Cependant, on peut classer les stratégies d'adaptation en 4 groupes d'intérêt décroissant (efficacité potentielle et probabilité d'obtenir le résultat voulu par rapport à l'objectif de conservation de l'eau pour la culture) : 1. esquive (cultures d'hiver) ; 2. tolérance (cultures d'été) ; 3. esquive (variétés de cultures d'été précoces) ; 4. évitement (rationnement de la culture), cette dernière étant la plus aléatoire et d'efficacité réduite.

Par ailleurs, dans les contextes agricoles français, la gestion de la fertilité minérale ou la protection contre les bio-agresseurs sont des priorités plus fortes que la conservation de l'eau pour ce qui concerne le raisonnement de l'itinéraire technique. D'autres considérations rentrent également en jeu comme la qualité des produits récoltés.

Les décisions finales de l'agriculteur dépendront *in fine* de son degré d'aversion vis-à-vis du risque économique et climatique et de l'information dont il disposera pour objectiver ses décisions.

6.2. Systèmes irrigués et stratégies d'économies d'eau

Le contexte français n'est pas (encore) celui de l'aridoculture ; néanmoins, l'irrigation s'est beaucoup développée depuis une trentaine d'années. Or les irrigants se trouvent confrontés à un risque accru de réduction des quantités d'eau utilisables par l'irrigation, que les ressources soient physiquement limitées par des sécheresses ou que l'accès à ces ressources soit socialement contesté. Ils ne peuvent guère espérer un accroissement important de l'eau disponible par "création" de nouvelles ressources. Ce diagnostic conduit à rechercher une irrigation plus économe en eau : savoir gérer une irrigation restrictive c'est-à-dire la meilleure valorisation d'une ressource limitée ; jouer sur la diversité des systèmes irrigués, dont les besoins en eau sont très différents.

6.2.1. La diversité des irrigations

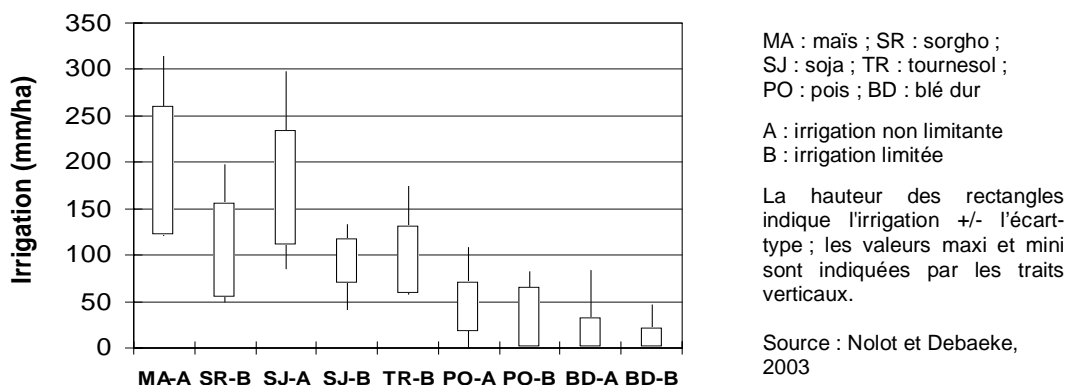
Les "surfaces irriguées" recouvrent en fait une grande diversité de cas, en termes de volumes d'eau consommés à l'hectare, mais aussi de calendrier des apports. On distingue notamment :

- une irrigation conséquente (5-7 apports en moyenne) et régulière (tous les ans) sans laquelle certaines cultures ne seraient pas possibles dans certaines régions (climat séchant, sol superficiel) ; elle concerne les vergers, les productions légumières, ainsi que près de 50% des surfaces de maïs-grain (implantées sur des sols à réserve en eau faible à moyenne, en climat séchant) ;
- une irrigation de complément (1-2 apports dans la saison) ou occasionnelle (1 année sur 5) qui permet de régulariser la production et la qualité.

L'exemple ci-dessous illustre la gamme des quantités d'eau apportées, dans des conditions pédoclimatiques identiques.

Variabilité des besoins annuels en irrigation pour 6 cultures, 8 années et 2 itinéraires techniques

(Station expérimentale INRA Toulouse, sur sol limono-argileux profond, 1995-2002)



D'après ARVALIS - Institut du Végétal, pour couvrir les besoins en eau des cultures 8 années sur 10, les volumes d'irrigation à apporter sur maïs varient de 150 à 350 mm pour le maïs selon les climats et les sols, de 120 à 180 mm pour la pomme de terre (sol limoneux : Picardie, Nord), de 60 à 120 mm pour le pois de printemps et le blé selon les profondeurs de sol (région Centre et Poitou-Charentes). Dans ce dernier cas, les besoins sont de 40 à 80 mm/ha pour une couverture des besoins 5 années sur 10.

6.2.2. La conduite de l'irrigation et ses contraintes

. Choix stratégiques d'équipement

En France, plus de 90% de l'irrigation est pratiquée par aspersion et les canons enrouleurs (mobiles) sont les principaux matériels employés, ce qui confère au dispositif une grande souplesse mais génère des contraintes d'utilisation (sensibilité au vent, temps de travail) et se traduit pas de piètres performance en termes de régularité des apports.

Les charges d'irrigation en grande culture représentent 20 à 30% du produit brut (aides comprises). En raison de leurs coûts, les aménagements hydrauliques et les équipements d'irrigation des exploitations sont dimensionnés pour couvrir, dans les meilleurs cas, les besoins des cultures 8 années sur 10.

Les choix stratégiques liés au dimensionnement des équipements d'irrigation et aux types de cultures à irriguer, engagent l'irrigant pour plusieurs années.

. Choix stratégiques de campagne

Les irrigants recherchent une utilisation optimale des moyens d'arrosage (ressource en eau, main d'œuvre et matériel) avec comme objectif un revenu maximal, ce qui se traduit par la détermination d'un assolement

optimisant les moyens de production, dans un contexte donné de prix des produits et des intrants et d'accès à la ressource en eau.

Ils peuvent être confrontés à des restrictions à l'irrigation, qui sont hydrauliques (volume disponible dans le cas de lacs collinaires, débit permis par l'équipement...) ou réglementaires (quota volumétrique, interdictions préfectorales...). Dans certaines conditions, ces restrictions peuvent être intégrées de manière stratégique en début de campagne d'irrigation (ou dès la décision d'assolement).

L'irrigation des cultures est une technique complexe pour laquelle les choix stratégiques sont aussi importants que les choix tactiques en cours de campagne. L'organisation d'un chantier d'irrigation introduit une certaine inertie dans les changements de stratégie et les ajustements tactiques en cours de campagne.

Des outils ont été développés pour aider à ces choix stratégiques (cf. encadré).

. Choix tactiques : le pilotage de l'irrigation

La durée du "tour d'eau" (passage sur l'ensemble des parcelles qui détermine la fréquence possible des apports) laisse peu de place à des ajustement tactiques en cours de campagne. Néanmoins, les dates de démarrage et d'arrêt et les décisions d'attente après une pluie offrent des marges de manœuvre à l'irrigant par rapport à une stratégie pré-établie. Des outils de pilotage existent pour objectiver ces décisions.

Le conseil de masse par l'avertissement irrigation (diffusé par les Chambres d'Agriculture) constitue un cadre général pour conforter les décisions des irrigants plus que pour indiquer la bonne stratégie adaptée à chaque exploitation. Des outils fondés sur le bilan hydrique permettent dans certains cas à l'irrigant de se situer et d'intervenir par rapport à une stratégie de conduite jugée optimale.

6.2.3. Les voies d'économies d'eau dans les exploitations agricoles

. Réduction de l'évaporation lors des aspersion

Les pertes par évaporation n'excèdent pas 10%. Elles sont minimes même en milieu de journée, en raison de la forte différence de température entre l'air et l'eau (l'eau provenant des nappes est à une température voisine de 12°C). L'interdiction d'arrosage à certaines heures crée, en plus des complications de mise en œuvre, des effets pervers (incitation au suréquipement).

S'il est déconseillé de pratiquer l'aspersion en cas de vent, c'est plus pour des raisons d'accroissement de l'hétérogénéité de la distribution spatiale de l'eau que pour des questions d'évaporation directe.

. Utilisation de techniques plus efficaces

L'efficacité de l'irrigation (rapport entre eau disponible pour la plante et eau apportée), diffère selon la technique employée et ses conditions de mise en œuvre. Pour les canons enrouleurs, technique utilisée sur la moitié des surfaces, cette efficacité ne dépasse pas 75%, et elle peut descendre à 60% si la disposition, l'entretien ou le réglage des matériels ne sont pas optimaux.

L'aspersion (technique employée sur 95% des surfaces irriguées) est sensible au vent ; elle induit une hétérogénéité intra-parcellaire des apports, qui incite à augmenter les doses pour assurer partout le volume souhaité. Des gains restent encore possibles par des innovations techniques et le réglage du matériel. Ainsi, le logiciel IRRIPARC (Cemagref, ARVALIS – Institut du végétal), qui permet de modéliser la répartition des apports et de tester l'effet des réglages, permet de définir des stratégies régionalisées en matière d'utilisation du matériel.

La micro-irrigation évite l'évaporation par un apport localisé, mais pose des problèmes de coût et de pérennité du matériel. Ce système n'est pas envisageable en grande culture.

. Ajustement des apports aux besoins de la plante

On dispose de peu d'informations sur les pratiques réelles des irrigants. L'enquête "Pratiques culturales" de 2001 met toutefois en évidence, en Aquitaine, la part importante des irrigations systématiques et la consommation d'eau plus élevée liée à cette pratique : les 27% d'irrigants qui déclarent avoir arrosé "comme d'habitude", ont consommé 44% du volume d'eau consacré au maïs et apporté des doses d'irrigation supérieures, à rendement équivalent.

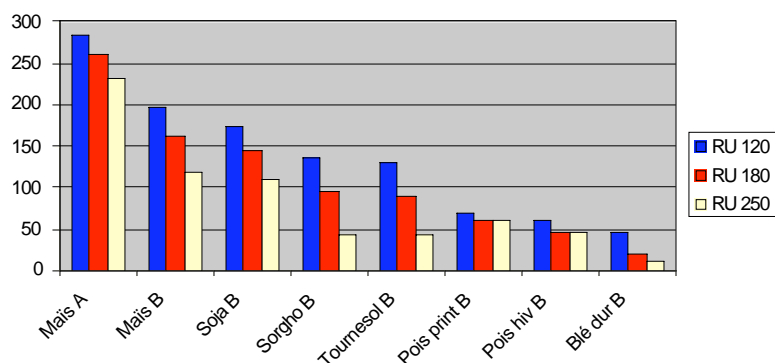
Déclenchement de l'irrigation sur maïs en 2001, en Aquitaine (Agreste Aquitaine, 2005)

Conduite de l'irrigation	Nombre d'irrigants	Surface	Volume d'eau	Dose moyenne (mm)	Rendement (q/ha)
"Comme d'habitude"	27%	33%	44%	203	94
Simple observation	40%	31%	19%	94	93
Outils de pilotage	18%	18%	21%	183	96
Avis technique	15%	17%	16%	138	100
Ensemble	100%	100%	100%	154	95

Un pilotage de l'irrigation au plus près des besoins de la culture est proposé par le suivi d'indicateurs de la disponibilité réelle de l'eau dans le milieu (le plus souvent par tensiométrie ou bilan hydrique). Ces méthodes sont de plus en plus utilisées par les agriculteurs : par exemple, plus de 1000 méthodes IRRINOV® diffusées auprès des agriculteurs. Les indicateurs de l'état hydrique des plantes sont pertinents mais pas utilisables en agriculture : contraintes d'utilisation, mesures sur un échantillon trop petit, coût trop élevé. Ces indicateurs sont par contre utilisés pour paramétrer les méthodes proposées aujourd'hui aux agriculteurs.

La consommation en eau d'irrigation par les principales grandes cultures

Besoins en irrigation moyens de 7 cultures d'hiver et d'été : simulation sur la base de seuils Transpiration réelle / Transpiration maximale différents selon la sensibilité des cultures
(3 niveaux de réserve utile, sols argilo-limoneux, climat Toulouse 1984-2004)



Le maïs et le soja sont les plus gros consommateurs en eau d'irrigation ; le blé est le moins exigeant en volume.

Ces besoins traduisent la position du cycle (esquive), les capacités d'enracinement (faibles pour le pois), l'existence de périodes critiques (maïs)...

Source : Nolot et Debaeke, 2006

Maïs A : variété tardive, irrigation intensive (135 q/ha). Maïs B : variété précoce, irrigation rationnée (100 q/ha)
Autres cultures : irrigation optimale évitant un excès de végétation (risque de maladies)

Utilisation de l'eau d'irrigation pour différentes espèces de grande culture

	Blé d'hiver	Colza	Pois	Maïs grain	Sorgho	Soja	Tournesol	Betterave	Pomme de terre
Surface* (x 1000 ha)	5 248	1 176	429	1 764	59	78	728	409	162
Taux global d'irrigation* (%)	0,5 en forte progression	0	14,5	44,5	3+	40,5	2	7,5	36
Volume moyen d'irrigation (m ³ /ha)	400+	0	650°	1 300°	600+	900+	600+	800+	800°
Consommation irrigation (Mm ³)	10	0	40	1 020	1	28	9	25	47
Période d'irrigation	avril-mai	-	mai	juin-août	juillet	juillet-août	juillet	juillet-août	juin-juillet

* : SCEES 2000 ; ° : SCEES 2001 ; + estimation (ordres de grandeur)

Le maïs est la culture la plus consommatrice d'eau pour l'irrigation, du fait de sa forte efficacité et de sa sensibilité au stress hydrique. Les quantités d'eau mobilisées pour l'irrigation sont plus de 6 fois supérieures à l'ensemble des autres grandes cultures réunies (volume/ha et surfaces sont supérieurs). La mobilisation des ressources est estivale.

Le sorgho est tout aussi efficace mais mobilise peu d'eau d'irrigation (volume et surfaces).

L'irrigation mobilisée par le blé d'hiver est faible en raison du faible taux d'irrigation et du volume modéré.

Pomme de terre, pois et soja sont les cultures les plus irriguées en dehors du maïs, mais les surfaces concernées sont limitées.

Blé et pois mobilisent l'irrigation en avril-mai, lorsque les autres demandes sont plus faibles.

Colza, tournesol et soja sont les cultures les moins efficaces pour la production de grain (cependant, si l'on raisonne en équivalents énergétiques, ces cultures oléagineuses expriment une efficacité plus proche de celle des céréales).

. Pratiquer une irrigation restrictive, notamment sur le maïs

Il s'agit, sans modification de l'assolement, mais avec une révision des objectifs de rendement, qui revient à l'application à la culture irriguée des stratégies d'esquive (raccourcissement du cycle cultural) et d'évitement (rationnement végétatif) vus précédemment, de réduire les apports totaux et le calendrier d'arrosage, notamment en fin de cycle estival.

Pour le maïs notamment, on dispose des références agronomiques pour optimiser les apports d'eau dans un contexte de volume, de débit ou de dates limitants... Plusieurs principes peuvent être mis en oeuvre (en combinaison avec le choix variétal) :

- réduire les doses élémentaires et augmenter le nombre d'apports ;
- établir un calendrier prévisionnel d'apports privilégiant les périodes les plus sensibles ; démarrage de l'irrigation plus tardif et arrêté plus tôt (dès une humidité du grain de 50%) ;
- adapter le calendrier au climat en décalant les irrigations après une pluie.

En Poitou-Charentes (sol de groies), l'emploi de variétés demi-précoces semées assez tôt a, par exemple, permis une esquive de la sécheresse effective en 2005 (la floraison est atteinte dès la fin juin) L'appropriation de cette tactique d'esquive a été très rapide. Les expérimentations sur ce thème se poursuivent pour en confirmer son intérêt sur plusieurs années et dans différentes régions. Cette adaptation peut présenter des limites là où les sols se réchauffent plus lentement (boulbènes du Sud-Ouest).

. Privilégier l'irrigation de complément (d'appoint)

Il s'agit de choisir des cultures ayant des besoins inférieurs, et décalés vers le début de saison.

Céréales à paille. Leur irrigation (blé tendre, blé dur, orge de printemps) peut s'envisager dans deux contextes :
- objectif d'atteinte régulière de rendements élevés, recherché par des irrigants qui ont diminué les surfaces irriguées en été au profit des irrigations de printemps (céréales, pois) et disposent en général d'une ressource en eau suffisante au printemps pour les céréales. Le volume d'irrigation pour couvrir les besoins des céréales est de 40 à 80 mm en année moyenne et de 60-120 mm en année sèche (1 année sur 5), selon les profondeurs de sols.
- irrigation d'appoint en année sèche pour préserver un niveau de rendement et une teneur en protéines "moyens", dans un contexte d'eau pour l'irrigation limitée au printemps. La réponse est maximale en sol superficiel et en cas de sécheresse précoce, qui affecte l'alimentation azotée (+8-10 q/ha pour 30 mm apportés).

Sorgho. Si la capacité d'adaptation du sorgho au stress hydrique est bien connue, la culture présente tout de même une période de sensibilité avant et pendant la floraison. Une irrigation à cette période est donc bien valorisée. Les différences de rendement entre cultures de sorgho irriguées de façon non limitante et non irriguées peuvent atteindre 30-40 q/ha en année sèche et sur sols de coteaux ; à Toulouse, en sol profond, ce différentiel est de 8-10 q/ha en moyenne. Une irrigation de l'ordre de 140 mm permet en général d'atteindre le rendement potentiel.

Tournesol. Culture de printemps très tolérante aux conditions sèches, le tournesol est également une plante qui répond bien à l'irrigation à partir de la floraison, à condition que sa croissance végétative ait été modérée avant la floraison. L'eau d'irrigation est donc bien valorisée à cette période, quand la réserve en eau du sol est épuisée. Les essais et observations au champ montrent des gains moyens de 5-10 q/ha pour des apports de l'ordre de 100 mm. Le tournesol irrigué présente deux atouts particulièrement intéressants lorsque l'eau disponible pour l'irrigation est limitée ou lorsque le calendrier d'irrigation de l'exploitation est chargé : de faibles volumes d'eau requis (30-100 mm) et une période d'irrigation peu tardive (centrée sur juillet et début août).

Ces adaptations sont préconisées par les instituts techniques, mais on ignore dans quelle mesure elles sont connues et appliquées par les irrigants. Là encore, une meilleure connaissance des pratiques culturales serait nécessaire.

6.2.4. Les marges d'économie d'eau et les outils

. Les économies d'eau attendues des différents scénarios de réduction de l'irrigation

a) Assolement constant, sans réduction *a priori* de la performance productive du système

Il s'agit de mobiliser les matériels les plus efficaces, pratiquer les conditions d'application optimales, utiliser les outils d'aide au pilotage pour apporter ce qui convient au bon moment... On se situe dans une approche d'**irrigation raisonnée**, qui évite les gaspillages, et peut sensiblement améliorer la performance agronomique, économique et environnementale des systèmes de culture. Là où elle sera pratiquée, l'irrigation devra probablement se conformer à ce cahier des charges pour être durable.

Il n'est pas évident que cette pratique permette des économies d'eau substantielles par rapport à la pratique actuelle, qui juxtapose des irrigations bien conduites, déficitaires, et excédentaires.

b) Assolement constant, avec une réduction des objectifs de production

Il s'agit alors de réduire le besoin en eau d'irrigation de la culture par des variétés précoces et un ajustement des autres intrants (densité de semis, azote). Dans le cas du maïs, la baisse de rendement peut être compensée,

Le développement d'outils d'aide à la décision stratégique en irrigation

Depuis quelques années, des logiciels informatiques ont été conçus pour aider les techniciens et les agriculteurs à prendre des décisions en matière de stratégie d'irrigation, en particulier choix d'assolement et d'organisation du tour d'eau. Ces outils se composent d'un modèle de bilan hydrique et d'un modèle agronomique, pour simuler de manière plus ou moins détaillée la réponse des cultures aux différents scénarios de climat et d'irrigation.

. Le logiciel LORA : raisonner l'assolement sur le périmètre irrigable de l'exploitation agricole

Compte tenu du milieu (RU des sols et climat) et du contexte technique (capacités d'irrigation...) et économique (prix des intrants et produits, aides...) de l'exploitation, LORA recherche un assolement qui maximise la marge sur le périmètre irrigable.

Pour rechercher l'adéquation entre les besoins en irrigation de l'assolement et les ressources, LORA envisage plusieurs niveaux de conduite ("bien irrigué" et irrigations "restrictives"), et propose des assolements adaptés à une année climatique donnée ou optimisés sur l'ensemble des scénarios climatiques.

Ce logiciel (conçu par l'INRA et ARVALIS - Institut du végétal) est actuellement utilisé dans plusieurs régions pour étudier avec les irrigants les évolutions possibles des systèmes irrigués notamment lors de changements importants des règles du jeu (PAC, Loi sur l'Eau...)

. Le simulateur IRMA : raisonner les règles de conduite et d'organisation des chantiers d'irrigation

Ce simulateur d'irrigation (conçu par l'INRA et ARVALIS - Institut du végétal) a pour objet d'apporter une aide à l'élaboration d'une stratégie d'irrigation pour l'ensemble des cultures irriguées du périmètre irrigable, tenant compte des caractéristiques de l'installation d'irrigation et des contraintes de l'exploitation.

IRMA explicite le corps de règles de décision mobilisées pour conduire les irrigations (constitution des blocs d'irrigation ; choix des doses, des dates de déclenchement, de retour et d'arrêt des irrigations...) et organiser les chantiers (priorités entre les blocs, gestion du temps de travail...). D'après ce modèle décisionnel, IRMA reconstitue, pour un scénario climatique donné, des calendriers d'irrigation pour l'ensemble des parcelles irriguées, et en évalue les conséquences sur l'état hydrique du sol, la satisfaction des besoins en eau des cultures, les rendements et les marges brutes, par culture et pour l'assolement.

IRMA est utilisé par ARVALIS - Institut du végétal pour concevoir et paramétrer des interfaces utilisables par les agriculteurs comme par exemple IRRINOV®, outil de pilotage des irrigations.

. MODERATO : simuler les stratégies de conduite de l'irrigation du maïs en contexte limitant

MODERATO (conçu par l'INRA et ARVALIS - Institut du végétal) est un outil de simulation qui s'appuie sur l'analyse du système d'irrigation décrit dans IRMA (en particulier règles de décision) pour évaluer les conséquences de contraintes pédoclimatiques, hydrauliques (volume, débit) et organisationnelles (tour d'eau) sur la consommation d'eau et le rendement du maïs. Le modèle agronomique est plus détaillé que pour les outils précédents.

MODERATO possède un générateur de données climatiques et un module d'optimisation des stratégies de conduite qui permettent de proposer une amélioration automatisée des stratégies de conduite de l'irrigation pour des situations moins bien connues (changement climatique, évolution des prix, rareté de la ressource en eau).

L'outil est destiné aux ingénieurs des Instituts Techniques et des Chambres en vue d'une mise à jour périodique du conseil stratégique en matière d'irrigation.

. COGITO : simuler les besoins en eau d'irrigation et les adaptations de l'itinéraire technique

Ce logiciel, développé par AgroTransfert Poitou-Charentes et l'INRA, repose sur le modèle de culture STICS, qui a été paramétré et validé pour le maïs et le sorgho en Poitou-Charentes. COGITO a été transféré aux conseillers "irrigation" des Chambres d'Agriculture de la région.

L'outil permet d'effectuer des simulations de situations concrètes et de scénarios permettant d'organiser une animation collective à l'échelle d'un périmètre d'irrigation et de fournir une base de discussion et de négociation entre les collectifs d'irrigants et les autorités administratives responsables de la gestion des ressources en eau.

COGITO a été utilisé pour élaborer des conseils plus spécifiques sur les dates de début ou de fin d'irrigation, qui ont montré l'existence d'une économie d'eau potentielle par rapport à des pratiques d'assurance couramment adoptées en l'absence de tels outils. Dans le cadre d'un arbitrage entre un collectif d'irrigants et le service des eaux d'une grande ville, COGITO a permis d'illustrer l'effet sur le rendement d'arrêtés d'interdiction d'irrigation plus ou moins précoces et de montrer qu'un arrêt d'irrigation après le 15 août ne pénalise pratiquement pas les rendements par rapport à ceux obtenus en gestion volumétrique (volume plafonné, sans date d'arrêt).

dans les zones où des restrictions estivales sont fréquentes, par une meilleure efficacité de l'eau et une diminution du coût de séchage. Cela suppose que l'effort de sélection permette d'atteindre de plus hauts rendements pour les variétés précoces. Dans le cas du maïs, les économies d'eau pourraient être de l'ordre de 15-20% par rapport à la pratique actuelle.

c) Assolement modifié, dans le sens d'une moindre dépendance à l'eau d'irrigation

Ce scénario, qui peut avoir de nombreuses variantes (selon la proportion de cultures à irrigation d'appoint, la part de cultures non irriguées...), est bien sûr le mieux à même de réduire la quantité d'irrigation et, si la proportion de cultures d'hiver et de printemps est forte, de décaler l'utilisation de l'eau vers des périodes moins concurrentielles.

Ce scénario est aujourd'hui davantage évoqué dans les zones d'irrigation où le maïs avait pris une forte extension, notamment parce que les coûts de séchage sont de plus en plus élevés, que le prix du maïs a baissé, que la nouvelle PAC nivelle les avantages comparatifs en terme de marges des différentes cultures et qu'une simplification du chantier d'irrigation est souhaité par de nombreux irrigants.

Selon la proportion de l'assolement conduit en irrigation d'appoint, les économies seront variables. Si l'on se base sur des données obtenues en stations expérimentales, pour de mêmes conditions pédoclimatiques, et pour des pratiques d'irrigation optimales, la substitution d'un maïs irrigué par un sorgho irrigué permet une économie d'au moins 50% des volumes d'eau, celle d'un maïs irrigué par un blé dur avec irrigation d'appoint une économie d'au moins 60%. La faisabilité de ces substitutions de cultures doit cependant être étudiée au cas par cas : elle sera limitée par une baisse trop forte des marges, des problèmes de succession de cultures (blé sur blé) et certains effets sur les filières.

. Les outils d'aide au pilotage de l'irrigation

L'agriculteur et son environnement de conseil disposent aujourd'hui d'un panel d'outils pour piloter et planifier l'irrigation. Dans la plupart des cas, les outils stratégiques (cf. Encadré) sont destinés à l'environnement de conseil (avertissements, conseils sous forme de règles d'action). Les outils de pilotage (méthodes basées sur le bilan hydrique prévisionnel, méthode IRRINOV@...) sont destinés directement aux agriculteurs, mais ils sont encore peu employés malgré leur simplicité. Les irrigants utilisent des règles d'action plus empiriques, du fait notamment des contraintes imposées par les options stratégiques retenues. Ils ont accès largement aux informations issues des avertissements en irrigation.

L'utilisation de ces outils permet de déterminer plus sûrement le calendrier optimal d'irrigation dans un contexte de ressources plus ou moins limitées (en volume, en débit, à certaines périodes de la campagne...). Pour autant, ils ne peuvent garantir une réduction du volume d'irrigation mais plutôt une utilisation plus rationnelle (meilleure valorisation des potentialités dans certains cas, réduction du risque environnemental lié au drainage dans d'autres situations). Ils peuvent également permettre de réviser les règles dès lors que le contexte réglementaire, économique ou climatique a significativement évolué.

7. Raisonner l'adaptation des systèmes de culture à l'eau disponible

Sous nos climats non arides, la sécheresse recouvre en fait une grande diversité des scénarios climatiques et conserve un caractère très aléatoire. Jusqu'à récemment, le pari d'un risque faible et/ou d'une "assurance" par l'irrigation ont conduit à privilégier souvent l'objectif de rendement élevé plutôt que la tolérance, comme l'attestent la place des cultures à forte valorisation de l'irrigation dans les assolements, et les choix de stratégies culturales d'assurance plus que de réduction a priori des besoins en eau. Cette gestion du risque semble à réexaminer et à orienter vers une meilleure adaptation des systèmes de culture à l'eau disponible, c'est-à-dire à la diversité des situations : RU des sols, scénarios climatiques régionaux, risques de restriction en cas d'irrigation...

7.1. Systèmes de grande culture

7.1.1. Stratégies agronomiques

. En fonction de la réserve utile des sols

En l'absence d'irrigation, la clé de l'adaptation à la sécheresse réside dans la diversification des cycles culturaux et des espèces (céréales, protéagineux, oléagineux) afin de répartir les risques climatiques et de disposer de solutions d'esquive. On peut proposer la typologie suivante selon la réserve utile du sol :

- petites terres à cailloux, à faibles réserves en eau (RU < 100 mm), parfois pentues (rendzines en région Centre, groies superficielles de Poitou-Charentes, argilo-calcaires superficiels en Midi-Pyrénées...). Seules les cultures d'hiver (colza, blé ou orge) sont envisageables. Un travail du sol superficiel avec mulch est recommandé

pour conserver l'eau (évaporation, infiltration). La sensibilité de ce système de culture à la sécheresse reste cependant forte. De plus, la monoculture de type hiver et les résidus en surface favorisent le développement des adventices et des pathogènes qui se conservent sur les pailles.

- sols moyennement profonds, à réserve utile de 120-180 mm (terrefort moyen en Midi-Pyrénées, groies profondes en Poitou-Charentes...). L'introduction de cultures d'été tolérantes à la sécheresse comme le tournesol ou le sorgho permet de diversifier la succession, de répartir les pointes de travail et les risques climatiques.
- sols de vallées profonds, à réserve utile supérieure à 200 mm. On peut y cultiver du maïs sans irrigation ou d'autres espèces valorisant bien une forte disponibilité en eau (soja). Les possibilités de diversification y sont maximales.

Des possibilités de diversification existent, au-delà du sorgho et du tournesol : introduction d'autres cultures d'hiver, notamment des légumineuses (lupin, féverole, pois, pois chiche, lentilles, haricots...) et d'autres cultures d'été tolérantes à la sécheresse (par exemple le carthame, cultivé en Espagne et en Italie pour des usages industriels)... Cependant ces cultures sont des niches commerciales et leur extension sera limitée.

En situation irriguée, la réserve utile du sol est souvent limitante bien que l'on ne puisse strictement superposer les cartes de réserve utile et les cartes d'irrigation à l'échelle du territoire. Un grand nombre de 'terres à maïs' se situent en sols de vallée, à texture légère : l'irrigation y est souvent plus accessible, elle est généralement nécessaire car les réserves en eau sont assez faibles même si le sol est profond. Dans ces milieux, les alternatives rentables au maïs irrigué dépendront du rendement accessible avec d'autres cultures peu ou pas irriguées. Dans certains sols (boulbènes du Sud-Ouest, par exemple), l'excès d'eau hivernal limite les possibilités de cultures d'hiver.

Dans les régions méridionales à pluviométrie annuelle de 600-700 mm, on ne peut se passer d'irrigation pour le maïs-grain même en sol profond. Dans le Centre (Beauce, par exemple), les sols superficiels ou moyennement profonds justifient l'irrigation notamment pour le maïs et pour les céréales d'hiver certaines années à printemps sec. En Picardie, l'irrigation est justifiée surtout par son impact positif sur la régularité interannuelle des rendements garantissant l'approvisionnement des usines et par son intérêt pour maîtriser la qualité des cultures industrielles (pomme de terre principalement).

. En fonction de l'accès à l'irrigation

Selon les contextes hydrauliques, les questions de gestion optimale de la ressource en eau d'irrigation se posent différemment à l'échelle de l'exploitation :

- en conditions où l'eau d'irrigation est peu ou pas limitante, les cultures exigeantes, à forte valorisation de l'eau (maïs, soja) sont possibles : il s'agit alors d'optimiser le calendrier d'irrigation pour chaque culture, en donnant la priorité au pilotage de l'irrigation (assurer les besoins), avec le souci de maîtriser la fourniture d'azote (sans excès) et de veiller à préserver la structure du sol pour la culture suivante ;
- en conditions d'irrigation plus limitée (volumes, débits, surfaces), il s'agit d'optimiser le choix d'assolement et d'allocation de la ressource entre cultures (voire variétés) compte tenu de leurs périodes de sensibilité au stress : une diversification plus grande est nécessaire, avec des cultures faiblement voire non irriguées.

Lorsque l'eau disponible pour l'irrigation s'avère limitée, deux stratégies sont possibles à l'échelle de l'exploitation :

- concentrer les volumes disponibles sur des surfaces plus limitées, affectées à des cultures fortement consommatrices à l'ha mais bien rémunérées (arboriculture fruitière, légumes, production de semences) et, hors de ces périmètres irrigués restreints, choisir des cultures à plus faibles besoins, ou bien assumer les risques de perte sur des cultures plus exigeantes. Cette stratégie peut aussi s'appliquer au maïs dans certains contextes où les potentialités de la culture restent fortes ($R > 120$ q/ha) et où la rentabilité est conservée dans le cadre de la nouvelle PAC.

Pour ne pas conduire, en année sèche, à des prélèvements "excessifs" ou contestables dans les cours d'eau ou les nappes rechargeables, la surface irriguée intensivement doit être calibrée selon des hypothèses raisonnables.

- répartir l'eau sur des surfaces plus étendues, en privilégiant l'irrigation de complément avec des niveaux de prélèvement très variables selon les conditions climatiques de l'année. Cette option implique une "sous-utilisation" des ressources en année humide ou "normale" (ressources "perdues" ou stockées selon le régime hydrologique local), mais assure une marge de sécurité pour les années sèches. Cette option implique de réduire significativement les surfaces affectées à des cultures exigeant systématiquement des apports d'eau conséquents, qui sollicitent les ressources en permanence.

Le choix entre ces deux options dépend des moyens d'arrosage disponibles (matériel, ressource), du temps de travail que l'agriculteur accepte de consacrer à l'irrigation, des rapports de prix, enfin de la fréquence des années sèches.

Les conditions diffèrent également selon que l'irrigant dispose d'une ressource individuelle ou commune à quelques agriculteurs (retenue collinaire, dont le remplissage est connu et l'accès garanti...) ou utilise une ressource gérée par un tiers, susceptible d'imposer en cours de saison des restrictions de prélèvement au vu de

l'état de la ressource. S'y ajoutent des contraintes liées à l'équipement d'irrigation de l'agriculteur, qui peut imposer une limitation du débit, des surfaces irrigables, de durée du tour d'eau.

Selon que la limitation est provoquée par le débit (épuisement de la ressource, équipement insuffisant) ou par le volume (lac non rempli), les stratégies d'irrigation devront être différentes, en particulier pour le maïs : stockage précoce de l'eau d'irrigation dans le premier cas et mobilisation des réserves du sol en fin de cycle, concentration du volume autour de la floraison dans le deuxième cas.

Diversifier davantage les successions de cultures par des espèces d'hiver ou des espèces tolérant la sécheresse est un impératif pour assurer la durabilité des systèmes en sec dans un contexte de sécheresse plus fréquent (répartir les risques, éviter les problèmes parasitaires et le salissement des sols). C'est également le cas pour les systèmes irrigués dès lors qu'ils sont soumis à un risque de restriction en débit ou en volume.

Le conseil technique communique principalement sur le pilotage des irrigations pour les différents contextes hydrauliques et pédoclimatiques, et moins sur l'adaptation des systèmes de culture aux évolutions de la ressource en eau, en partie faute d'outils. Pour cette fonction, la promotion des modèles de simulation devrait être encouragée dans le but de proposer les meilleurs choix 'culture x variété x date de semis x irrigation' pour les contextes actuels et pour les scénarios de climat et de ressource en eau à venir.

7.1.2. Stratégies économiques d'adaptation des irrigants

On peut raisonner l'adaptation des irrigants à deux échelles de temps. A court terme, c'est-à-dire sur une ou deux campagnes culturales, les marges de manœuvre des exploitants sont réduites. Seules sont possibles les options d'amélioration de la gestion tactique de l'irrigation et des jeux sur l'esquive ou l'évitement (choix de variétés plus précoces par exemple), le système de culture restant pour l'essentiel inchangé. A plus long terme, l'éventail des options offertes aux agriculteurs est beaucoup plus vaste. L'anticipation de sécheresses récurrentes va conduire l'exploitant à modifier son système de culture et ses assolements (favoriser des cultures plus tolérantes à la sécheresse par exemple), à investir dans l'accès à l'eau (équipement collinaire), voire à raisonner autrement le projet économique de son exploitation (diversification, extensification).

L'intérêt économique de ces options est très variable selon les régions, les sols ou les climats. Le défaut de données technico-économiques précises empêche d'établir des bilans économiques coûts-avantages de ces différentes possibilités à l'échelle des grands systèmes agricoles nationaux. La dimension aléatoire de la sécheresse complique également l'exercice. Les stratégies économiquement optimales d'adaptation aux sécheresses dépendent du degré d'aversion au risque des exploitants, c'est-à-dire des efforts qu'ils sont prêts à consentir pour éviter d'affronter des événements extrêmes.

On identifie ici un besoin de recherches économiques important. Les outils génériques de modélisation existent ou peuvent être adaptés au problème de la sécheresse. Mais le degré d'aversion au risque des irrigants est encore mal identifié et demanderait des études spécifiques sur des données individuelles d'agriculteurs. Les références existantes pour les Etats-Unis, certains pays européens ou africains, pourraient être adaptées au cas français. Par ailleurs, le manque de données technico-économiques ne permet pas de calibrer et de valider les prédictions des modèles dans de bonnes conditions. Ces différents points devraient faire l'objet d'études spécifiques à l'INRA, seul ou plus probablement en partenariat avec les instituts techniques agricoles et les Chambres d'Agriculture.

7.2. Elevage d'herbivores et systèmes fourragers

Les références scientifiques sur l'adaptation des systèmes fourragers et des systèmes d'élevage à la sécheresse dans les régions tempérées sont extrêmement faibles. Les experts se sont essentiellement appuyés sur des monographies et des rapports qui ont été publiés suite aux différents épisodes de sécheresse passés qui permettent de faire des constats et quelques recommandations. Par contre un certain nombre d'articles français traitent de la prise en compte du risque dans les systèmes d'élevage. Ils permettent de fournir une base conceptuelle solide pour aborder les modes d'adaptation des élevages aux aléas liés à la sécheresse.

Contrairement aux systèmes de grandes cultures, les élevages d'herbivores ne peuvent pas s'adapter à une année "moyenne" en compensant les mauvaises années par les bonnes. Pour un troupeau donné, l'éleveur doit assurer chaque année l'adéquation entre une demande fourragère déterminée par les besoins alimentaires de ses animaux au cours de l'année et une offre fourragère aléatoire liée au climat. Or les épisodes de sécheresse peuvent faire varier la quantité de fourrage produit de plus de 50% autour de la moyenne. L'éleveur doit donc intégrer ce type de variation dans son système fourrager afin d'avoir la possibilité de nourrir son troupeau avec un certain degré de certitude. Il doit donc anticiper le risque de sécheresse chaque année, au risque d'avoir des ressources fourragères excédentaires si celle-ci n'a finalement pas lieu. Le système fourrager mis en place par l'éleveur intègre donc la perception qu'il a du risque de sécheresse, en fonction de la connaissance historique qu'il a acquise dans son exploitation. Cette notion de **sécheresse anticipée** définit donc le niveau d'auto-protection que l'éleveur accepte de couvrir face au risque sécheresse. Au-delà de ce niveau, il s'agit alors d'une

sécheresse imprévue qui nécessite la mise en œuvre d'autres mécanismes de régulation du système d'élevage faisant le plus souvent intervenir des ressources fourragères externes.

. Adaptations structurelles et conjoncturelles à la sécheresse

Il convient donc d'analyser les adaptations des systèmes d'élevage à la sécheresse à deux niveaux : (i) des **adaptations structurelles** qui anticipent des situations à sécheresse plus ou moins risquées et qui permettent de maintenir l'adéquation offre-demande fourragère dans la majorité des situations prévues, et (ii) des **adaptations conjoncturelles**, qui permettent de répondre aux niveaux de crise non prévus. Le système ISOP de suivi de la production herbagère en temps réel, mis en place par le SCEES, permet de repérer précocement les risques de "disette" fourragère au cours de l'année, et de mettre en place des actions collectives locales de mobilisation de ressources fourragères complémentaires (plan paille, achats de fourrages externes...).

Les adaptations structurelles ont trait à la fois au système d'élevage lui-même et au système fourrager. Au niveau du système d'élevage, la première adaptation consiste à éviter que le pic des besoins alimentaires du troupeau coïncide avec le risque maximum de pénurie fourragère. Les marges de manoeuvre se situent au niveau du type d'animal produit, de sa capacité à tolérer des périodes de sous-alimentation chroniques et à effectuer des croissances compensatrices ultérieures, du choix des périodes des mises bas, du choix des races, etc. Ces éléments qui jouent sur la "demande" fourragère, pour essentiels qu'ils soient, ne peuvent à eux seuls procurer un niveau d'adaptation suffisant face à la variabilité importante de l'offre liée aux aléas de la sécheresse.

Il importe donc de mettre en œuvre des éléments de souplesse au niveau de l'offre fourragère elle-même. Le premier de ces éléments est la constitution de stocks fourragers permettant d'assurer l'alimentation des animaux en période de non-pousse de l'herbe. Il convient là de distinguer deux grands types de systèmes d'élevage : les systèmes herbagers dont la ressource essentielle de fourrage est l'herbe, et les systèmes de polyculture-élevage qui peuvent disposer, en plus de l'herbe, de ressources fourragères produites par les cultures (maïs et céréales d'hiver).

. Stratégies d'adaptation à la sécheresse des systèmes herbagers

Les élevages de bovins laitiers ou à viande, et d'ovins, dont l'alimentation dépend presque exclusivement de la production des prairies, sont les plus vulnérables à la sécheresse car ils dépendent directement des fluctuations de la pousse de l'herbe. Dans ces systèmes, l'ajustement de l'offre à la demande de fourrage s'effectue normalement par la constitution de stocks (ensilage et/ou foin) pendant la période de forte croissance de l'herbe au printemps, et leur consommation pendant la période hivernale (4-6 mois selon les régions) et pendant les périodes de sécheresse. L'adaptation essentielle consiste donc à diminuer suffisamment le chargement global de l'exploitation afin de faire des stocks en quantité suffisante en effectuant des reports de stocks d'une année sur l'autre. On estime ainsi qu'une bonne sécurité doit être assurée par une demi année de stocks d'avance.

Une manière peu onéreuse de faire des stocks est d'effectuer des reports d'herbe sur pied permettant de prolonger le pâturage pendant la saison sèche. Lorsque le climat s'y prête, la valorisation de la pousse hivernale de l'herbe au pâturage est aussi un moyen d'abaisser le niveau des stocks nécessaires, ce qui tend à rendre le système moins vulnérable à la sécheresse. Encore faut-il que la pratique du pâturage hivernal ne conduise pas l'éleveur à augmenter son chargement, ce qui ne ferait que repousser le problème.

Dans tous les cas, les éléments d'adaptation structurelle des systèmes herbagers vis-à-vis de la sécheresse conduisent globalement à une diminution du chargement animal. Ce sont en réalité les systèmes les plus extensifs, que ce soit au niveau de la prairie ou au niveau des animaux, qui s'avèrent les plus adaptés à la sécheresse. Au-delà des adaptations structurelles, les crises fourragères liées à des niveaux de sécheresse "inattendus" nécessitent des apports de fourrages externes à l'exploitation ou à la région. L'appoint de paille, associée à plus ou moins de concentrés en fonction du type d'animal, reste une solution techniquement satisfaisante, même si elle est toujours coûteuse, pour passer les périodes de pénurie.

Peu d'analyses systématiques des répercussions des sécheresses passées sur l'économie des systèmes d'élevage sont disponibles. L'analyse des données à partir des réseaux d'élevage dans le Charolais en 2003 par l'INRA montre que la sécheresse pourtant importante cette année là n'a pas affecté les critères de productivité des troupeaux par rapport à 2002. Pour un bon nombre d'éleveurs, les stocks fourragers de sécurité ont pu être mobilisés, pour les autres des achats de paille et de concentrés ont été effectués. Ces consommations se traduisent globalement par un surcoût de 34 €/UGB en 2003 par rapport à 2002. Globalement la sécheresse 2003 s'est traduite par une augmentation des charges du troupeau de 22%. Des aides exceptionnelles "sécheresse" ont permis aux éleveurs d'absorber ces hausses. Les exploitations à faible chargement (inférieur à 1,05 UGB/ha) n'ont pratiquement pas subi de baisse de revenu. Ces exploitations n'ont pratiquement pas acheté de fourrages, leur faible chargement ayant permis de stocker de l'herbe sur pied et d'être autosuffisantes. Ainsi, face à une sécheresse ponctuelle, les systèmes herbagers montrent une certaine résilience, d'autant plus grande que le système d'élevage est extensif. Face à une récurrence accrue des sécheresses certains éleveurs réfléchissent à une plus grande adaptation de leur système. Une première réponse pourrait être l'agrandissement des surfaces. D'autres voies sont à explorer : modification des dates de vêlage, gestion pluriannuelle des stocks, cultures fourragères dérobées, type d'animaux produits. Mais les rapports de prix et donc l'orientation des marchés restent des signaux forts pour la décision des éleveurs.

. Stratégies d'adaptation à la sécheresse des systèmes d'élevage plus intensifs

Les systèmes d'élevage plus intensifs faisant appel, en proportion plus ou moins grande, au maïs ensilage possèdent un élément de souplesse essentiel d'adaptation à la sécheresse : la culture à double fin du maïs, ensilage ou grain, permet d'assurer chaque année le stock d'ensilage nécessaire avec une proportion variable de la surface valorisée en grain comme culture de vente. Le recours à l'irrigation du maïs permet de complètement sécuriser le système là où les ressources en eau le permettent. Lorsque le maïs n'est pas irrigué, la fluctuation de ses rendements en ensilage peut atteindre 50% en situation très sèche. Le recours au sorgho grain ensilé peut alors représenter une solution plus souple.

Production comparée du maïs et du sorgho en ensilage, en sec et en irrigué en 1991 à l'INRA de Lusignan (d'après Lemaire et al. 1996).

	Irrigué		Sec	
	Maïs	Sorgho	Maïs	Sorgho
Production de matière sèche(t / ha)	24	18	9	13
Consommation d'eau (mm)	615	480	300	310
Efficience de l'eau (kg MS / mm)	39	37	30	42

En système irrigué, la production du maïs est plus élevée que celle du sorgho et son avantage est donc incontestable, l'efficience de l'eau étant pratiquement identique pour les deux espèces. En situation non irriguée, lors d'une année à sécheresse marquée, la production du maïs est nettement plus faible que celle du sorgho, dont l'efficience de l'eau est plus élevée. La production laitière permise par l'ensilage du sorgho est identique à celle du maïs. On peut donc envisager une substitution du maïs par le sorgho dans toutes les situations où la sécheresse risque de pénaliser trop fortement la production du maïs par rapport à celle du sorgho.

Performances comparées d'ensilage de maïs et d'ensilage de sorgho (d'après Emile et al., 2001)

	Culture			Ensilage		
	Pluie (mm)	Irrigation (mm)	Rendement (t/ha)	MAT (%)	Ingestion (kg)	Lait produit (kg)
Maïs	190	152	20,1	8,2	17,0	29,9
Sorgho	162	0	14,3	10,4	19,9	30,3

Une autre stratégie d'adaptation consiste à assurer la réalisation des stocks fourragers à partir de cultures à cycle d'hiver réalisant l'essentiel de leur production avec les ressources en eau de la pluie et des réserves du sol. L'utilisation des céréales immatures en ensilage permet ainsi de s'affranchir presque totalement des aléas de la sécheresse. Cette solution permet en outre de conserver l'élément important de souplesse qui consiste à cultiver des céréales à deux fins, et à reporter la décision d'ensiler une partie plus ou moins grande des surfaces à un moment où la prévision de l'occurrence d'une sécheresse et de son intensité peut devenir possible (début juin).

La constitution de stocks fourragers au printemps à partir de prairies temporaires ou permanentes peut aussi devenir un complément de l'exploitation de l'herbe au pâturage. La fabrication de foin de bonne qualité doit demeurer un objectif des systèmes d'élevage pour faire face aux aléas de sécheresse. Dans ce cadre, la luzerne, en pur ou en mélange, devrait redevenir une culture de grand intérêt dans les zones à été sec. Dans ces conditions, le pâturage de reports d'herbe sur pied en été peut être une solution particulièrement peu coûteuse.

Enfin, on ne peut pas négliger, pour les systèmes les plus intensifs, le recours, pour des raisons de simplicité de travail, à la technique des rations sèches. L'utilisation croissante de ces rations complètes achetées tend à développer des élevages "hors sol" qui ne sont alors plus du tout tributaires de la sécheresse. Il conviendrait cependant de réfléchir sur le lien que de tels systèmes pourraient encore entretenir avec le territoire. En effet, il est possible que ces rations complètes soient "assemblées" à partir de fourrages produits localement (foins de luzerne, céréales immatures, etc.). Une telle option conduirait à une plus grande interdépendance entre les systèmes d'élevage et les systèmes de grande culture en permettant à ces derniers de s'orienter vers une plus grande diversification des assolements en hébergeant une partie des productions fourragères locales. En effet, le maintien d'un élevage consommant essentiellement des fourrages produits localement devrait permettre de réaliser à l'échelle d'un territoire une interaction plus étroite entre les productions céréalières et les systèmes d'élevage. L'introduction alors possible de cultures fourragères dans les assolements céréaliers permettrait d'obtenir des modes d'occupation plus diversifiés des terres, et des assolements plus durables tant du point de vue agronomique qu'environnemental.

En conclusion, on peut dire que les systèmes d'élevage, quels qu'ils soient, doivent en grande partie assurer leur auto-protection contre la sécheresse. Cette protection s'obtient globalement par une limitation du chargement animal. Cela est particulièrement vrai dans les systèmes herbagers. Pour les systèmes plus intensifs de polyculture-élevage, des éléments de souplesses des systèmes fourragers proviennent des interrelations avec les cultures de vente, la production animale étant maintenue par une plus grande sollicitation de ces dernières, mais au prix d'une diminution notable du chargement en année sèche. Dans les zones à été sec du Grand-Ouest de la France, des marges de manœuvre existent à l'échelle du territoire en couplant au mieux les systèmes d'élevage et les systèmes de grande culture.

7.3. Cultures pérennes : arboriculture fruitière et vigne

. Cultures fruitières : une gestion plus efficace des systèmes irrigués est possible

Les ¾ des vergers sont irrigués : le taux d'irrigation est de 100% pour certaines espèces (clémentines, kiwis), de 95% pour les pêcheurs et de 85% pour les pommiers. Les apports d'eau sont élevés.

Les sécheresses terminales modérées ont des effets positifs sur la qualité des productions.

On dispose, pour les différentes espèces fruitières, de connaissances agronomiques et de références expérimentales qui permettent d'estimer l'évolution des besoins en eau en relation avec l'élaboration du rendement et de la qualité. Ces besoins en eau étant identifiés, l'irrigation peut être gérée précisément, en tenant compte des autres termes du bilan hydrique.

Or les enquêtes sur les pratiques agricoles du SCEES montrent qu'un quart seulement des arboriculteurs notent les apports d'eau et les dates d'irrigation, et que les techniques dominantes (aspersion et irrigation par gravité) sont les moins économes en eau. Si les épisodes de sécheresse devenaient plus fréquents ou sévères et entraînaient une concurrence accrue sur la ressource en eau, une gestion plus raisonnée des apports d'eau et l'usage de techniques plus économes (comme le goutte-à-goutte ou le microjet, déjà répandus dans le Val de Loire) devraient se généraliser.

. Vigne : vers une extension de l'irrigation ?

Les vignobles sont souvent implantés dans des zones régulièrement soumises à des déficits hydriques. Mais la vigne possède un système racinaire capable d'aller chercher l'eau à grande profondeur, et la viticulture utilise un ensemble de techniques pour favoriser l'infiltration des précipitations, réduire l'évaporation du sol (mulch...) et la transpiration... Une restriction hydrique modérée est utilisée pour piloter le développement végétatif, le rendement et la qualité, et limiter certains risques sanitaires. Certains vignobles sont cependant exposés à des risques de sécheresse excessive ; c'est le cas notamment en zone méditerranéenne, où la reconstitution hivernale de la réserve en eau du sol n'est pas garantie, et sur sols superficiels.

Les sécheresses récurrentes récentes posent le problème de l'irrigation. Cette pratique est interdite par la réglementation actuelle, qui prévoit cependant des possibilités de dérogations, en fait difficiles et lourdes à obtenir. Pourtant, certaines appellations méridionales prévoient l'irrigation dans leurs décrets, et environ 40 000 ha de vignobles seraient irrigués en France (soit 4,7% des surfaces en production en 2005). La situation est toutefois en train d'évoluer : l'INAO (pour les AOC) et ONIVIN (pour les vins de table et de pays) tentent de faire assouplir et rendre plus applicables les règles d'irrigation.

Le caractère très inégal de la disponibilité de la ressource en eau dans les régions viticoles où l'irrigation se justifie impose une gestion économe de l'irrigation. La maîtrise de l'irrigation déficitaire est plus difficile dans un contexte français, marqué par une forte variabilité climatique interannuelle, que dans les régions du monde (Chili, Australie...) présentant systématiquement une sécheresse prolongée pendant le cycle de la vigne ; c'est toutefois de ces régions que viennent la plupart des références en matière de gestion de l'irrigation en viticulture.

Une autre question se pose à moyen terme : le réchauffement climatique est déjà responsable de l'avancement de dates de vendange de près d'un mois en 50 ans dans certaines régions. Or le décalage des cultures vers le nord ou des altitudes plus élevées n'est pas possible dans le cadre des AOC, attachées par définition à un terroir.

8. Les adaptations des systèmes de culture : constats et limites

8.1. Les adaptations lors des sécheresses récentes

Les données statistiques disponibles (SCEES) ne permettent de suivre que l'évolution des surfaces affectées à chaque culture, évolutions que l'on peut mettre en relation avec l'annonce ou la survenue de sécheresses. Il est plus difficile de savoir si d'autres adaptations de l'itinéraire technique ont lieu.

Après la première alerte de 1976, les années **1988-91**, marquées par une série de périodes sèches notamment dans le Sud-Ouest, ont fait prendre conscience de la nécessité d'une gestion de l'eau à l'échelle de l'exploitation et de l'intérêt d'une diversification des systèmes de cultures. Cette diversification était alors rendue possible par un contexte de prix favorable pour certaines cultures d'été jusqu'en 1994 (tournesol en particulier). Ces années ont aussi montré que des cycles de sécheresse cumulée avec une non-recharge hivernale des réserves pouvaient survenir occasionnellement même sous nos climats. La conjoncture économique défavorable au tournesol et au colza après 1994 va par la suite réduire ces possibilités de diversification, accentuant de fait la vulnérabilité des systèmes de cultures d'été au risque de sécheresse.

En 2003, la sécheresse brutale, après un hiver froid et pluvieux, n'a pas permis d'anticipation au niveau des choix d'assolements.

En 2005, la connaissance du défaut de remplissage hivernal des sols et des réserves, largement annoncé en février-mars par les Ministères de l'Agriculture et de l'Environnement (Comité Sécheresse), a permis d'anticiper fortement sur le choix d'assolement, particulièrement dans les situations où la réserve en eau des sols était faible et l'irrigation très dépendante de la recharge hivernale (lacs, nappes superficielles...).

D'après le SCEES, en 2005, la surface de maïs grain aurait perdu 9% par rapport à 2004 (16% en Poitou-Charentes, 22% dans les Pays de Loire, 9% en Midi-Pyrénées, 4% en Aquitaine) en raison du déficit hydrologique hivernal et printanier. Au cours de l'été (Pays de Loire), certaines parcelles semées en maïs grain ont été converties en ensilage pour pallier la baisse de production fourragère. La sole de sorgho a augmenté de 5% (surtout en Poitou-Charentes) ; celle de tournesol de 6% (9% en Midi-Pyrénées, 7% en Aquitaine et Pays de Loire, 5% dans le Centre, 2% en Poitou-Charentes).

En 2006, les alertes ministérielles ont été précoces, car le risque d'un non-recomblement des réserves en fin d'hiver a été longtemps présent. Les estimations (en juin) pour 2006 montreraient une évolution significative des soles par rapport à 2005 : accroissement des surfaces en cultures d'hiver (+7% pour le colza ; +3% en Poitou-Charentes et +5% en Midi-Pyrénées pour le blé tendre ; +7% pour le blé dur, avec une hausse très nette dans le Centre et en Poitou-Charentes). Les surfaces en maïs grain baisseraient à nouveau, de 7% ; celles de maïs fourrage restent stables (-1%).

Les surfaces en maïs grain enregistreraient donc une baisse de 15% en deux ans. Cette évolution peut s'expliquer en partie par une réaction d'adaptation à une sécheresse anticipée, favorisée par des dispositifs de suivi et d'alerte. Le suivi de l'état de remplissage des ressources est de plus en plus organisé et efficace (DIREN, SAR, Agence de l'Eau...). Il permet d'informer les agriculteurs et les filières qui peuvent alors s'organiser à temps. D'autres facteurs, surtout économiques, contribuent aussi à cette baisse récente de la sole en maïs (cf. infra).

L'analyse des sécheresses récentes montre que les agriculteurs s'ajustent avant tout par **l'assolement**, en augmentant la part des cultures d'été à besoin d'irrigation limité (tournesol, sorgho) et dans une moindre mesure, la part des cultures d'hiver implantées avant la période de recharge des ressources en eau. Tout dépend si l'alerte sécheresse est suffisamment précoce et si les conditions agronomiques pour implanter des cultures d'hiver sont réunies.

8.2. Les limites actuelles de ces adaptations ; freins et opportunités

Les modifications d'assolements enregistrées ces dernières années, et notamment les substitutions au maïs grain, sont en effet à relativiser :

- ces évolutions ne modifient encore guère les parts relatives des différentes cultures : le maïs grain reste 2 fois plus important en superficie que les autres cultures d'été ensemble (sorgho, tournesol, soja). En dépit des réajustements annuels récents, les surfaces de tournesol et de sorgho baissent régulièrement depuis 10-15 ans pour des raisons de prix et de marchés. Pour le sorgho, un regain d'intérêt s'observe après chaque épisode marqué de sécheresse (1989-90, par exemple) mais il n'y a pas eu jusqu'à présent d'évolution de fond quant au choix d'espèces plus tolérantes à la sécheresse, pour des raisons de marchés (sorgho) et de prix (sorgho, tournesol). Après avoir chuté de façon significative depuis 2002, les surfaces de sorgho grain en France ont ainsi amorcé une remontée en 2005, pour s'établir autour de 50 000 ha. Elles avaient atteint le double en 1992, mais la réforme de la PAC 1994 a eu un effet négatif en supprimant la plupart des soutiens de cours à cette culture.

- elles tiennent à d'autres facteurs que l'annonce d'un risque de sécheresse, dont certains sont structurels (découplage des aides PAC), mais d'autres plus conjoncturels. Parmi les autres facteurs ayant contribué à la baisse récente de la sole en maïs on peut citer : en 2005, les conditions agronomiques à l'automne, des prix moins favorables du maïs qu'en 2004 et le retour à l'obligation de gel à 10% ; en 2006, l'entrée en vigueur de la nouvelle PAC... Si l'évolution des surfaces est très liée à celle des prix et des débouchés, une amélioration à ce niveau (par exemple, développement d'un marché stable et rémunérateur du bioéthanol) pourrait tout à fait induire une relance du maïs dans les années à venir.

Surfaces et rendement en maïs, sorgho et tournesol, France entière, 2000-2005

	2000	2001	2002	2003	2004	2005
Maïs grain : superficie (ha)	1 721 988	1 867 079	1 780 150	1 634 924	1 766 575	1 614 793
rendement (q/ha)	92	87	91	73	92	84
Sorgho : superficie (ha)	59 576	67 661	71 231	61 006	47 876	50 824
rendement (q/ha)	62	59	64	38	54	52
Tournesol : superficie (ha)	728 555	707 709	614 732	694 405	615 769	643 729
rendement (q/ha)	25	22	24	22	24	24

Source : la Statistique Agricole Annuelle, Agreste, 2006.

8.2.1. Freins techniques à la diversification des cultures

Il existe des freins techniques à la diversification par les cultures d'été en système non irrigué :

- défauts de productivité pour le tournesol (facteurs limitants difficiles à contrôler, comme par exemple le dépérissement précoce lié au phoma) ; depuis la PAC de 1992, le tournesol est de plus confiné aux sols à plus faibles potentialités, non irrigués (concentration en Poitou-Charentes et Midi-Pyrénées) ;
- difficultés de désherbage chimique pour le sorgho (depuis l'interdiction de l'atrazine) : petit créneau ne justifiant pas le développement d'herbicides spécifiques.

En revanche, tournesol et sorgho mobilisent peu d'intrants de synthèse et ont un bon profil environnemental : peu de reliquats azotés, possibilités de binage mécanique, peu de maladies nécessitant des traitements chimiques (tolérance variétale...).

8.2.2. Rentabilités relatives des cultures

. Les évolutions relatives des prix et des aides

Les éléments de contexte économique que constituent les prix de vente et les aides européennes ont beaucoup évolué depuis la réforme de la PAC de 1992, rendant certaines productions plus rentables que d'autres au cours du temps. Les évolutions des réformes de politique agricole décrites plus haut peuvent ainsi limiter (ou au contraire encourager) le développement de certaines adaptations, jugées moins (plus) rentables que d'autres productions. Par exemple, suite à l'Agenda 2000 de la PAC, le différentiel entre les aides (à la surface) octroyées aux oléagineux et aux céréales a diminué pour être effacé totalement depuis 2002. Le paiement d'établissait à 63 €/tonne pour les céréales (y compris le maïs) depuis 2001, contre 81,74 €/t en 2000, 72,37 €/t en 2001, et 63 €/t depuis 2002 pour les oléagineux. Depuis 1990, les surfaces en tournesol ont, de plus, diminué de 47% en raison de rapports de prix défavorables (concurrence avec le blé dur dans le Sud, disparition de la sole irriguée). Le prix de marché du sorgho, généralement inférieur de 8 à 10% à celui du maïs, l'a rejoint en 2005.

. Les calculs de rentabilité en situation de production : le cas du sorgho

Les observations réalisées par ARVALIS - Institut du végétal dans trois régions indiquent que le sorgho est compétitif dans les assolements par rapport aux grandes cultures d'été dominantes (calculs réalisés sur la base de la PAC 2006). En Midi-Pyrénées (et Poitou-Charentes), le sorgho, en sec dans les sols à bonne réserve hydrique et plus encore s'il est irrigué, dégage une meilleure marge brute que le tournesol. En vallée du Rhône, le sorgho irrigué devient une alternative intéressante au maïs irrigué lorsque l'irrigation est limitante et que le rendement du maïs plafonne à 110 q/ha.

8.2.3. Débouchés et marchés

L'intérêt d'une substitution entre productions pour faire face aux sécheresses est largement dépendant de la vitalité économique des filières de débouchés de ces productions. Or leur situation est assez contrastée, ce qu'on peut illustrer par les exemples du tournesol, du sorgho, du maïs et des filières énergétiques.

. Le marché du tournesol

Les débouchés existent pour des surfaces supérieures à ce qu'elles sont actuellement. L'huile de tournesol est la première huile alimentaire consommée en France. L'arrivée sur le marché, ces dernières années, de variétés oléiques agronomiquement performantes offre de nouveaux débouchés : en alimentation humaine ; en tant que culture énergétique, en complément du colza, pour la fabrication de biodiesel (la culture est possible soit sur jachère, soit sur la SCOP où elle bénéficie alors de l'aide aux cultures énergétiques de 45 €/ha) ; en tant que culture industrielle (autorisée sur jachère), destinée surtout au secteur des biolubrifiants. Les tourteaux de tournesol constituent par ailleurs une source de protéines qui contribue à réduire l'important déficit protéique européen.

. Le marché du sorgho

La France est le premier producteur de sorgho de l'union européenne, avec environ 50% de la production. Les surfaces (moins de 60 000 ha) restent inférieures au potentiel actuel de 100 000 ha au niveau des débouchés. Il constitue un substitut intéressant au maïs en cas de sécheresses répétées en raison de ses moindres besoins en eau. L'essentiel des débouchés concerne l'alimentation animale, avec une demande communautaire (principalement espagnole) supérieure au marché intérieur. Ce dernier reste modeste alors que le remplacement du maïs par du sorgho ne pose aucun problème nutritionnel ou technique pour l'alimentation animale. Les sorghos français sont d'ailleurs les seuls en Europe à être garantis 100% sans tanins. Les cas étrangers (Espagne...) confirment que les filières peuvent s'adapter à cette substitution. Reste en France un problème d'adaptation de filière (collecte, stockage...), et de gestion des surcoûts pour une matière première supplémentaire marginale dans les approvisionnements des coopératives.

On constate un léger accroissement des surfaces semées en 2006 qui atteignent environ 60 000 ha, soit +10 à +15% par rapport à 2005 (source semenciers) ; alors que le prix du sorgho a peu décroché en 2006 par rapport au maïs (-2 à -3 €/t).

. Le marché du maïs

Jusqu'en 2004, la culture du maïs a occupé en moyenne plus de 3,3 millions d'hectares : 1,5 Mha pour le maïs fourrage, 1,75 Mha pour le maïs grain, 50 000 ha pour le maïs semences, et 30 000 ha pour le maïs doux. Si les surfaces en maïs grain sont restées assez stables depuis une dizaine d'années, lors de sécheresses on constate des ajustements significatifs à la baisse des surfaces (2003 avec transfert vers l'ensilage, 2005 et 2006) et des chutes de rendements (2003 et 2005).

L'Europe (à 25) est le troisième producteur mondial de maïs grain avec environ 48 millions de tonnes (derrière les Etats-Unis et la Chine). Plus des ¾ de cette production sont destinés à l'alimentation animale, le secteur industriel de l'amidon, des semoules, des corn-flakes... transformant le reste.

Jusqu'en 2004 (à l'exception de 2003), la France a produit environ 16 millions de tonnes de maïs grain, soit plus de 30% des volumes de l'Europe à 25. Près de 60% de la production française sont exportés sous forme de grains et de produits transformés par l'amidonnerie et la semoulerie vers les pays de l'UE. La France est l'un des rares pays européens non déficitaires en maïs (avec la Hongrie et l'Autriche). Ceci lui permet de couvrir les déficits de ses partenaires tels que l'Espagne (proche géographiquement de la production du Sud-Ouest et touchée de plus fortement par la sécheresse) et les pays du nord de l'Europe (Allemagne, Benelux, Royaume-Uni).

La baisse de plus de 15% des surfaces de maïs grain entre 2004 et 2006 a réduit le potentiel de production français à 14 millions de tonnes.

La France est un acteur majeur de la filière semence. Cette filière représente un chiffre d'affaires d'environ 650 millions d'Euros, ce qui fait de la France le leader européen de la production de semences de maïs (12 millions de doses, dont la moitié est exportée) et le premier exportateur mondial. La France exporte également plus des 2/3 de sa production de maïs doux vers les pays de l'UE.

A l'exception du marché de niche constitué par les semences, la filière maïs française est de plus en plus soumise à la compétition mondiale, et, dans une moindre mesure, à celle des nouveaux Etats membres de l'Union (Hongrie).

. Les débouchés énergétiques

La France s'est engagée à accroître significativement la part des biocarburants dans sa consommation (d'environ 1% actuellement à 7% en 2010). Le développement d'une production nationale repose pour l'instant sur l'utilisation d'espèces déjà cultivées pour des usages alimentaires. Le développement des cultures énergétiques est une opportunité pour le colza et le tournesol (filiale biodiesel) que l'on peut considérer comme positive pour l'économie d'eau. On estime à 2 millions d'ha le potentiel de surfaces en colza pour la production de biocarburants. Le sorgho a également une carte à jouer dans le cadre du plan gouvernemental sur les énergies renouvelables, puisqu'il est source à la fois d'amidon (bioéthanol) et de biomasse (thermique et production d'électricité). Il est prévu que le sorgho soit aussi utilisé avec le maïs comme matière première dans l'installation de Lacq (Pyrénées-Atlantiques), actuellement en construction.

Le débouché énergétique devrait donc être favorable à l'ensemble de la filière céréales et oléo-protéagineux. La question de la compétitivité de cette filière reste néanmoins posée, face à des perspectives de concurrence accrue des Etats-Unis et du Brésil sur le bio-éthanol. A ce nécessaire bilan économique doit s'adjoindre un bilan environnemental, en matière de pression sur les ressources en eau, en particulier. La perspective de débouchés nouveaux pour certaines productions devrait profiter aux cultures économes en eau.

Le marché des énergies renouvelables pourrait aussi conduire à l'introduction de nouvelles productions, dédiées à cet usage énergétique : Miscanthus, canne de Provence, taillis à (très) courte rotation..., dont l'intérêt par rapport à la consommation en eau devrait être étudié.

9. Les modalités d'action économique et politique

Aider l'agriculture à s'adapter, c'est lui permettre d'être rentable tout en partageant de façon non conflictuelle la ressource en eau avec les autres acteurs de la société. L'action publique peut envisager quatre directions :

- l'action compensatoire *a posteriori*, via l'assurance publique ou privée ;
- l'augmentation de la ressource, ajustant l'offre à la demande ;
- l'économie d'eau, ajustant la demande à l'offre ; elle s'envisage à 2 échelles : par une intervention directement sur la consommation d'eau, et par une démarche plus amont, qui vise à réduire les besoins ;
- la recherche de solutions pérennisant une gestion équilibrée de la ressource : la gestion concertée.

Ces pistes d'action ne s'excluent pas mutuellement, et, plutôt que dans une voie unique, il apparaît que c'est au travers d'une combinaison judicieuse et adaptée aux réalités locales de terrain de ces différents instruments qu'il faille chercher la solution politique au problème de la sécheresse. Cette combinaison dépend en premier lieu de l'anticipation du phénomène des sécheresses lui-même. Si ces dernières restent peu fréquentes (délais de retour de une ou deux années sur dix), les systèmes de compensation *a posteriori* (fonds de calamité agricole et

systèmes d'assurance), assortis de mesures de gestion de pénurie en situation de crise sont suffisants pour faire face au risque. Par contre, si les délais de retour des sécheresses sont plus courts (trois ou quatre années sur dix), ces mesures seront insuffisantes et l'action publique devra articuler politiques de création de ressources, de gestion des demandes et de mise en adéquation durable des disponibilités aux besoins. Notons que dans cette éventualité, l'usage agricole de l'eau ne serait plus seul en cause et que c'est une redéfinition des objectifs et des moyens de la politique de l'eau en France qu'il s'agirait de construire si l'on veut pouvoir assurer durablement la satisfaction des besoins de l'ensemble des usagers de la ressource tout en protégeant les milieux naturels.

Sur les meilleures options de gestion de la ressource en eau, deux écoles s'opposent : celle des tenants d'une régulation par l'Etat (via des outils réglementaires ou économiques), et ceux qui privilégient la gestion locale par le partage négocié de la ressource disponible. Pour les premiers, c'est la question de l'équité d'accès à la ressource pour tous qui justifie une approche nationale de la politique de l'eau, celle-ci engageant la collectivité dans son ensemble. Le même argument est appliqué à la politique agricole, vue comme la déclinaison de priorités établies à l'échelle du pays et fondée sur un traitement à parité de l'ensemble des professionnels du monde agricole. Pour les seconds, l'eau est un bien surtout local, et sa gestion doit être conçue selon une logique décentralisée portée par les usagers locaux directement concernés.

Le diagnostic de la situation de terrain et l'évaluation des mesures politiques testées ou envisageables ne font pas toujours l'objet d'études scientifiques. Ils ont pu en revanche donner lieu à des études et expertises techniques, ainsi qu'à des rapports institutionnels qui formulent un certain nombre de recommandations : citons notamment le rapport du CG GREF sur "l'irrigation durable", plusieurs rapports parlementaires sur la gestion des risques climatiques en agriculture ou plus généralement sur la politique française de l'eau.

9.1. Indemnisations des pertes et assurance

On se situe dans l'hypothèse où les sécheresses restent des événements exceptionnels. La compensation des pertes d'exploitation *a posteriori* peut comprendre deux modalités non mutuellement exclusives : le régime des calamités agricoles, conçu pour un risque naturel difficilement mutualisable ; et l'assurance individuelle (ou professionnelle), conçue en théorie pour répondre à un risque économique bien identifié. Cette dernière est plus avantageuse en termes de mutualisation des risques si elle est assise sur des productions individuelles (grandes cultures). En conséquence, les indemnisations sont plus importantes que dans le cas du régime des calamités agricoles, qui est basé sur une situation locale et non individuelle. Rappelons encore une fois que le problème se présente différemment selon les régions. Dans les régions arides et semi-arides, les systèmes de culture se sont adaptés depuis longtemps. Dans nos régions humides à sub-humides où la sécheresse marquée est occasionnelle, cet événement est accepté comme un risque. L'examen détaillé du mécanisme de compensation des pertes dues à la sécheresse par les fonds de calamité agricole n'était pas l'objet de l'expertise. On a préféré se concentrer sur les potentialités, avantages et inconvénients de systèmes d'assurance privée du risque sécheresse à la lumière de l'expérience étrangère.

Depuis quelques années, la question plus large de la gestion des risques, notamment climatiques, en agriculture a fait l'objet de plusieurs rapports en France⁴.

. L'assurance privée contre le risque sécheresse

Un tel système présente les difficultés communes à tout système d'assurance (sélection adverse et aléa moral), mais a surtout la spécificité d'être (contrairement à la grêle par exemple) un risque dit "systémique" ou "corrélé" (la probabilité d'occurrence de l'événement est faible, mais lorsqu'il se réalise les pertes sont considérables et concernent simultanément un grand nombre d'assurés). Un second problème provient de la difficulté d'imputer à la seule sécheresse des pertes qui peuvent aussi résulter d'une conduite de cultures ou d'un choix de spéculations inappropriés. Le caractère systémique du risque pose le problème de la réassurance, prise en charge par des compagnies privées ou l'Etat selon les pays. Les exemples de l'Espagne et des Etats-Unis, où l'Etat agit comme réassureur, confirment le coût pour la collectivité de systèmes qui ne peuvent trouver leur équilibre financier sur la seule base des primes versées et sont très fortement subventionnés par l'Etat, soit directement, soit au travers de la réassurance. L'intervention possible de l'Etat comme réassureur dépend alors du développement du marché privé de la réassurance (faible dans les deux pays cités) et de l'existence ou non de systèmes d'indemnisation publics (cas de la France).

Pour faire face à ce problème, le rapport Ménard recommande la mise en place d'un système très mutualisé (contrats "multi-risques", englobant toutes les productions et le plus d'exploitations possible), et l'encadrement des contrats d'assurance par un cahier des charges négocié entre les assureurs et l'Etat. Depuis 2005, la majorité des contrats multi-risques climatiques en France sont proposés par deux assureurs privés (Groupama et Pacifico), la souscription de ces contrats étant subventionnée à hauteur d'environ 35%, avec un niveau de franchise dépendant de la nature du contrat (à l'exploitation ou à la culture).

⁴. "L'agriculture face aux risques climatiques" (CES, 1998) ; rapport d'évaluation de la politique de protection de l'agriculture contre les risques climatiques (MAP, 2000) ; "L'assurance-récolte et la protection contre les risques en agriculture" (C. Babusiaux, 2000) ; "Gestion des risques climatiques en agriculture. Engager une nouvelle dynamique" (C. Ménard, 2004).

Pour conclure sur cette modalité d'action, le caractère trop récent du système d'assurance-récolte en France ne permet pas de tirer des conclusions définitives sur l'impact du développement de l'assurance sur la gestion du risque sécheresse, en termes de modification des systèmes de cultures, ainsi que des modes de couvertures privilégiés selon la typologie des exploitations agricoles. Des analyses sur le sujet devront intégrer le fait que la réforme actuelle de la Politique Agricole Commune conduit à une modification de la partie du revenu de l'exploitation qui serait exposée au risque de sécheresse.

9.2. Augmentation de la ressource

L'augmentation de la ressource, par la réalisation de grands barrages ou d'autres options techniques, n'est pas du ressort de cette expertise ; c'était l'objet du rapport "Irrigation durable" commandé par le MAP au CGGREF, qui poursuit d'ailleurs son analyse par une étude complémentaire sur les potentialités de mobilisation des ressources encore disponibles. A la lumière de ce rapport et de quelques autres études on peut toutefois rappeler ici les termes du débat.

La création de nouvelles ressources a un coût pour la société, dont la justification devrait reposer sur une analyse coûts-bénéfices étendue à l'ensemble des usagers. Une telle évaluation globale n'existe actuellement pas, comme le souligne le rapport du GREF, qui recommande d'explorer toutes les possibilités d'économiser l'eau avant d'envisager d'accroître la ressource.

. La création de nouveaux réservoirs

La création de vastes retenues réservoirs suppose des engagements financiers importants des pouvoirs publics. Les sites les plus favorables sont d'ores et déjà équipés et l'aménagement des sites encore disponibles doit tenir compte de contraintes techniques ou environnementales diverses. Ce sont des contraintes de cet ordre qui avaient abouti au renoncement à la réalisation du réservoir de la Trézence en Charente maritime par exemple. Cette option ne peut donc être envisagée qu'au cas par cas, vis-à-vis de problèmes de pénurie récurrents et touchant l'ensemble des usages de la ressource.

L'option alternative est la réalisation de nouvelles retenues collinaires, dont la taille et donc le coût et l'impact supposé sur le milieu sont moindres. Si l'intérêt de cette option doit là aussi être examiné au cas par cas, le principe en est également discuté. Ces retenues posent en effet divers problèmes : impact écologique local non nul, risque sanitaire (qualité de ces eaux stagnantes), problèmes de sécurité pour les populations situées à l'aval (stabilité des remblais), coût puisque la construction de ces réservoirs privés est largement subventionnée par l'Etat et/ou les collectivités territoriales, voire par les Agences de l'Eau (on cite des taux de subventions de 80% dans certains départements du Sud-Ouest), inéquité dans l'accès à l'eau (accaparement de la ressource par quelques agriculteurs). Notons que là aussi les sites les plus propices (facilité et coût) à l'installation de tels réservoirs sont d'ores et déjà équipés depuis les années 90.

. La mobilisation accrue des réserves souterraines

Les possibilités sont limitées par les potentialités du milieu, mais surtout par les engagements de la Directive Européenne "eaux souterraines". D'une part, selon la directive, les prélèvements ne doivent pas dépasser le renouvellement naturel des nappes par le cycle de l'eau (objectif de gestion "durable") et, d'autre part, les nappes profondes sont à réserver en priorité à l'alimentation en eau potable pour des raisons de meilleure qualité de ces ressources.

. Les autorisations de prélèvements individuels

L'irrigation s'est surtout développée par une multiplication des pompages individuels en rivière et en nappe à partir des années 1980. Le régime d'autorisation n'a pas permis d'enrayer cette évolution jusqu'en 2000. Depuis cette date autorisation de prélèvement en règle et compteur sont obligatoires pour bénéficier des aides PAC. Mais des difficultés de contrôle subsistent, avec de nombreuses régularisations ex post de pompages non déclarés. La tendance actuelle est au contrôle strict des nouvelles autorisations. Mais bien plus que le renforcement de la police des eaux, c'est le contexte économique difficile de l'agriculture irriguée et l'impact des sécheresses récentes qui expliquent la baisse des superficies irriguées aujourd'hui constatée (voir plus haut). Le rapport du CG GREF propose de renforcer cette action de police. Il recommande par exemple de contrôler, voire d'interdire, ces prélèvements dès lors qu'un réseau collectif existe déjà dans la zone.

. Le déstockage d'eau des barrages hydroélectriques

L'utilisation de ces lacs artificiels pour soutenir des étiages aggravés par les prélèvements pour l'irrigation est en concurrence avec la production d'énergie, mais aussi avec d'autres usages, récréatifs notamment. Jusqu'à ces dernières années, EDF était fondée à réclamer des compensations financières pour ses lâchers d'eau en été. Rappelons que l'eau stockée dans les barrages au printemps est en effet surtout destinée à gérer les pics de consommation en hiver, les centrales hydro-électriques étant seules capables de faire face aux pointes de consommation à cette saison. C'est donc sur une notion de "préjudice énergétique" que se fondait la tarification des lâchers d'eau en été à partir des réservoirs hydro-électriques. Cette pratique est en cours d'évolution dans le cadre de la renégociation des concessions du domaine public accordées à EDF. L'Etat cherche à imposer à

l'opérateur une vision "multi-usages" de la gestion des barrages, ouvrant ainsi un droit à la ressource stockée au bénéfice des autres usagers. Le bilan coûts-avantages de cette nouvelle politique reste à faire. Certes, la collectivité bénéficie ainsi d'un accès plus important à la ressource, mais elle devra en contrepartie prendre en charge les coûts de maintenance et de sécurité de ces ouvrages. Il faut enfin rappeler que l'option des lâchers d'eau à partir de retenues EDF a déjà été largement mobilisée depuis les années 90 dans le Sud-Ouest, que ce soit sur le bassin de l'Adour ou sur celui de la Garonne, et qu'elle est partie intégrante de la gestion du système Neste.

9.3. Action sur la demande en eau agricole

9.3.1. Les mesures réglementaires ou dissuasives

. Les restrictions réglementaires à l'irrigation

Les arrêtés préfectoraux restreignant ou interdisant l'irrigation peuvent avoir un effet pénalisant important pour les agriculteurs obligés d'interrompre l'arrosage à des périodes cruciales pour leur(s) culture(s). Ils peuvent aussi avoir des effets pervers, des interdictions portant sur des plages horaires ou certaines journées pouvant inciter certains irrigants à se suréquiper pour prélever davantage durant les périodes licites.

L'effet négatif de ces restrictions est cependant fortement réduit si elles sont anticipées par les agriculteurs suffisamment tôt, leur permettant d'adapter leur assolement comme leur calendrier d'arrosage. Cet effet d'anticipation a pu être testé par simulation. On a développé un modèle basé sur le couplage du modèle de cultures STICS avec un simulateur d'optimisation micro-économique. L'outil permet de simuler un calendrier optimal d'irrigation conditionnel à un choix d'assolement optimal, en situation d'incertitude sur le climat se réalisant au cours de la campagne culturale. On a introduit dans ce modèle un scénario de restrictions d'arrosage en cours de campagne d'irrigation intervenant de manière aléatoire. L'anticipation par l'agriculteur de cette possibilité d'interdiction d'arrosage le conduit à adopter des assolements et des calendriers d'irrigation moins vulnérables à ce type de risque.

Les simulations effectuées montrent que des restrictions d'arrosage anticipées en amont, avant choix des cultures d'été par l'exploitant, ne se traduiraient que par des baisses de revenus espérés de l'ordre de 5% par rapport à une situation sans interdiction d'arrosage. Ces résultats sont obtenus en supposant que l'exploitant peut combiner substitution par des cultures plus économes en eau des cultures les plus consommatrices et adaptation tactique des arrosages en cours de campagne d'irrigation à matériel donné.

Même s'il ne s'agit là que de simulations qui demandent à être confirmées par des exemples pris en situation réelle, le travail montre l'importance d'une alerte suffisamment précoce si l'on souhaite limiter au maximum les pertes de revenu agricole. Cette alerte devrait s'opérer à deux niveaux. D'une part, les agriculteurs doivent disposer, avant de décider leur assolement en cultures d'été, d'informations les plus fiables possibles en matière de remplissage des nappes et de risques de sécheresse en été. Cet effort d'alerte est maintenant conduit de manière systématique par les pouvoirs publics depuis la sécheresse (malheureusement mal anticipée) de 2003.

Mais l'effort devrait aussi porter sur les calendriers de restriction d'arrosage dès lors que la sécheresse apparaît comme très probable. C'est ici qu'intervient le retour de connaissance concernant les choix d'assolements en cultures d'été des irrigants en réaction à l'alerte sur les réserves disponibles. Sur la base de cette information, les pouvoirs publics peuvent simuler les besoins en eau des agriculteurs et anticiper sur la sévérité des restrictions qu'ils vont devoir mettre en place. Le potentiel d'adaptation stratégique des cultures ayant été d'ores et déjà mobilisé lors de l'alerte avancée, c'est le potentiel d'adaptation tactique qui doit maintenant être favorisé par une annonce précoce du calendrier des restrictions et de leur répartition locale.

L'annonce précoce des risques de sécheresse et de restrictions à l'irrigation ainsi qu'une systématisation de la collecte d'informations en amont sur les choix de cultures d'été peuvent donc permettre de réduire les pertes de revenus agricoles à des niveaux nettement inférieurs à ceux qui auraient résulté d'interdictions impromptues. Rappelons que néanmoins, là encore, la nature du risque, et donc l'attitude de l'irrigant face au risque, compte. La survenue de la sécheresse restant incertaine (cas de 2006 où un printemps pluvieux a pallié en partie le déficit de recharge hivernale des réserves du sol), l'agriculteur peut aussi opter pour des stratégies volontairement risquées, mettant en place des cultures fortement consommatrices d'eau mais plus rentables selon une logique de loterie, une perte une année donnée pouvant être compensée par des gains plus importants l'année suivante.

Bilan de la sécheresse 2005 : les recommandations de l'IGE (MEDD)

Les dispositifs de restriction d'arrosage sont en principe destinés à régler des situations de crise exceptionnelle et n'ont pas vocation à s'instaurer comme des moyens courants de pilotage politique des sécheresses. Le problème est donc posé de les adapter dans l'éventualité d'une répétition fréquente des épisodes de sécheresse. C'est le sens des recommandations faites par l'IGE au MEDD en 2006, suite au bilan de la sécheresse 2005. Le rapport préconise ainsi :

- de renforcer le rôle du préfet coordonnateur de bassin, qui donnerait délégation à des "préfets de sous-bassin" pour signer des arrêtés cadre interdépartementaux,
- d'associer plus étroitement les maires au dispositif de gestion de crise, en raison notamment de leur responsabilité sur le service public de l'eau. Lorsque la demande en eau potable risque de ne pas être satisfaite, les restrictions d'usages non prioritaires en eau potable devraient ainsi relever d'arrêtés municipaux,
- de mettre en place une mission nationale pérenne d'appui méthodologique aux services sur la gestion quantitative de l'eau,
- de gérer la pénurie d'eau globalement entre les rivières et les nappes souterraines en relation avec elles, en reconsidérant le principe de réserver certaines nappes souterraines exclusivement aux besoins futurs en eau potable, pour s'autoriser à y faire appel en temps de crise.

Si ces recommandations sont suivies par le ministère, on voit qu'elles conduisent à la mise en place d'une structure concertée de pilotage de la gestion quantitative de l'eau en été, structure maintenant conçue de manière pérenne. Elles anticipent probablement sur des évolutions de la législation en matière de police des eaux et d'implication des élus dans la gestion des périodes d'étiage.

9.3.2. Les mesures économiques

Elles comportent à la fois des aspects de régulation quantitatifs ou tarifaires et incluent le renoncement à des mesures incitant les agriculteurs à la consommation de ressource. L'accès à l'eau a été historiquement favorisé en France pour des raisons de compétitivité agricole et de maintien d'exploitations rentables. La réforme de la PAC de 1992 a figé cette situation en instaurant des différentiels de primes entre cultures en sec et cultures irriguées. L'absence de tarification de l'eau pour les irrigants individuels, hors périmètre de concession d'une SAR ou d'une ASA, a également contribué à l'expansion de l'irrigation. Dans le contexte d'une ressource devenue plus rare, la question est donc posée d'une régulation par des outils économiques de l'utilisation agricole de l'eau.

. Le découplage des aides agricoles

Le choix fait par la France après la réforme de la PAC de 1992 d'accorder une aide majorée aux cultures irriguées vis-à-vis des cultures en sec dans bon nombre de départements a certainement contribué à la poursuite de l'accroissement de l'irrigation constaté entre 1994 et 2000. Mais ce n'est certes pas le seul facteur explicatif. La réforme s'est également accompagnée d'une quasi-suppression des aides aux oléo-protéagineux, entraînant un transfert de l'irrigation de ces cultures vers celles du maïs : la surface en maïs déclarée irriguée PAC est passée de 757 000 ha en 1994 à 917 000 en 2000 (source ONIC).

Le "découplage" des aides à 75%, entré en vigueur au 1^{er} janvier 2006, a déjà probablement contribué à la nouvelle baisse, d'environ 7%, des surfaces de maïs irrigué observée en 2006. Même si la référence historique dans l'attribution des aides a été favorable aux irrigants et que le découplage n'est pas total en France, la logique même du découplage devrait conduire à faire disparaître toute incitation à irriguer par l'intermédiaire des mécanismes de la PAC à brève échéance.

. La tarification de l'eau

De très nombreuses études économiques internationales ont plaidé pour le recours aux outils tarifaires pour réguler la demande agricole en eau. La mise en place de ces outils est contrainte par la quantité d'information qu'elle nécessite : mesurer les consommations, si possible à l'échelle individuelle et plusieurs fois dans l'année, connaître les aléas techniques et agronomiques pouvant affecter les consommations, et doit être socialement acceptable par les agriculteurs. Selon l'étendue de ces contraintes, l'analyse économique distingue deux types d'horizons d'efficacité. S'il est possible de dimensionner le tarif au plus près de l'objectif de demande recherché, on parle d'outils de "premier rang", au sens où ils permettent d'atteindre l'efficacité économique collective de l'usage de l'eau. Si l'information nécessaire fait défaut ou que le tarif se heurte à des problèmes d'acceptation par la profession, on parle d'outils de "second rang", au sens où ils ne sont susceptibles que de limiter au mieux les pertes d'efficacité économique par rapport à l'idéal du premier rang. Dans la pratique, on rencontre surtout des outils de "second rang". Le tableau suivant résume les caractéristiques des outils économiques les plus usuels pour réguler l'usage agricole de l'eau.

Les différents modes de tarification de l'eau (Johansson 2002)

Type de tarification	Mise en place	Efficiences potentielle (horizon de l'efficience)	Contrôle de la demande
Proportionnel à la surface irriguée	facile	aucune	Via des restrictions sur cultures (zonage) ou sur extension des périmètres irrigués
Tarif proportionnel à la production (ou à un intrant)	moins compliquée que les options suivantes	second rang (court terme)	Suppose une efficience technique élevée dans l'usage de l'eau. L'action sur le prix des produits (taxes) doit entraîner une diminution de la demande. en eau. A des effets ambigus à moyen terme (sous investissement).
Volumétrique : taux uniforme ou par tranche (taux croissants)	compliquée (pose et relevé des compteurs)	premier rang (court terme)	Permet d'adapter le tarif aux effets de seuils sur les prélèvements (impacts négatifs sur l'environnement plus que proportionnels aux prélèvements). Le système par tranche taxe davantage les gros utilisateurs que les petits.
Tarif binôme (charge fixe + au volume consommé)	assez compliquée	premier rang (long terme)	Type de tarif volumétrique avec charge fixe couvrant les coûts fixes de fonctionnement des infrastructures. La modulation des charges fixes permet d'améliorer l'équité sans détériorer l'efficacité du dispositif.
Marchés de l'eau : quotas concédés échangeables, "banques" de l'eau	difficile (coûts de transaction élevés, distorsions de concurrence)	premier rang (court et long terme)	Suppose un système de droits prédéfinis. Suppose aussi des instances juridiques, soit ad hoc : "Tribunal de l'eau", soit appuyées par un droit de l'eau opérationnel. Les banques de l'eau permettent de gérer les fluctuations des demandes d'une année à l'autre en retirant du marché les droits non utilisés une année humide. Les banques peuvent aussi faire de l'assurance sécheresse (encore à l'étude).

En France, les outils tarifaires sont surtout mobilisés par les SAR, en complément des approches plus classiques par attribution de quotas ou de débits souscrits. L'ensemble des irrigants est par ailleurs soumis à la redevance "prélèvement" des Agences de l'Eau, qui est un tarif monôme de type proportionnel. Ce tarif est généralement considéré comme "faible" et partant, insuffisant pour modifier de façon significative le comportement des irrigants, alors que l'une des fonctions d'un tarif est de servir de "signal" sur la rareté de la ressource. Cette dernière fluctuant fortement au gré des années et même à l'intérieur de l'année, le tarif devrait refléter ces évolutions, ce qui est difficilement réalisable en pratique. Pour cette raison, le tarif est surtout vu comme un outil de long terme, agissant pour discipliner les comportements, éviter le sur-investissement dans l'irrigation ou des spécialisations trop fortes dans des cultures très consommatrices d'eau dans des régions où la ressource disponible est insuffisante ou trop aléatoire. Pour les mêmes raisons, le tarif doit être modulé dans l'espace pour prendre en compte les raretés locales ; celles-ci peuvent être difficiles à apprécier du fait de la circulation de la ressource dans un bassin versant.

Le tarif binôme offre l'avantage de permettre la récupération des coûts fixes d'infrastructure (amortissement et maintenance) pour les ouvrages de retenues, les canaux ou les réseaux collectifs d'irrigation. Dans la mesure où l'obstacle qui restreint bien souvent l'usage de tels tarifs, l'absence de système de comptage individuel, n'existe pas en France, la mise en place de tarifs binômes, gérés par les SAR sur leurs périmètres de concessions ou les Agences en irrigation individuelle, est une option intéressante à considérer. Il faut noter que cela requiert un cadre légal ad hoc, les redevances des Agences n'ayant pas à l'heure actuelle de dimension réellement tarifaire, étant par nature des instruments fiscaux.

Si les tarifs sont modifiés périodiquement (en fonction du remplissage des nappes par exemple en fin d'hiver) les règles tarifaires doivent être établies suffisamment tôt avant la campagne pour que les irrigants puissent les prendre en compte dans leurs choix d'assolement. De tels systèmes ne seront acceptables pour les agriculteurs que dans le cadre d'une négociation concertée avec la profession.

Les instruments tarifaires peuvent être conçus à l'échelle locale. Mais ne serait ce que pour des raisons d'équité entre les agriculteurs, les tarifs ne doivent pas conduire à des distorsions de compétitivité trop importantes entre les exploitants de différentes régions. Pour cette raison, la mise en place d'instruments économiques de régulation de la demande agricole en eau devrait s'insérer dans les orientations de politique nationale, même si leurs déclinaisons concrètes doivent être ensuite adaptées aux spécificités des contextes locaux. Il n'en est pas de même pour les outils de gestion concertée que l'on aborde plus loin. Résultant d'initiatives locales des usagers, ils peuvent aboutir à des modes de partage de la ressource très spécifiques au territoire concerné.

Les publications scientifiques sur l'impact de la tarification de l'eau en agriculture sont relativement peu nombreuses dans le cas de la France, et concernent majoritairement les grandes cultures. Des travaux de l'INRA et du Cemagref fournissent cependant des premiers résultats conduisant à une sensibilité modérée voire très faible des prélèvements par rapport au tarif de l'eau pour irrigation. Un rapport du Cemagref pour le Plan Bleu compare les situations de différents pays méditerranéens dont la France, en termes de mode de tarification et d'expériences de gestion de la ressource.

L'expérience étrangère récente montre également un fort développement de systèmes de **marchés de droits d'eau** (quotas transférables), aux Etats-Unis, en Australie et au Chili en particulier. Ces échanges peuvent être restreints à une même catégorie d'usagers, les pouvoirs publics gardant la maîtrise du partage de la ressource entre les grandes catégories d'usagers (municipalités, agriculteurs, industriels). Ils peuvent également s'opérer entre usagers (achats d'eau des municipalités aux irrigants). Le bilan de ces expériences est assez contrasté, mais il est indéniable qu'elles ont permis une amélioration significative de la situation dans certains contextes locaux, caractérisés historiquement par des conflits d'usage forts assortis de blocages politiques. De telles expériences semblent aujourd'hui peu transposables à notre pays, de tradition juridique et politique très différente. Mais il est clair qu'à défaut d'une approche concertée de la gestion de l'eau, sur fond de conflits d'usage forts et d'affrontements politiques, elles pourraient inspirer des réformes profondes de la gouvernance de l'eau en France.

9.3.3. Réduction des besoins agricoles en amont

A côté des mesures directes de régulation de la demande en eau des agriculteurs envisagées ci-dessus, les pouvoirs publics ont aussi un rôle d'accompagnement à jouer en matière de maîtrise collective de l'utilisation de l'eau en agriculture. Le premier enjeu de la démarche publique est de tenter de ne pas favoriser le développement de l'irrigation dans des zones déjà structurellement déficitaires ou particulièrement vulnérables aux sécheresses. Une action indirecte sur l'offre de produits peut aussi produire des réductions significatives de l'usage de l'eau.

A ce titre, le potentiel offert par les MAE, en particulier les mesures 1101A (réduction de surfaces irriguées) et 1102A (réduction des doses) mérite une attention particulière. Le rapport ASCA 2004 contient à ce sujet des informations intéressantes. On y montre qu'une part majoritaire des SAU contractualisées se situe dans le Sud-Ouest, avec plus de 7000 ha de SAU contractualisée (il n'a pas été possible dans cette étude de distinguer superficies irriguées et non irriguées) en ZRE (Zones de Répartition des Eaux) en Aquitaine et Midi-Pyrénées et 600 ha hors ZRE dans ces deux régions. Après ces deux régions, viennent la région Pays de Loire avec 6500 ha au total, Poitou-Charentes (1300 ha) et les Alpes (1200 ha). Les pourcentages de couverture des ZRE par des MAE de type 11 restaient toutefois très faibles en 2004 : 0,2% en Midi-Pyrénées, 0,3% en Aquitaine, 0,6% en Pays de Loire et 0,07% en Poitou-Charentes. Le rapport ASCA conclut à un impact négligeable des MAE sur la gestion quantitative de l'eau à l'échelle nationale. Il y a donc là un potentiel considérable d'amélioration de la situation par extension des MAE au moins aux ZRE les plus concernées par les risques de pénurie d'eau.

Les dispositifs instaurés par l'éco-conditionnalité peuvent également fournir un levier favorable à des changements de pratiques agricoles vers davantage d'économie d'eau.

Pour le nécessaire développement des biocarburants, il faut ainsi veiller à privilégier les cultures qui concilient un bon profil environnemental (notamment par rapport à l'eau, mais aussi aux risques de pollution) et une réponse adaptée aux besoins nationaux (diesel). Ceci suppose de soutenir plutôt les oléagineux, et le sorgho pour la production de bioéthanol, sans négliger d'explorer les possibilités de diversification vers des cultures dédiées, plus rustiques (eau et intrants de synthèse).

Il ressort de l'expertise qu'un des freins majeurs au développement de substituts au maïs est le défaut de structuration des filières pour des produits comme le sorgho. Si cette structuration est de la responsabilité du monde agricole, les pouvoirs publics peuvent accompagner cette démarche ne serait ce qu'au travers de missions d'études et de réflexion avec la profession et les instituts techniques.

On a vu l'importance des dispositifs d'alerte mis en place pour avertir les irrigants en amont des leurs décisions d'assolement des contraintes pesant sur les disponibilités hydriques. Ces efforts doivent s'accompagner d'une poursuite de la démarche de sensibilisation des irrigants aux risques de sécheresse et d'un renforcement au conseil agricole en matière de stratégies d'économie d'eau. Des dispositifs comme Irrimieux ont ainsi beaucoup contribué à la prise de conscience des enjeux par la profession agricole. Ce conseil doit porter autant sur les enjeux agronomiques de la maîtrise de l'eau que sur ses enjeux économiques. Il est important que les irrigants disposent des références économiques leur permettant de raisonner leur exposition au risque en cas de sécheresse assortie de restrictions d'arrosage. L'INRA doit s'impliquer dans cette démarche de transfert tout en contribuant à améliorer le diagnostic des impacts économiques des sécheresses et l'évaluation de leurs conséquences environnementales.

9.4. Rechercher l'équilibre entre offre et demande : les gestions locales concertées

La notion de "gestion concertée" recouvre des pratiques assez différentes, allant de la simple négociation sur des volumes d'eau, à la participation à l'élaboration d'un schéma global de gestion de la ressource associant l'ensemble des utilisateurs d'un territoire.

. La gestion volumétrique de l'eau

Depuis le début des années 90 se mettent en place, à l'échelle de bassins versants ou de bassins d'alimentation de nappes, des accords de gestion volumétrique de l'eau, négociés entre l'administration (Agriculture et Environnement) et la profession agricole. Ces accords garantissent des conditions d'accès à la ressource

(volumes, périodes, tours d'eau) pour les irrigants, qui acceptent que leurs prélèvements puissent être contrôlés (pose de compteurs).

Cette forme de gestion a donné de bons résultats dans la Drôme, ainsi qu'en Charente, dans une certaine mesure. L'exemple de la Beauce où les quotas alloués ne sont en fait pas contraignants pour les irrigants montre que l'efficacité des décisions repose sur une vision partagée des risques de surexploitation de la ressource et une volonté des acteurs agricoles de contrôler leurs prélèvements pour l'éviter. Ces systèmes peuvent s'avérer bien plus performants que ceux basés sur des tarifications à la surface ou au forfait, mais ils impliquent des coûts de mise en place et de contrôle très élevés. La littérature économique sur le sujet conclut donc plutôt à des recommandations mitigées, les conditions locales pouvant conduire à privilégier des systèmes de gestion plus simples comme la mise en place de tarifs volumétriques lorsque les coûts de contrôle des prélèvements sont trop importants.

Si la gestion volumétrique permet de réguler des conflits d'usage en situation de tension sur la ressource, elle ne doit pas aboutir à "figer" la situation, interdisant de fait l'accès à l'eau à de nouveaux irrigants potentiels. Par ailleurs, il faudrait faire évoluer l'appareil juridique pour sécuriser ce mode de gestion collective, le partage négocié avec les acteurs agricoles pouvant à tout moment être remis en cause par d'autres catégories d'usagers.

. La gestion concertée

La gestion concertée étend les principes de la gestion volumétrique à l'ensemble des usagers de la ressource. Elle suppose donc au préalable l'acceptabilité sociale de la demande agricole par les autres acteurs, et l'implication volontaire des producteurs agricoles dans une gestion commune avec les autres usagers de l'eau.

On dispose d'études de cas de pollutions agricoles de l'eau où des démarches concertées avec la participation volontaire des exploitants ont donné de bien meilleurs résultats et à coût moindre que des approches curatives basées sur la dépollution des eaux brutes. Des études équivalentes sont encore en nombre limité pour la gestion quantitative (mentionnons les études dans le cadre d'Irrimieux ou les Secteurs de Référence d'Irrigation). Ces démarches sont toutefois difficiles, longues, coûteuses à mettre en œuvre et pas toujours couronnées de succès. La concertation au sein d'instances pluripartites a toutefois le mérite de permettre l'expression, mais aussi l'identification plus claire, des intérêts des différents porteurs d'enjeux ainsi que des rapports de force qui orientent les arbitrages. Elle est en phase avec le mode de gouvernance de la ressource en eau que l'Europe tente de promouvoir au travers de la DCE, en impliquant les usagers locaux et les citoyens dans les décisions.

Confier plus de pouvoirs de décision aux acteurs locaux ne signifie pas que les pouvoirs publics doivent se désengager de la gestion de l'eau. L'administration doit conserver son rôle d'arbitre et faire respecter les réglementations générales. Elle doit aussi veiller à l'équité des décisions, en protégeant les intérêts d'ayants droits plus faibles dans le rapport de force entre acteurs et en harmonisant entre eux les accords locaux afin d'éviter la constitution de discriminations territoriales au sein d'une même catégorie d'usagers qui seraient infondées. Par ailleurs, l'expérience montre que la mise en œuvre, ou la menace crédible, de mesures coercitives constituent souvent une bonne incitation à la négociation : la gestion volumétrique est la réponse acceptée par la profession agricole au développement des restrictions par voie d'arrêtés préfectoraux.

Les approches de gestion concertée ne sont pas propres à la France. L'encadré suivant illustre la démarche engagée dans la Manche de Castille depuis 1994.

. La question des critères et règles de décision

On a déjà pointé le déficit de références socio-économiques précises sur les pratiques d'irrigation qui rendent difficile l'établissement de diagnostics économiques de la valeur de l'eau pour l'agriculture et partant de priorités politiques en matière de gestion agricole collective de la ressource. Mais les mêmes remarques s'appliquent aux autres usages de l'eau et plus encore à sa valorisation écologique par les milieux naturels. Pour y faire face, les Agences de l'Eau ont construit des batteries d'indicateurs de suivi du "bon état écologique" des masses d'eau, complexes et imparfaits. Il en résulte des débats parfois confus sur la transposition de ces indicateurs en règles de gestion, qu'il s'agisse de fixation de débits seuils de prélèvement ou de gestion des nappes d'accompagnement. La coexistence d'aspects liés à la qualité de l'eau et à sa disponibilité en volume complexifie encore davantage ces discussions.

Il apparaît donc, en amont du processus décisionnel lui-même, la nécessité d'une mobilisation de l'expertise scientifique et technique existante, et probablement d'un effort d'amélioration de cette expertise. La présente ESCo a montré par exemple tout l'intérêt du recours aux concepts agronomiques et bioclimatiques de *restitution au milieu* pour juger de l'impact réel de l'agriculture irriguée sur les masses d'eau, impact qui ne saurait simplement s'identifier aux prélèvements directs des irrigants dans les rivières ou dans les nappes. Elle a aussi mis en évidence que le couvert cultivé était généralement plus économe en eau qu'un couvert naturel, surtout s'il est arboré, ce qui devrait conduire à relativiser les discours sur les cultures "fortement" consommatrices d'eau.

Une meilleure prise en compte des apports de l'expertise scientifique et technique devrait aussi permettre d'éviter une approche trop exclusivement "politique" du partage de la ressource et sa gestion en situation de sécheresse. Même si en définitive, la décision doit reposer sur des critères politiques, l'éventail des options ouvertes à cette décision est suffisamment vaste et leur intérêt relatif suffisamment contingent aux situations locales pour ne pas

chercher à associer de manière plus systématique qu'aujourd'hui l'expertise scientifique à la réflexion conduite en amont des choix politiques. Enfin, les expériences de pays étrangers en matière de gestion de la ressource en eau dans un concept de déficit structurel ou de sécheresse pourraient être utilement mobilisées, ainsi que les travaux du Water Scarcity Group européen (co-piloté par la France et l'Italie) et le groupe nord-américain de connaissance sur la sécheresse.

Un exemple de gestion concertée en Espagne : l'unité hydrologique de la Manche Orientale (Castilla-La Mancha)

. Situation et problème

L'est du plateau de Castille (Manche), région soumise à un climat semi-aride (précipitations comprises entre 300 et 500 mm), a connu un spectaculaire développement de l'irrigation sur depuis 1975. En 2005, les surfaces irriguées atteignaient environ 9 000 ha de cultures pérennes (vigne, olivier, amandier), et 102 000 ha de cultures annuelles, dont 45 000 ha de cultures d'été.

L'eau d'irrigation est obtenue par pompage à partir d'un aquifère de 8 500 km² dont les réserves disponibles sont estimées à 20 000 hm³ sur un total de 100 000 hm³. L'exutoire principal de l'aquifère est le Jucar, qui coule vers la Communauté Autonome de Valence, et dont le débit doit impérativement être maintenu au dessus de 2m³/s. Or l'extraction est nettement supérieure à la recharge sur le bassin versant, d'où une baisse moyenne du niveau de l'aquifère d'environ 1,5 m/an, soit 28 m depuis 1980.

Trois "pistes" ont été identifiées pour réduire les prélèvements dans la nappe :

- augmentation de la part des cultures d'hiver,
- maîtrise des doses d'irrigation des cultures,
- substitution partielle des eaux de pompage par des eaux superficielles (objectif 20%).

. Moyens et tâches entreprises

En 1994 a été créée, à l'initiative des irrigants, fortement soutenus a posteriori par l'administration de l'état, une association générale des irrigants de la Manche orientale (Junta Central de Regantes de la Mancha Oriental, JCRMO), avec un double objectif :

- cogérer les aménagements collectifs avec l'Administration,
- défendre les intérêts collectifs des participants.

Au moment de la création de l'association, il n'existait pas d'initiatives semblables en Espagne, du moins sur une surface d'irrigation comparable.

Les tâches entreprises ont été : la connaissance des utilisations de l'eau de l'aquifère, la définition d'unités cadastrales de gestion, la définition d'un maximum de consommation hydrique pour chaque exploitation, la participation au contrôle de l'utilisation, la mise en place progressive de ressources de substitution.

Pour appuyer l'action de la JCRMO, l'administration provinciale met à sa disposition :

- un service de consultation des arrosages (Université de Castille LM, et Institut agronomique provincial) qui fournit les références de consommation d'eau des cultures (ETP et ETM),
- un service de suivi des cultures (Université Castille LM) qui élabore des cartes de cultures au moyen d'images satellitaires.

. Des résultats...

Des résultats ont été acquis :

- la JCRMO est reconnue tant par ses adhérents que par l'Administration,
- elle reçoit de nombreuses visites et ses cadres sont invités à porter témoignage dans d'autres périmètres,
- la part des cultures d'hiver a nettement augmenté, d'approximativement 50%,
- le sur-arrosage a pratiquement disparu.

Cependant, tous les objectifs affichés n'ont pas été atteints :

- la substitution des eaux de pompages par des eaux superficielles n'est qu'au quart de l'objectif (pour des raisons d'infrastructures),
- la baisse de l'aquifère n'est pas stoppée.

... et un défi

Pour l'instant, le système de production reste inchangé. Son évolution est certainement une tâche importante pour demain, surtout si la baisse de précipitations prévue par les modèles de changement climatique se confirme. La reconnaissance de l'Association JCRMO par ses adhérents est un facteur psychologique important pour l'aborder !

. Instruments de régulation territoriale et gestion quantitative de l'eau

L'expertise a permis de recenser les potentialités et les limites des instruments de gestion territoriale de la ressource en agriculture. Les **PGE** (Plans de gestion des étiages) sont des outils souples de gestion associant les usagers autour d'enjeux de normes de prélèvement en rivières. Si cette souplesse constitue leur principal atout, elle est aussi une faiblesse. Les PGE souffrent de l'absence d'un statut juridique clair les protégeant contre des réclamations par des tiers auprès des tribunaux. Par ailleurs, fondés sur la recherche de consensus, ils impliquent en pratique l'accord unanime des acteurs pour pouvoir être mis en œuvre. L'exemple récent des difficultés du PGE Adour, suite aux réserves du Conseil Général des Hautes-Pyrénées, illustre bien la fragilité de cet instrument.

Les **SAGE** (Schémas d'aménagement et de gestion des eaux), instaurés par la Loi sur l'Eau de 1992 offrent l'avantage d'un cadre juridique plus solide pour conduire une gestion concertée. Ils reposent aussi sur le volontarisme des acteurs (élus locaux, usagers, administration) réunis au sein de la CLE (Commission Locale de l'Eau). Les procédures de mise en place d'un SAGE sont donc en général longues et complexes, à preuve le petit nombre de SAGE actuellement en place. Les SAGE sont conclus pour cinq ans et ne prennent force de texte opposable aux tiers qu'à condition d'être entérinés par voie d'arrêté préfectoral. Conçus pour répondre à des enjeux de gestion locale, leur périmètre est généralement réduit (petits bassins versants) ce qui peut poser problème si les enjeux abordés "débordent" en fait sur d'autres bassins ou que le SAGE est situé en zone littorale. L'horizon court de cinq ans peut également constituer un obstacle à des investissements lourds amortis sur des durées supérieures : stations d'épuration par exemple ou ouvrages de retenue. Enfin la pérennité des moyens financiers consacrés au SAGE par les acteurs concernés est difficilement acquise dans la durée. Les SAGE constituent néanmoins un outil précieux pour se substituer aux accords volumétriques volontaires (cas de la Beauce par exemple). On compte aujourd'hui 32 SAGE en phase de mise en œuvre contre environ 130 en cours de réalisation.

Les **SAR** et **EPTB** peuvent jouer un rôle prépondérant dans la gestion quantitative de l'eau au plan territorial, mais à condition que leurs politiques en la matière soient encadrées par des instruments de type SAGE. Une réflexion est nécessaire sur l'évolution des EPTB par rapport aux SAR.

Enfin, une régulation territoriale peut s'avérer insuffisante, car certaines questions de gestion quantitative soulèvent des questions de politique nationale. Par exemple, dans le cas du barrage de Charlas, l'ampleur du projet suppose un soutien financier de la collectivité nationale.

10. Conclusions

En conclusion de ce travail, il est important d'en rappeler le cadre : la France n'est pas menacée d'aridité et il faut d'entrée différencier la **sécheresse, événement accidentel** mais dont l'occurrence peut augmenter, de l'**aridité, situation de pénurie d'eau structurelle** à laquelle font face d'autres pays. La sécheresse n'est pas un événement nouveau et l'analyse climatologique a bien montré que le 20^e siècle tout entier était émaillé de sécheresses. La répétition récente du phénomène en 2003, 2004 et 2005, jointe aux prévisions de changement climatique qui indiquent une baisse de pluviométrie pour le sud de la France (même si les prévisions de pluviométrie sont moins fiables que celles concernant la température) justifient que l'on se préoccupe de la capacité de l'agriculture à s'adapter à une situation où la sécheresse deviendrait un événement plus récurrent.

La sécheresse ne provient pas de la seule pluviométrie. Elle est toujours le croisement du déficit pluviométrique cumulé, des conditions climatiques et des caractéristiques du milieu.

- Dans la **sécheresse édaphique**, ce croisement concerne la pluviométrie de la saison de végétation et les propriétés hydriques du sol (eau disponible) à l'échelle de la parcelle cultivée. Cette sécheresse affecte tous les agriculteurs (irrigants ou non) et les éleveurs.
- Dans la **sécheresse hydrologique**, ce croisement concerne la pluviométrie de l'automne et de l'hiver et les capacités de stockage du milieu à l'échelle d'un territoire, qu'il s'agisse de nappes phréatiques ou de ressources artificielles. Cette sécheresse affecte principalement les irrigants, mais aussi les autres usagers des ressources en eau.

Le périmètre de cette étude ne se limite pas aux seuls irrigants mais concerne bien l'ensemble des acteurs de l'agriculture, la part de l'agriculture non irriguée étant supérieure à 90% de la surface agricole utile.

Cette étude a un **double objectif** :

- **l'incidence de l'agriculture sur la ressource en eau**, bien public partagé avec d'autres usagers,
- **le maintien et le développement d'une agriculture confrontée à la sécheresse.**

L'analyse bibliographique conduite à cette fin a mis en évidence des consensus mais aussi des lacunes dans la bibliographie, qu'il s'agisse des publications scientifiques internationales ou d'études à caractère plus finalisé conduites à l'échelle régionale ou nationale.

- Les recherches se rapportent le plus souvent à l'aridité. Concernant les mécanismes physiologiques, la survie des plantes a été privilégiée par rapport à leur production en conditions de sécheresse compatible avec l'agriculture. De même, les recherches sur les systèmes de culture (assolements, successions culturales et itinéraires techniques) ont été le plus souvent menées dans des régions du globe à climat aride. Pour ce qui nous concerne, en agriculture pluviale, dans nos climats tempérés, nous avons affaire à des alternances d'années sèches et d'années normales. De même, en agriculture irriguée, nos systèmes de culture peuvent faire se succéder des cultures diversement irriguées ou non irriguées avec les arrières effets des unes sur les autres.
- Les études, à caractère physique, portant sur les bilans hydrologiques, ont été réalisées sur des sites particuliers à l'échelle de la parcelle, ou au mieux du petit bassin versant, renvoyant à des études ultérieures l'appréhension de l'incidence du croisement "*climats x sols x systèmes de culture*" sur le bilan hydrologique d'un bassin versant d'envergure. L'utilisation des modèles écophysologiques pour réaliser de telles études, testée pour l'instant sur un nombre limité de cas illustratifs, demande de disposer de bases de données sur le croisement "*sols x systèmes de culture*".
- Les mêmes remarques peuvent être faites quant aux études économiques ou sociétales. Elles concernent surtout des situations de fortes contraintes d'accès à la ressource et fort peu celles où la sécheresse reste un événement aléatoire qui doit être abordé comme un risque collectif.

10.1. Incidence de l'agriculture sur la ressource en eau

A l'échelle du territoire national, il est possible de donner un ordre de grandeur de la quantité d'eau restituée au milieu (drainage et ruissellement) : soit 360 mm, sachant que pour les 15 dernières années, les précipitations ont été en moyenne de 930 mm (avec un écart-type de 120 mm). Cette estimation, obtenue en supposant le sol uniformément couvert de prairie, est très proche de la règle classiquement enseignée : "**les deux tiers de la pluie servent, en moyenne annuelle, à l'évapotranspiration, le tiers restant s'en va à l'exutoire**". Bien entendu, cette règle ne correspond qu'à une moyenne à l'échelle du territoire et est susceptible de fortes variations à l'échelle locale en raison de la très forte hétérogénéité de la pluviométrie, des sols et de la profondeur exploitée par les racines.

Notons que tout essai de réduction de l'évapotranspiration, en jouant sur les propriétés de réduction de la transpiration des végétaux, aurait pour conséquence un réchauffement de la température de l'air en raison **du lien entre le bilan hydrique et le bilan énergétique de surface**. Pour une petite région comme la Crau, un écart de température de surface du sol de 20 à 25°C en juillet entre Crau sèche et Crau humide conduit à des écarts de température de l'air de l'ordre de 3°C. Ce lien physique entre sécheresse et canicule a contribué aux épisodes caniculaires marquants de 1976 et 2003.

Revenant au bilan hydrologique, dans les conditions réelles du milieu, l'échelle pertinente n'est pas l'échelle nationale mais bien **l'échelle du bassin versant**. Il n'y a pas de règle générale applicable pour préconiser des pratiques conduisant à telle ou telle valeur de restitution au milieu. Tout dépendra du **caractère endogène ou exogène de la ressource** en eau mobilisée. Pour l'illustrer, comparons deux régions françaises méridionales : le Sud-Est méditerranéen et le grand Sud-Ouest. C'est dans la première que le bilan Pluie – Evapotranspiration potentielle est le plus déficitaire et que l'irrigation à l'hectare est la plus forte (proche de 400 mm). C'est pourtant dans la seconde, où l'irrigation moyenne est inférieure de plus de moitié (environ 150 mm), que la question de la restitution au milieu est plus aiguë car, soit la ressource est totalement endogène (Charente-Poitou), soit les ressources exogènes aux zones cultivées (canal de la Neste en Midi-Pyrénées) sont plus modestes que celles apportées par le Rhône ou la Durance.

Ce point est important pour la mise en place de **négociations entre acteurs** : celles-ci doivent être conduites dans un **cadre contraint par des considérations d'ordre physique** qui résultent, à l'échelle du bassin versant, du croisement entre conditions climatiques, caractéristiques pédologiques, caractéristiques des réseaux hydrographiques, nature et importance des ressources en eau endogènes et exogènes.

La **restitution au milieu** s'exprime par : $D + R - I$, où D est le drainage vers les nappes, R le ruissellement et I l'irrigation. La relation entre ce terme et la totalité de la ressource (Pluie + ressources exogènes) que l'on souhaite atteindre est un préalable à toute étude ayant pour objectif de fixer des proportions de systèmes de culture dans le cadre d'accord de gestion volumétrique.

Si les ressources proviennent de nappes, on pourra raisonner la durabilité des pratiques par une **approche de type bilan de réservoir**. Le raisonnement sera pertinent à l'échelle annuelle car, pour descendre à une échelle temporelle plus fine, il faudrait disposer d'études hydrogéologiques tenant compte des temps de réponse des différents aquifères. Si les ressources proviennent de cours d'eau, le raisonnement ne pourra pas être tenu à l'échelle annuelle car le besoin d'irrigation est le plus fort au moment de l'étiage et de ce fait, c'est une **approche en termes de débit** et non plus de réservoir qu'il convient d'avoir.

Dans tous les cas, c'est bien sur un ensemble de systèmes de culture irrigués et pluviaux que le raisonnement doit porter. L'agriculture contribue en effet, via des systèmes de culture qui maintiennent le sol sans végétation active sur de longues périodes, à une réalimentation des nappes plus importante que celle résultant des surfaces

non cultivées comme la forêt et la prairie. L'agriculture n'est donc pas exclusivement une consommatrice d'eau. En valeur relative par rapport aux surfaces naturelles, elle couple les deux rôles de consommateur et de contributeur. Dans les débats à engager à l'échelle du bassin versant, il existe ainsi une **interdépendance de fait entre l'agriculture irriguée et l'agriculture pluviale**.

Aussi, pour aller plus loin dans des conclusions sur ce sujet, il faut engager des études mettant en œuvre des simulations sur des bases de données croisant sols x climat x systèmes de cultures à l'échelle des territoires au sein desquels se posent les problèmes de gestion de la ressource en eau.

10.2. Maintien et développement d'une production agricole en conditions de sécheresse

Ce thème conditionne le premier car pour inviter l'agriculteur à s'investir dans la préservation de la ressource, il faut pouvoir lui présenter des modes alternatifs de production qui lui permettent d'assurer un revenu à son exploitation et de maintenir sa capacité à cultiver.

L'expertise a exploré deux pistes : l'amélioration des espèces cultivées ou pâturées, la mise en place de systèmes de culture et d'élevage aptes à assurer une production rentable tout en étant plus économes en eau.

10.2.1. La voie génétique

Il est important de bien faire la **différence** entre les résultats concernant la **survie** et ceux concernant la **production**. Si la survie des plantes est essentielle (par exemple pour la reprise de végétation herbacée après la sécheresse), ce qui intéresse principalement l'agriculteur, c'est une plante continuant à produire en conditions de sécheresse. Or, il n'est **pas de production possible sans transpiration du végétal**. Toute réduction drastique de sa consommation d'eau aurait pour effet non seulement d'augmenter le risque de stress thermique en augmentant la température du végétal, mais aussi de pénaliser la photosynthèse en raison des communautés de processus entre les échanges d'eau et de gaz carbonique. La tolérance à la sécheresse consiste donc principalement à optimiser les échanges d'eau et de carbone, plus qu'à insérer des gènes intrinsèques de résistance comme dans le cas de la résistance aux herbicides ou de la survie des plantes à l'aridité. Des marges importantes de progrès existent pour cette optimisation dans nos conditions climatiques, **l'amélioration génétique vis-à-vis de l'efficacité de l'eau** (matière sèche formée par unité d'eau dépensée) n'ayant jusqu'ici été mise en œuvre avec efficacité que dans des conditions d'aridité (comme en Australie pour des précipitations annuelles inférieures à 500 mm).

La sélection génétique menée ces vingt dernières années a abouti à des progrès de production en conditions sèches. En particulier, la sélection chez le maïs a permis une réduction de sa sensibilité à la sécheresse pendant la floraison (période critique) en améliorant le maintien de la croissance reproductive en conditions sèches. On pourrait donc dès maintenant envisager une réduction de l'irrigation pendant cette phase.

Les voies d'amélioration pour l'avenir passent par **trois stratégies** :

- La stratégie d'**esquive** consiste à déplacer les cycles culturaux dans l'année pour que les plantes soient soumises à des demandes évaporatives plus faibles (variétés précoces ou à cycle court). La plus faible sensibilité aux déficits estivaux est cependant accompagnée d'une réduction du rendement potentiel par suite de la plus faible valeur du rayonnement intercepté et donc, de la photosynthèse.
- La stratégie d'**évitement** consiste à réduire la transpiration par une réduction de la croissance. On diminue ainsi le risque de perte totale de rendement mais la réduction des échanges gazeux qui accompagne la réduction de la croissance conduit là aussi à une réduction du rendement potentiel. L'augmentation de la vigueur racinaire participe de cette stratégie ; elle a un coût en termes de biomasse investie et ne se justifie qu'en sol profond.
- La stratégie la plus prometteuse actuellement consiste au contraire à essayer de **maintenir de façon raisonnée la croissance pendant les périodes de sécheresse, en privilégiant les organes essentiels** pour la production. Cette "reprogrammation" de la plante met en jeu les signalétiques de stress, les mécanismes de croissance et l'ensemble du métabolisme de la plante. Elle sollicite conjointement les domaines de compétence de la génétique, de la génomique et de la modélisation.

En conclusion, s'il ne faut pas attendre de "miracles" de la génétique pour obtenir une production abondante en situation de sécheresse, des marges de progrès existent pour conférer à des espèces existantes des caractéristiques de tolérance. Pour disposer d'évaluations fiables de la tolérance à la sécheresse de variétés existantes ou à venir, il serait souhaitable de **mettre en place des protocoles standards d'évaluation** dans le cadre d'essais conduits lors des tests préalables à l'inscription des variétés.

10.2.2. La voie des systèmes de culture

Les cultures fruitières étant le plus souvent irriguées et situées principalement dans le Sud-Est, région de ressources en eau exogènes et abondantes, nous nous concentrerons sur les systèmes de culture annuels et les fourrages.

Notons tout d'abord que **l'élevage est plus sensible à la sécheresse que l'agriculture *stricto sensu*** pour deux raisons :

- pour une même sécheresse, à une baisse de production du blé de 20% pourra correspondre une baisse de production fourragère de l'ordre de 50%,
- la consommation des animaux étant peu plastique sur une longue période, l'autoprotection est indispensable pour l'éleveur s'il ne veut pas "décapitaliser" en réduisant son cheptel.

Malgré son effet bénéfique sur le plan phytosanitaire, la sécheresse a, de façon générale, un **effet négatif sur la culture** : levée tardive et irrégulière, enracinement médiocre, mauvaise utilisation des engrais, surface foliaire moins développée. Il en résulte une **production inférieure en quantité** (nombre de grains, remplissage des grains), l'effet étant variable sur la qualité (baisse de teneur en huile des oléagineux mais augmentation en protéines du blé par exemple).

Les possibilités d'adaptation ne se réduisent pas à l'irrigation. Elles concernent également l'agriculture pluviale, qui occupe plus de 90% des surfaces cultivées et qui est très directement affectée par cette sécheresse. Ces **adaptations passent par des changements de systèmes de culture** ou de leurs parts relatives, et par des adaptations d'itinéraires techniques au sein de ces systèmes.

Les systèmes intrinsèquement les moins vulnérables sont les **systèmes à base de cultures d'hiver** qui font coïncider le parcours phénologique de la culture avec les périodes de plus forte ressource (pluie) et de plus faible demande (évapotranspiration potentielle moindre).

Pour ce qui concerne les cultures d'été, il existe des marges de manœuvre par la stratégie d'"esquive" évoquée plus haut, par le biais de **variétés précoces ou à cycle court**. Ceci étant, les pistes les plus intéressantes sont celles offertes par des espèces couplant l'évitement (meilleur enracinement et/ou surface foliaire moins développée) et des caractères de tolérance.

Les deux espèces qui ressortent clairement sont le tournesol et le sorgho, espèces qui ont fait conjonctuellement l'objet des adaptations déjà réalisées par les agriculteurs lorsque l'annonce de la sécheresse a pu être faite suffisamment tôt.

Le **tournesol** est connu pour sa teneur en huile et ses possibilités d'utilisation bioénergétique. Plante en C3, il a des variétés précoces qui, ajoutant l'esquive à l'évitement et à la tolérance, en font un excellent candidat à un assolement alternatif en situation de sécheresse. Il est toutefois handicapé aujourd'hui par son défaut de productivité et par la faible marge brute induite.

Le **sorgho** cumule plusieurs avantages : thermophile dans un contexte de réchauffement climatique, il peut être cultivé en pluvial. Lorsqu'il est irrigué, il a des besoins en eau nettement inférieurs à ceux du maïs et malgré une production inférieure à ce dernier, la marge brute qu'il dégage n'est pas très éloignée en raison de la plus faible part des charges associées à sa production. Ses débouchés (potentiels sinon actuels) existent dans l'alimentation animale (les élevages espagnols et américains y ont recours). Le principal problème pour le maintien de la marge brute en situation d'augmentation de la production réside dans la **nécessité de structuration de la filière**.

Qu'il s'agisse du tournesol ou du sorgho ou de toute autre culture présentant des caractéristiques voisines, le bénéfice attendu concerne aussi bien la production (système d'autoprotection en situation de pénurie d'eau tant en pluvial qu'en irrigué) que la ressource en eau. En effet, pour le tournesol, la consommation d'eau est antérieure à la période aiguë de pénurie et pour le sorgho, même irrigué, elle est inférieure à celle du maïs pendant la période estivale.

S'agissant des **itinéraires techniques**, l'adoption des techniques de l'aridoculture (travail du sol réduit, apport de fertilisants au semis, forte réduction de la densité de semis) n'est pas justifiée dans les situations de sécheresse que nous connaissons actuellement. Si ces techniques s'avèrent efficaces occasionnellement, les effets restent marginaux. Néanmoins, selon la disponibilité en irrigation, les doses d'intrants chimiques et minéraux doivent être adaptées au potentiel de rendement accessible.

L'essentiel des améliorations attendues des itinéraires techniques portent sur les **doses** et le **rythme des apports** d'irrigation. Il faut à ce propos distinguer clairement les situations d'irrigation à partir de cours d'eau, de nappes alluviales, de lacs ou de canaux, de celles effectuées à partir de nappes phréatiques. Dans le premier cas, les outils existants d'optimisation des apports trouvent leur pleine application dans une économie d'eau qui bénéficie à la fois à l'agriculteur, dans la mesure où elle optimise la surface irrigable à partir de volumes d'eau fixés, et aux autres usagers, dans la mesure où elle permet de réduire les débits de prélèvements pendant les périodes d'étiage. Dans le cas du pompage d'eau de nappes, sans négliger l'intérêt pour la qualité de l'eau d'une irrigation plus économe, l'incidence des doses d'eau sur la gestion de la ressource peut être moins problématique

puisque l'eau apportée éventuellement en excès retourne vers la nappe, dans un délai plus ou moins long cependant. Dans ce dernier cas, le maintien de la ressource en eau sur le long terme passe par le **couplage de l'optimisation des doses d'irrigation avec une action sur la répartition des différents systèmes de culture**.

Il n'existe **pas de règle générale pour répondre à la question du meilleur "panier" de systèmes de culture**. Le seul cadre pertinent à l'établissement d'une règle est le bassin versant, avec comme conditions déterminantes les réponses aux questions suivantes :

- quels sont la part et le mode d'utilisation des ressources en eau endogènes et des ressources exogènes ?
- quels sont les temps de réponse des aquifères mobilisés ?
- quels sont les temps de réponse des exutoires ?

Dans ce cadre, il est important d'insister sur le couplage des différents systèmes de culture au sein d'un même territoire à ressource en eau endogène : **la part et le type des systèmes pluviaux interviennent dans la gestion globale des ressources en eau** au niveau local, ce qui influe fortement sur les possibilités d'irrigation au niveau du bassin versant au même titre que la part et le type des différents systèmes irrigués (en irrigation totale ou en irrigation de complément).⁵

Pour chiffrer les bénéfices attendus de tel ou tel système pluvial sur le pourcentage allouable à des systèmes irrigués, il est nécessaire **d'entreprendre des études spécifiques** croisant les distributions **climat x sols x systèmes de culture**. Tout système de culture n'étant pas envisageable dans n'importe quel contexte pédoclimatique, l'établissement d'une base de données spatialisée sur les systèmes plausibles est un prérequis. Cela peut paraître lourd à mettre en œuvre, mais comment envisager d'engager des négociations entre acteurs sur des objectifs de gestion volumétrique sans se donner les bases physiques permettant de les atteindre ?

On peut conclure que retrouver une certaine **diversité dans les systèmes de culture** aurait un double intérêt :

- assurer une **autoprotection** de la production de l'agriculteur,
- permettre une **gestion améliorée de la ressource en eau**.

Pour cela, il est nécessaire d'assurer la rentabilité des systèmes alternatifs. Cela passe par des recherches de débouchés et des structurations de filières. C'est en effet parce que ces deux points ne sont pas pleinement satisfaits aujourd'hui que la diversification des systèmes de culture n'est souvent que conjoncturelle et disparaît une fois la situation apparemment redevenue normale.

10.3. Les voies d'action économique et politique

L'agriculteur et l'éleveur sont les premières victimes de la sécheresse puisque l'agriculture non irriguée représente plus de 90% de la SAU. Aider l'agriculture à s'adapter, c'est lui permettre d'être rentable tout en veillant à la meilleure utilisation collective de l'eau, en partageant de façon non conflictuelle la ressource en eau avec les autres acteurs de la société.

L'action publique peut envisager trois directions :

- l'augmentation de la ressource, ajustant l'offre à la demande,
- l'économie d'eau, ajustant la demande à l'offre,
- l'action compensatoire a posteriori via l'assurance publique ou privée.

Les deux premières ne sont pas mutuellement exclusives et peuvent être complémentaires. La construction de priorités entre elles ne peut s'envisager qu'à l'échelle territoriale par un croisement des caractéristiques du milieu et des spécificités territoriales et économiques de l'activité agricole.

A/ L'augmentation de la ressource par les barrages correspond à la vision traditionnelle de l'aménageur. Elle n'est pas du ressort de cette expertise, le Ministre de l'agriculture ayant demandé une étude parallèle sur le sujet. S'agissant des retenues collinaires, il est nécessaire d'établir au cas par cas la relation entre leur intérêt pour la production et deux points critiques :

- l'effet potentiel de l'augmentation de demande consécutive à l'augmentation de l'offre, reportant le problème à la prochaine sécheresse,
- les éventuels problèmes écologiques associés et, dans certains cas, les problèmes de sécurité pour les populations situées en aval.

B/ L'action de compensation a posteriori, conduite au travers des indemnités versées par la commission des calamités agricoles ne relève pas de ce travail qui s'intéresse à l'adaptation structurelle possible à un événement circonstanciel mais récurrent. L'assurance privée constitue une option intéressante en cours de développement aujourd'hui. Elle ne saurait toutefois se substituer entièrement au fonds de calamités agricoles car son coût pour l'agriculteur est lié à la récurrence du phénomène et, surtout, nous n'avons pas affaire ici à un phénomène spatialement distribué comme dans le cas de la grêle et du gel. En effet, la sécheresse est fortement corrélée

⁵ Le raisonnement ne s'applique pas aux territoires à ressources en eau exogènes (grosso modo ceux desservis par les SAR - SCP, BRL, CACG), puisqu'il y a découplage entre agriculture irriguée et agriculture pluviale.

dans l'espace et cela se traduit par un coût d'indemnités élevé. Se pose alors le **problème de la réassurance**. En Espagne et aux Etats-Unis, c'est l'Etat qui prend à sa charge la plus grande partie du coût de la réassurance. L'implication des pouvoirs publics dans la réassurance en France passe par une négociation avec les assureurs et leurs réassureurs. Dans ce contexte, l'Etat doit tenter d'éviter d'alourdir sa charge financière, le développement inégal de l'assurance privée ne lui permettant pas d'abandonner entièrement son rôle d'assureur en dernier ressort au travers des fonds de calamités agricoles.

C/ Reste la troisième voie, celle de l'**ajustement de la demande à l'offre**. C'est sur ce point que nous avons porté notre attention pour identifier des marges de progrès, sans exclusive vis-à-vis de l'intérêt des autres voies d'action possible.

La première façon d'envisager une action de l'Etat dans cette direction serait de **ne pas favoriser la pratique de l'irrigation**. Le choix fait par la France, dans le cadre de la PAC avant 2003, de différencier les aides aux cultures irriguées a certainement contribué à l'accroissement de l'irrigation constaté entre 1994 et 2000. Inversement, le "découplage" à 75%, adopté en 2003 et entré en vigueur cette année, devrait contribuer à la baisse des surfaces irriguées.

La deuxième façon de diminuer la consommation en eau est le mode coercitif correspondant aux **arrêtés préfectoraux**. Il a un double inconvénient :

- un effet pénalisant fort pour les agriculteurs s'ils sont obligés d'interrompre l'irrigation à des périodes cruciales pour leur(s) culture(s). A ce propos, les agriculteurs apprécient les annonces précoces de sécheresse qui permettent de changer de cultures à temps, avec des pertes nettement inférieures à celles pouvant résulter des interdictions insuffisamment anticipées ;
- le fait de confier à une procédure, destinée à gérer des situations de crise, la mission de régler des conflits d'usage liés structurellement à des déséquilibres entre demandes et disponibilités du milieu en été. A cette gestion "à chaud" des problèmes devrait se substituer un traitement "à froid" conçu comme une recherche de solutions durables aux problèmes d'équilibre entre l'offre et la demande.

La troisième façon de réguler la consommation est la **tarification de l'eau**. Elle se justifie en particulier dans des situations de fort individualisme des irrigants, lorsque ceux-ci sont peu conscients des enjeux locaux de partage de l'eau à l'échelle du territoire. Elle peut avoir un impact très négatif à court terme si elle se cumule avec des pertes de revenu liées aux restrictions d'irrigation. Conçue sur le long terme, en revanche, elle a un rôle important à jouer dans le raisonnement des choix de systèmes de culture sur une base de rentabilité relative. L'objectif d'une telle tarification fixée à un niveau modéré, serait de fonctionner comme un **signal de rareté locale** de la ressource pour l'irrigant. La prise en compte de ce signal en amont des décisions d'équipement de périmètres et d'orientations culturales devrait ainsi permettre d'éviter des choix non viables au regard des possibilités hydriques du milieu. Des systèmes tarifaires plus élaborés pourraient permettre de moduler ce signal en fonction de la rareté de la ressource. De tels systèmes ne seront de toute manière acceptables pour les agriculteurs que dans le cadre d'une négociation et d'un effort important de communication et de transparence en direction des acteurs agricoles. Les règles tarifaires devraient être établies suffisamment tôt avant la campagne pour que les irrigants puissent les prendre en compte dans leurs choix d'assolement. L'expérience étrangère montre de nombreuses tentatives de mise en place de systèmes de **marchés de droits d'eau** (quotas transférables). Le bilan de ces expériences apparaît assez contrasté même s'il a permis certaines améliorations de la situation dans divers pays. De telles expériences "libérales" semblent aujourd'hui encore peu transposables à notre pays, de tradition juridique et politique très différente.

Une hypothèse de progrès réaliste à court terme consiste, dans le cadre d'une démarche d'accompagnement et de conseil, à favoriser la mise en place d'**accords de gestion volumétrique de l'eau**, à l'échelle du bassin versant, négociés entre parties prenantes sous les auspices de l'Etat. A l'inverse de la tarification qui vise à influencer les comportements opportunistes individuels des irrigants, cette démarche cherche à développer la **solidarité** des acteurs face à un problème commun, solidarité des irrigants entre eux comme avec les autres usagers de la ressource. A cet effet, il est important :

- de **favoriser la mise en place d'organisations d'irrigants** comme il en existe déjà chez nous et chez nos voisins espagnols ;
- de **fonder les accords sur des bases techniques** plus pertinentes comme support aux décisions politiques ou collectives. Ces bases biologiques et physiques reposent sur la notion de "restitution au milieu" développée précédemment. Cette restitution au milieu est beaucoup plus dépendante du jeu de systèmes de culture mis en place, irrigués et non irrigués, que d'éventuelles avancées biotechniques en raison du double lien entre bilan d'eau et de carbone et entre bilan d'eau et d'énergie.

En résumé, il nous paraît important de :

- **passer d'une action a posteriori à une action a priori**,
- passer d'une action conjoncturelle d'ajustement (interdiction d'arroser, dérogation obtenue de l'UE pour pâturer des jachères...) à une **action structurelle** : gestion volumétrique négociée sur des bases politiques **et** physiques.

Pour cela, les pouvoirs publics pourraient :

- commanditer les **études nécessaires** à l'établissement de bilans hydriques de bassins versants à partir des croisements sols x climats x systèmes de culture,
- travailler avec **les organismes de développement et les agriculteurs** sur le principe d'autoprotection : un "panier" de systèmes de culture peut rapporter un peu moins qu'une monoculture irriguée en année normale mais éviter de fortes pertes en année exceptionnelle,
- veiller à la **sécurisation des filières** susceptibles d'offrir des débouchés rentables aux systèmes de culture alternatifs proposés,
- faire évoluer l'appareil législatif en levant les difficultés réglementaires et juridiques afin de **favoriser la mise en place de gestions volumétriques concertées**.

10.4. Besoins de recherche

Les bases physiques existent pour traiter la question de l'incidence des systèmes de culture et des itinéraires techniques associés sur le **bilan hydrique** à l'échelle de la parcelle. En revanche, pour les bassins versants d'ordre 2 et plus, on ne peut à l'heure actuelle que déterminer une incidence globale à l'échelle annuelle des croisements climats x sols x systèmes de culture en cumulant les effets à l'échelle parcellaire. Il est donc important de **poursuivre l'effort entrepris en hydrologie et en hydrogéologie** pour atteindre une véritable **intégration spatio-temporelle** du phénomène à l'échelle appropriée.

Dans le domaine de la **génétique**, en sus des travaux sur l'"esquive" et l'"évitement", il faudrait **appuyer les travaux entrepris sur la "reprogrammation"** pour obtenir dans le domaine de la production des résultats aussi importants que ceux obtenus sur la survie des plantes en conditions sèches.

En **écophysiologie**, un meilleur couplage des connaissances et des modèles de réaction des plantes avec les études génétiques et génomiques est une condition nécessaire à la réussite de celles-ci pour les principales plantes d'intérêt agronomique. L'évaluation écophysiologique du progrès génétique pour des espèces comme le maïs, le sorgho et le tournesol permettrait d'en connaître l'état actuel et, éventuellement, d'adapter les techniques aux cultivars concernés. Il serait, de plus, utile de "renseigner" les caractéristiques écophysiologiques des espèces bioénergétiques les moins classiquement étudiées (myscanthus, canne de Provence...) susceptibles d'intégrer des systèmes de culture alternatifs. De même serait-il nécessaire de **renforcer les études concernant les prairies** (potentialité de reprise et évolution de la biodiversité après la sécheresse).

Concernant **les systèmes de culture**, nous avons vu que les **situations de transition** entre aridoculture et culture pluviale en zone tempérée sont les plus difficiles à appréhender et les moins documentées. **L'effort engagé** par les instituts de recherche et les instituts techniques opérant conjointement dans le Sud-Ouest sur ce sujet **doit être poursuivi**. Il doit être soutenu par les atmosphériciens dans une recherche **d'amélioration des modèles météorologiques à moyen terme permettant une optimisation du choix des cultures d'été** dans le cadre de systèmes de culture en place. Il doit être accompagné d'une amélioration des prévisions à plus long terme concernant le **changement climatique sur le poste "pluviométrie"** dans les régions méridionales concernées afin **d'optimiser la part respective des assolements de cultures d'hiver et d'été** dans les systèmes de culture à mettre en place.

Enfin, concernant l'économie, un important besoin d'études apparaît au niveau de la micro-économie, tant au niveau de la **micro-économie des exploitations** qu'à des échelles plus vastes dans notre pays. Ces études devraient porter en priorité sur la connaissance des coûts et des bénéfices de l'irrigation et, plus généralement sur la **maîtrise économique des choix de systèmes de culture** et d'équipements techniques des périmètres irrigués. Elles devraient ensuite être étendues à la **gestion intégrée de l'utilisation de l'eau** par l'agriculture à l'échelle des bassins versants. Il sera en effet de plus en plus difficile de concevoir l'économie de l'irrigation sans s'interroger sur la place de l'irrigation vis-à-vis des autres usages de l'eau.

Répondre aux attentes des gestionnaires et des responsables de la politique de l'eau dans le contexte de la mise en place de la Directive cadre sur l'eau passe par la construction d'un savoir-faire adapté en matière d'analyses socio-économiques. Ces besoins de savoir-faire s'étendent de la conception de méthodologies adaptées à la mise à disposition des gestionnaires d'outils d'appui opérationnels tant pour leurs décisions que pour l'organisation de la concertation avec l'ensemble des utilisateurs de la ressource. Ils passent aussi par les produits de l'analyse de dispositifs d'acteurs et la réflexion socio-politique ou juridique.

Expertise scientifique collective "Sécheresse et agriculture"

Cadrage de l'expertise

En concertation avec le Ministère chargé de l'agriculture, l'INRA a exploré quel pourrait être le champ d'une expertise scientifique collective sur la question générale : "Comment l'agriculture peut-elle s'adapter à la raréfaction possible de la ressource en eau et au risque d'épisodes de sécheresse plus fréquents ?". Cette réflexion commune a abouti à retenir le périmètre du questionnement et sa structuration qui suivent, et qui définissent les termes de la commande.

Quatre catégories de questions pourraient être traitées :

1. Quel est le rôle de l'agriculture dans le cycle hydrologique ?

Quel est le bilan hydrique au niveau national ? Comment est-il influencé, à l'échelle de la région, par les choix de systèmes de culture et de production ? Comment peut-il être modifié par des changements d'utilisation des terres, par une évolution possible du climat ?

Quels sont les acteurs du cycle de l'eau, la place du secteur agricole, les conflits entre usages concurrents de l'eau ? Quelle est l'efficacité et la valorisation de l'eau consommée par l'agriculture ?

2. Quelle est la sensibilité des productions agricoles au manque d'eau ?

Quelle est la réaction des plantes à la sécheresse ? Quelle est la sensibilité des systèmes de culture, irrigués ou non, et des systèmes de production végétale et/ou d'élevage ? Quelles ont été les incidences techniques et économiques des sécheresses passées sur les principaux systèmes de production ?

3. Quelles sont les possibilités et perspectives de maîtrise de la vulnérabilité des systèmes de culture et de production ?

Quelles sont les options techniques (et les marges de manœuvre qu'elles peuvent apporter) : choix d'espèces et diversification des productions, amélioration génétique et choix variétal, modification des itinéraires techniques, gestion stratégique de la ressource en eau et pilotage de l'irrigation, stratégies de conduite des troupeaux et stocks fourragers... ? Quel est le degré d'adaptabilité des différents systèmes de production et leur prise en compte des risques ?

4. Quelles politiques publiques peuvent favoriser une meilleure adaptation de l'agriculture à un risque croissant de sécheresse ?

Quelles sont les différentes stratégies, publiques ou privées, d'adaptation à ce risque ?" Quels peuvent être les effets des évolutions du contexte économique (PAC...), le rôle de l'Etat ? Quelles sont les options envisageables (assurance-sécheresse, aménagement d'infrastructures, incitations à l'adaptation des systèmes de production, évolution des règles d'arbitrage entre usages concurrents) ? Quelles sont la pertinence et la souplesse de ces différentes options ?

NB : Le champ de l'expertise est restreint au territoire métropolitain et exclut le domaine forestier (qui fait l'objet d'une autre expertise) ainsi que la question des régimes d'écoulement (crues et catastrophes). Les questions relatives à la qualité des eaux (pollutions), à la canicule et au changement climatique en général, aux impacts environnementaux du régime des cours d'eau (étiages), aux grands aménagements hydrauliques ne seront pas traitées; seules leurs interactions avec les phénomènes de sécheresse pourront être mentionnées. Enfin, la question de l'impact possible des modifications de productions envisagées sur l'organisation des filières agricoles ne sera pas développée.

L'objectif de l'expertise n'est pas de fournir aux gestionnaires des mesures standardisées de gestion tactique en période de sécheresse, mais de leur donner un état des connaissances permettant de raisonner des choix.

L'Expertise scientifique collective

Eléments de méthode

1. Définition et organisation de l'exercice

L'expertise scientifique collective (ESCo) est une activité d'appui à la décision publique : l'exercice consiste à répondre à une question complexe posée par un commanditaire extérieur en établissant, sur la base de la bibliographie mondiale, un état des connaissances scientifiques pluridisciplinaires qui fait la part des acquis, incertitudes, lacunes et controverses du savoir actuel.

L'ESCo est une activité organisée à l'INRA depuis 2002. Elle s'exerce selon des règles qui visent à en assurer la crédibilité. L'Institut s'engage sur les conditions dans lesquelles l'exercice est réalisé (exhaustivité des sources documentaires, qualification et indépendance des experts, transparence du processus). Les experts sont responsables de leurs contributions. L'ESCo ne formule ni avis ni recommandations.

. Le comité de pilotage

Ce comité, dont les membres sont désignés par le commanditaire, valide la lettre de commande, puis se réunit deux ou trois fois au cours du travail pour examiner la conformité des orientations prises par rapport au cahier des charges, faire état éventuellement de nouveaux éléments du contexte réglementaire et politique utiles pour le cadrage du travail en cours. Il est tenu en retour informé de la progression du travail, des difficultés éventuelles rencontrées par les experts dans le traitement des questions, dues notamment à l'absence de références bibliographiques. Le comité est réuni en fin d'expertise pour la présentation des conclusions ; c'est à partir de ce séminaire de restitution que peut être établie la version finale de la synthèse.

. Le collectif d'experts

L'ESCo est réalisée par un collectif d'experts (cf. infra) de disciplines différentes, requises par les besoins de l'expertise. Ce groupe d'une vingtaine de chercheurs est subdivisé en sous-groupes de travail pour les phases d'analyse de la bibliographie et de rédaction des chapitres du rapport ; il peut faire appel à des compétences situées en dehors du groupe.

Pour chaque dossier d'ESCo, un pilote scientifique est désigné par la Direction scientifique de l'INRA concernée. Il s'agit d'un chercheur expérimenté, reconnu pour sa compétence et sa vision large du problème posé, capable de mobiliser des experts dans la durée et d'animer le collectif travail.

Le travail des experts dure environ un an à compter de l'accord sur le cadrage de l'expertise.

Rapport et synthèse sont soumis à relecture par deux reviewers extérieurs.

Une unité INRA est dédiée à l'appui à l'ESCo : elle a pour mission de faciliter et d'organiser le travail des experts, et, à travers des retours d'expériences et des échanges avec d'autres organismes pratiquant l'expertise, de mettre en place des procédures reproductibles. Dotée de compétences en conduite de projets, documentation, rédaction scientifique, secrétariat et gestion, cette unité assure l'organisation logistique de l'ESCo, participe à l'animation des réunions et est chargée de l'élaboration des produits de synthèse.

. Les produits de l'ESCo

Le travail des experts se traduit par le rendu (sous forme électronique) d'un rapport de plusieurs centaines de pages et l'édition d'une "synthèse" destinée plus particulièrement aux décideurs ; ces documents sont également mis en ligne sur le site web de l'INRA.

La Synthèse reprend les grandes lignes du rapport d'expertise, dans la perspective d'utilisation des connaissances qui a motivé la commande de l'expertise. L'exercice peut conduire à aller un peu plus loin que ne le fait le rapport dans l'interprétation des conclusions scientifiques et dans leur mise en relation avec des éléments du contexte économique ou politique qui, n'étant pas objets de recherches, n'ont pas été pris en compte dans l'analyse scientifique.

Un colloque ouvert à un public élargi permet une mise en débat des conclusions de l'expertise.

2. Les experts participant à l'ESCO

L'ESCO étant définie comme analyse critique des connaissances académiques disponibles, le choix des experts se fonde en priorité sur leurs compétences scientifiques, attestées par leurs publications dans des revues à comité de lecture et la reconnaissance par leurs pairs. Puisque l'exercice ne consiste pas à formuler des avis "à dire d'experts" mais à réaliser une analyse de la bibliographie, il peut être demandé aux experts d'examiner des publications qui ne relèvent pas entièrement de leur champ de compétence principal.

Des critères complémentaires peuvent intervenir dans la "qualification" des experts : exercice de responsabilités dans la hiérarchie scientifique et/ou de fonction d'animation dans des programmes de recherche français ou européens (donnant une vision large des travaux de recherche en cours) ; participation à des comités d'experts tels que des groupes de travail ministériels ou des comités scientifiques chargés de l'évaluation de divers projets (perception des enjeux socio-économiques et politiques, des préoccupations des gestionnaires...), bonne connaissance du "terrain"...

Cette logique de recrutement des experts fondée principalement sur leur compétence scientifique et non leur connaissance du terrain est à souligner, dans la mesure où il s'agit d'une source récurrente de malentendus lors de la publication des ESCo.

Afin d'assurer une diversité des "cultures" scientifiques et techniques, et de renforcer la crédibilité de l'expertise (indépendance des experts par rapport à la direction de l'INRA et aux tutelles), l'objectif retenu par l'ESCO est d'environ 30% d'experts n'appartenant pas à l'INRA. Sur les 25 experts formant le collectif de travail et les 2 relecteurs (cf. page 3 de couverture), 8 appartiennent à l'un des organismes suivants : Cemagref, CNRS, ENGREF, Météo-France, Université. Plus d'une douzaine d'autres chercheurs que ceux appartenant au collectif ont été sollicités pour apporter ponctuellement leur contribution sur un thème particulier.

3. Documentation et recherche bibliographique

. Utilisation de la bibliographie scientifique dans l'expertise scientifique collective

La place centrale de la bibliographie scientifique

Par définition de l'exercice, l'ESCO est fondée sur l'analyse critique des publications scientifiques internationales, figurant dans les bases de données mondiales (CAB, Web of science...). Elle se distingue donc des exercices "à dire d'experts", pour lesquels lesdits experts mobilisent des connaissances préalables pour formuler un diagnostic de la situation et, souvent, des avis ou recommandations. Dans l'ESCO, l'origine des connaissances mobilisées doit être explicitée et vérifiable.

Si les chercheurs sont réputés bien connaître la bibliographie scientifique dans leur domaine d'activité, l'ESCO leur demande souvent d'élargir quelque peu ce champ, sur le plan thématique, ou vers des questions plus proches de l'application des connaissances à la gestion de problèmes concrets. Les experts doivent donc disposer de références bibliographiques complémentaires de celles dont ils disposent déjà.

Enfin, l'ESCO se doit de tendre vers l'exhaustivité des sources, qui ne peut être attestée que par une recherche systématique dans les bases de données qui font référence.

Les étapes de constitution du corpus documentaire scientifique

Le champ retenu pour les expertises étant souvent vaste, une recherche initiale très générale dans les bases de données internationales conduit dans un premier temps à établir un état des lieux du périmètre et des principales thématiques du sujet. Il faut donc ensuite circonscrire le sujet, et affiner les interrogations par des mots-clés mieux ciblés, afin de cribler les données pertinentes pour traiter les questions posées. Des itérations sont nécessaires tout au long du travail pour constituer le corpus analysé : interrogations initiales assez générales des bases de données par les documentalistes de l'INRA, analyse critique des résultats avec le(s) expert(s) concerné(s), ajustements des mots-clés et équations de recherche, recherches complémentaires demandées par les experts durant tout l'exercice... Le corpus final n'est donc constitué qu'à la fin du travail.

L'élargissement des sources documentaires

Certains points, concernant par exemple la situation agricole française ou la gestion de l'eau mise en oeuvre sur le terrain, ne faisant pas l'objet de recherches et donc de publications scientifiques, il s'avère nécessaire de compléter les publications académiques par de la "littérature grise", et de rechercher certaines données statistiques brutes. Des rapports institutionnels (parlementaires, européens), études de cas, articles techniques, bulletins de conjoncture, publications émanant d'associations, sont ainsi repérés (sans prétention à l'exhaustivité) et mis à la disposition des experts. Il leur revient de prendre en compte, ou non, ces sources non validées par les circuits académiques, selon l'intérêt et la qualité des informations qu'ils leur reconnaissent (jugement professionnel). Enfin, une veille dans les médias (revues de presse, sites spécialisés sur internet) permet de suivre l'actualité du thème (évolution de la situation hydrologique 2006...) et sa traduction sociale.

Le statut des listes bibliographiques figurant dans le rapport

Dans leurs contributions écrites, les experts ne citent que les publications dont ils utilisent effectivement les informations. Se trouvent ainsi exclues de la liste finale des références les articles jugés finalement moins pertinents par rapport au sujet, obsolètes ou redondants... Afin de ne pas trop alourdir cette liste finale, qui doit

rester "maniable" pour les futurs utilisateurs de cette base d'informations, il est demandé aux experts de limiter ces citations concernant les rappels théoriques et les analyses consensuelles, et de mettre l'accent sur les points encore controversés et/ou peu renseignés à l'heure actuelle.

. Les principales bases de données utilisées

Les recherches bibliographiques ont été réalisées en interrogeant les bases de données suivantes :

. **Web of Science** : produite par Thomson Scientific (ex-ISI), c'est "la" base de référence des milieux scientifiques du monde entier ; elle couvre toutes les disciplines en sciences et sciences sociales et permet de répondre aux interrogations traversant plusieurs champs disciplinaires et à celles menées aux interfaces entre les disciplines.

. **CAB Abstracts** : produite par CABI Publishing (Commonwealth Agricultural Bureaux), cette base spécialisée contient 4,5 millions de références dans le domaine des sciences agronomiques et fait donc référence dans ce domaine. Elle analyse essentiellement des revues scientifiques, certaines revues importantes en technique et développement, ainsi que des ouvrages, thèses ou actes de congrès.

. **EconLit** : cette base produite par l'American Economic Association est une banque bibliographique qui couvre tout le domaine économique. Elle recense les articles de périodiques, monographies, chapitres de volumes collectifs, comptes rendus de congrès, thèses, travaux de recherche ("working papers").

. **Bases de publications institutionnelles et bases de données spécialisées** : PUBINRA, base de données bibliographique recensant les publications des chercheurs de l'INRA ; BDESR, base produite par le département *Sciences sociales, agriculture et alimentation, espace et environnement* (SAE2) de l'INRA ; Cemagref-publications (base des publications scientifiques ou techniques des ingénieurs-chercheurs du Cemagref) ; service de documentation du CETIOM ; banque climatologique de Météo-France ; base documentaire (Eaudoc) et service de veille électronique de l'Office International de l'Eau (OIEau).

. Les références bibliographiques utilisées par les experts

Sur un total de 3 000 références bibliographiques proposées aux experts, près de 700 figurent dans la liste finale des références utilisées.

Parmi ces références citées :

- 54% correspondent à des articles publiés dans des revues scientifiques internationales,
- 16% se réfèrent à des ouvrages scientifiques ou des chapitres d'ouvrages scientifiques,
- 13% correspondent à des articles publiés dans des revues techniques,
- 9% ont fait l'objet de communication lors de colloques internationaux (à visée scientifique) ou lors de journées techniques ou de vulgarisation,
- 8% se réfèrent à des rapports institutionnels (Communauté européenne, ministères...).

Ces chiffres confirment le caractère scientifique de l'expertise réalisée. Il est à noter toutefois que le pourcentage d'articles scientifiques varie, de 25% à 97%, en fonction des sections de chapitres.

Enfin, les experts se sont référés à des travaux scientifiques récents, 45% des références citées ayant été publiées entre 2001-2006.

AUTEURS ET EDITEURS DE L'EXPERTISE

► Experts

Responsable de la coordination scientifique

Bernard ITIER, DR, INRA-EA Grignon et Montpellier : Bioclimatologie, micrométéorologie, stress hydrique

Auteurs et contributeurs

Sophie ALLAIN, CR*, INRA-SAD° Paris : Politiques publiques, débat public, eau et régulation territoriale

Jean-Pierre AMIGUES**, DR*, INRA-SAE2 Toulouse : Economie des usages de la ressource en eau et des milieux

Bernard BARRAQUE, DR, CNRS/Ecole nationale des Ponts et Chaussées Marne-la-Vallée : Politique publique de l'eau

Nadine BRISSON, DR, INRA-EA Avignon : Modélisation agroclimatique et fonctionnement des cultures

Emmanuel CLOPPET, Météo-France Toulouse : Agrométéorologie, changement climatique

Stéphane COUTURE, CR, INRA-SAE2 Nancy : Systèmes d'assurance

Pierre CRUIZIAT, DR (en retraite), INRA-EA Clermont-Ferrand : Fonctionnement hydrique des plantes

Philippe DEBAEKE, DR, INRA-EA Toulouse : Systèmes de grande culture

Isabelle DOUSSAN, CR, Université de Nice, Sophia-Antipolis : Droit de l'environnement

Michel DURU, DR, INRA-EA Toulouse : Systèmes herbagers, fonctionnement des peuplements prairiaux

Christian GARY, DR, INRA-EA Montpellier : Fonctionnement hydrique des systèmes de culture, vigne

Stéphane GHIOTTI, CR, CNRS Montpellier : Géographie, gestion de l'eau, politiques territoriales

Frédéric HUARD, IE*, INRA-EA Avignon : Agrométéorologie, simulations

Bernard ITIER, DR, INRA-EA Grignon et Montpellier : Bioclimatologie, micrométéorologie, stress hydrique

Delphine LEENHARDT, CR, INRA-EA Toulouse : Modélisation, gestion de l'eau, aménagements

Gilles LEMAIRE, DR, INRA-EA Lusignan : Ecophysiologie, fonctionnement des peuplements prairiaux

Jean-Claude MAILHOL, Cemagref Montpellier : Systèmes irrigués, pilotage de l'irrigation

Francisco MARTIN DE SANTA OLALLA MAÑAS, Professeur d'Université, Université de Castilla de la Mancha (UCLA) : Irrigation, gestion de l'eau, conduite de projets intégrés

Didier MICOL, IR*, INRA-PHASE Clermont-Ferrand : Systèmes d'élevage, qualité des produits et modélisation des performances

Arnaud REYNAUD, CR, INRA-SAE2 Toulouse : Econométrie, gestion de la ressource en eau, risques

Bernard SEGUIN, DR, INRA-EA Avignon : Bioclimatologie, télédétection, changement climatique

François TARDIEU, DR, INRA-EA Montpellier : Ecophysiologie et génétique des plantes sous stress environnementaux

Alban THOMAS, DR, INRA-SAE2 Toulouse : Econométrie, régulation environnementale, usage et tarification de l'eau

Eugène TRIBOÏ, DR, INRA-EA Clermont-Ferrand : Qualité des graines

Michel ZIVY, CR, CNRS Gif-sur-Yvette : Génomique, protéomique, réponse au déficit hydrique

Cette liste n'intègre pas les chercheurs qui ont pu être sollicités (par l'un des experts ci-dessus) pour contribuer ponctuellement à la rédaction d'une section du rapport, mais n'ont pas participé au travail collectif. Ces chercheurs sont cités dans les contributions écrites auxquelles ils ont apporté leur concours.

Relecteurs

Nader KATERJI, DR, INRA-EA Grignon : Relations eau-agriculture, réponse des plantes au stress hydrique

Thierry RIEU, Directeur de l'ENGREF Montpellier, Chef du département Eau : Economie de l'irrigation

► Unité Expertise scientifique collective (UESCo) de l'INRA

Annie CHARTIER, IR, INRA Versailles : Ingénierie documentaire

Claire SABBAGH, IR, INRA PARIS : Direction de l'Unité, management de l'ESCo

Isabelle SAVINI, IE, INRA Paris : Rédaction et coordination éditoriale

* CR : Chargé de recherche ; DR : Directeur de recherche ; IE : Ingénieur d'étude ; IR : Ingénieur de recherche.

° Départements de recherche INRA : EA : Environnement et agronomie ; PHASE : Physiologie animale et systèmes d'élevage ;

SAD : Sciences pour l'action et développement ; SAE2 : Sciences sociales, agriculture et alimentation, environnement et espace.

** En gras : experts coordinateurs de parties du rapport.



INSTITUT NATIONAL DE LA RECHERCHE AGRONOMIQUE

147, rue de l'Université • 75338 Paris cedex 07

Tél : + 33(0)1 42 75 90 00 • Fax : + 33(0)1 47 05 99 66

www.inra.fr