



# Carrefours

de l'innovation  
agronomique  
2008

Productions végétales  
et sécheresse

Vendredi 6 juin 2008



ALIMENTATION  
AGRICULTURE  
ENVIRONNEMENT

INRA

## Agriculture et sécheresse : le contexte et les enjeux

Bernard Itier

INRA, UMR Environnement et Grandes Cultures, 78850 Thiverval-Grignon

La répétition de sécheresses au cours de trois années successives du début du siècle (2003, 2004 et 2005) a eu pour conséquence de poser la question de la « durabilité » de l'agriculture actuelle. En effet, ces sécheresses n'étaient plus perçues comme des événements exceptionnels (ça avait été le cas de la sécheresse de 1976) mais comme une manifestation possible du « changement climatique » en cours. Cette « durabilité » de l'agriculture s'entend de deux façons :

- en interne : quelles cultures peut-on conduire sous notre climat avec la ressource en eau disponible aujourd'hui et demain ?
- en externe : quelle est l'action de l'agriculture sur cette ressource en eau, en quantité et plus seulement en qualité, dans un contexte de concurrence pour son usage ?

Après ces trois années de sécheresse, la deuxième question présentait un aspect aigu dans la presse dans la mesure où, même si l'agriculture dans son ensemble est la première victime de la sécheresse (rappelons que l'agriculture pluviale constitue 93% de la S.A.U. nationale), l'opinion publique est fortement sensible à la consommation d'eau d'irrigation pendant la pénurie estivale.

La nécessité de faire le point sur cette double question a conduit à engager une expertise collective, commanditée par le MAP, pilotée par l'INRA et associant 27 experts de plusieurs organismes (Cf. Amigues et al. 2006). Cette expertise a été restituée en public en octobre 2006 après avoir fait l'objet de présentations devant les porteurs d'enjeux agricoles et environnementaux.

Mon propos aujourd'hui ne consiste pas à répéter de façon exhaustive ce qui peut être lu dans le rapport. Il consistera à :

- faire le point sur la sécheresse
- situer les exposés à venir sur la question du maintien d'une agriculture dépendante de la ressource en eau
- développer la question de l'incidence de l'agriculture sur la ressource en eau (en quantité), en esquisant une typologie de situations permettant de débattre de l'intérêt de l'amélioration des pratiques et du choix des systèmes de cultures. Ces éléments sont nécessaires à la mise en œuvre de la gestion quantitative prévue par la loi sur l'eau de décembre 2006. Ils s'inscrivent dans la panoplie d'outils nécessaires à la profession agricole pour aborder la gestion collective prévue par le « Grenelle de l'environnement » qui affiche « l'adaptation des prélèvements en ressource » comme un des quatre objectifs majeurs sur l'eau dans la loi en cours d'élaboration.

### 1. La sécheresse aujourd'hui et demain

Faisons tout d'abord la différence entre la sécheresse et l'aridité.

On parle de sécheresse lorsque la pluviométrie est inférieure à la normale. Il s'agit d'un épisode délimité dans le temps et dans l'espace. On parle d'aridité lorsque la pluviométrie est inférieure, de façon systématique, à un seuil de l'ordre de 500 mm. La pluviométrie moyenne étant en France supérieure à 900 mm, nous ne sommes pas concernés par l'aridité. Au passage, la conduite de systèmes de cultures

en conditions d'aridité est techniquement plus aisée que celle de systèmes faisant face à des sécheresses aléatoires.

Les sécheresses peuvent être classées en deux grandes catégories :

- la sécheresse hydrologique lorsque les pluies d'automne et d'hiver sont insuffisantes. Cette sécheresse affecte l'agriculture irriguée dans la mesure où les « réservoirs » d'eau d'irrigation ne sont pas remplis.
- La sécheresse édaphique, lorsque les pluies de printemps et d'été sont insuffisantes pour assurer un remplissage correct du réservoir d'eau du sol (appelé « réserve utile ») pendant la saison de végétation. Cette sécheresse concerne surtout l'agriculture pluviale mais affecte aussi l'agriculture irriguée.

De 1976 à 2005, le territoire français a été concerné, sur une de ses régions, par 13 épisodes de sécheresse, dont 2 purement hydrologiques, 6 édaphiques et 5 sécheresses combinées. Cela correspond grosso modo à l'occurrence d'une sécheresse, 2 années sur 5, soit deux fois plus que dans le passé (12 épisodes de 1905 à 1965). Qu'en sera-t-il dans le futur ? Les modèles de climat ne sont pas adaptés à la prévision dans le futur proche et, pour l'horizon 2010-2020, on peut supposer que des épisodes comme ceux de 2003-2005 peuvent se reproduire. Au-delà, autant les différents scénarios de changement de température prévoient tous une hausse, autant les scénarios pour la pluie sont imprécis pour la France dans la mesure où la limite entre augmentation et baisse varie en latitude du 42<sup>ème</sup> au 47<sup>ème</sup> parallèle. Il semble toutefois raisonnable de tableer sur une baisse de pluviométrie estivale en région méridionale, c'est-à-dire dans la partie du territoire la plus concernée par la pression sur la ressource en eau.

## 2. L'agriculture et la ressource en eau

Comme indiqué plus haut, la relation de l'agriculture à la ressource en eau présente deux volets :

- le maintien d'une agriculture dépendante de la ressource
- l'incidence de l'agriculture sur la ressource en eau

### 2.1) *Maintien d'une agriculture dépendante de la ressource en eau*

L'expertise « Agriculture et sécheresse » a recherché des pistes d'amélioration pour l'agriculture pluviale (et accessoirement pour l'agriculture irriguée avec une ressource en eau limitante).

Pour pouvoir demander à l'agriculteur de mettre en place un jeu de systèmes de culture qui restitue davantage d'eau au milieu compte tenu de la pression sur la ressource, il faut pouvoir mettre à sa disposition du matériel végétal et des techniques appropriées. L'adaptation passe donc par deux voies : génétique et agronomique.

#### a/ Adaptation par la voie génétique.

Les médias se sont fait l'écho de résultats intéressants concernant la survie à la sécheresse. Ceci étant, sauf dans le cas de la résilience d'espèces prairiales (ou forestières), ce qui intéresse l'agriculteur, ce n'est pas la survie mais la production. Or cette production, liée à l'acquisition du carbone, se heurte à la correspondance entre gain de CO<sub>2</sub> et perte d'eau par les stomates. Jusqu'à aujourd'hui, on n'a obtenu une amélioration de l'efficacité de l'eau évapotranspirée (rapport « CO<sub>2</sub> »/ « H<sub>2</sub>O ») que dans des conditions d'aridité lointaine de nos conditions climatiques.

Pour pouvoir continuer à cultiver les mêmes espèces, l'amélioration génétique ne passe pas que par l'aspect hydrique. Trois voies sont possibles:

- on peut viser « l'esquive » de la sécheresse en obtenant des variétés précoces et à cycle court.
- on peut viser « l'évitement » de la sécheresse en jouant sur la croissance aérienne (diminution) ou souterraine (augmentation)
- on peut viser la « tolérance » à la sécheresse en privilégiant les organes récoltés

La première et la deuxième voies conduisent à des rendements potentiels inférieurs mais qui peuvent devenir des rendements réels supérieurs en situation de sécheresse.

La troisième voie est aujourd'hui du domaine de la recherche.

Reste que l'on pourrait aussi ambitionner d'améliorer la productivité d'espèces déjà bien adaptées à la sécheresse. Ainsi, il convient de confronter la réflexion sur la tolérance à la sécheresse du maïs à celle sur la productivité de sorgho !

### b/ Adaptation par la voie agronomique

L'adaptation agronomique passe par la mise en place de systèmes de culture adéquats et, secondairement, par l'amélioration des itinéraires techniques. On retrouve les trois voies évoquées pour l'amélioration génétique :

- « l'esquive » consiste à privilégier les systèmes de cultures à base de cultures d'hiver car celles-ci bénéficient d'une ressource plus forte (pluies d'hiver) associée à une demande plus faible (évapotranspiration potentielle réduite). En systèmes à base de culture de printemps, il faut privilégier les variétés précoces.
- « l'évitement » et/ou la « tolérance » consiste à choisir des espèces réputées pour leur capacité de « résistance » à la sécheresse, comme le tournesol (tolérance) ou le sorgho (évitement et tolérance).

Sur le plan « biotechnique », on dispose aujourd'hui d'un certain nombre d'outils et de résultats permettant d'avancer dans le raisonnement des systèmes de cultures alternatifs. Brisson (2008) et Debaeke et al (2008) illustrent cela en associant expérimentations réelles conduites sur des domaines expérimentaux et expérimentation virtuelle de systèmes et de pratiques via la modélisation.

Sur le plan socio-économique, on est confronté à deux observations contraires :

- en plus de son intérêt sur le plan environnemental (Cf. 2.2), la diversification des systèmes de cultures est intéressante pour l'agriculteur car diversifier, c'est avoir plusieurs cordes à son arc et mettre en place une auto-protection
- pour diversifier, il faut que la perte de rendement attendue en situation potentielle ne soit pas supérieure au gain relatif en situation de sécheresse. Or, à côté des aspects d'amélioration de la productivité de cultures alternatives (Cf. Grieu et al, 2008), restent les aspects économiques liés au marché et à l'organisation de la filière (Leenhardt et Reynaud, 2008). J'y reviendrai en conclusion dans l'affichage du double intérêt de la diversification des systèmes de cultures.

## 2.2) Incidence de l'agriculture sur la ressource en eau

Ce point a fait lui aussi l'objet d'un développement dans l'expertise « Agriculture et sécheresse ». Il est évoqué dans le travail de Le Corre-Gabens et Hernandez-Zakine (2008). Il est possible d'aller plus loin que ce n'avait été fait lors de l'expertise « Agriculture et sécheresse ». C'est à cela que je consacrerai l'essentiel de mon propos.

Parler d'incidence de l'agriculture sur la ressource en eau évoque immédiatement dans l'esprit du grand public la consommation d'eau d'irrigation, ressource à partager. « L'adaptation des prélèvements en ressource en eau, via l'instauration d'une gestion collective » est l'un des quatre objectifs majeurs sur l'eau du « Grenelle de l'environnement » qui doit déboucher sur une loi cette année même. Pour aborder cette gestion collective, il nous faut, d'une part, essayer d'y voir clair sur l'éventuelle rareté de la ressource en eau mais aussi traiter d'un point auquel on pense généralement peu : quelle est l'incidence de l'agriculture pluviale sur la ressource par comparaison à d'autres modes d'occupation des sols ?

### a/ Consommation d'eau d'irrigation : à quelle échelle aborder la question ?

La pluviométrie moyenne annuelle sur le territoire métropolitain est proche de 900 mm/an ( $480 \cdot 10^9 \text{ m}^3$  sur  $550 \cdot 10^3 \text{ km}^2$ ). Nous sommes presque au double du seuil défini pour l'aridité. L'évapotranspiration, impôt climatique obligatoire, consomme grosso-modo les deux tiers de la pluie, le tiers restant, appelé parfois « pluie efficace », est disponible pour les aquifères et cours d'eau, soit à peu près 300 mm/an. L'irrigation concerne environ 17000 km<sup>2</sup> (7% de la S.A.U., 3% du territoire). Les doses varient de plus de 400 mm/an dans le Sud-Est à moins de 200 mm/an dans bien des régions. Sur une base de 300 mm/an en moyenne appliqués à 3% du territoire national, cela représente 1% de la pluie totale sur l'ensemble de ce territoire ou 3% de la « pluie efficace ». On voit clairement que l'échelle du territoire national n'est pas appropriée à la question pour l'affichage d'une éventuelle rareté de l'eau. La question, lorsqu'elle est pertinente se pose à l'échelle de tel ou tel bassin versant. A ce sujet, force est de constater qu'il y a une profonde inégalité de situation entre les acteurs de différents bassins versants. Comparons à ce propos les situations respectives du Sud-Ouest (Midi-Pyrénées, Aquitaine et Poitou-Charentes) et du Sud-Est (PACA, Languedoc-Roussillon et sud de Rhône-Alpes).

Dans le premier cas, le climat océanique dégradé avec une différence (P-ETP) de 100 à 200 mm/an conduit à des doses d'irrigation de l'ordre de 150 mm/an. Dans le deuxième, le climat méditerranéen avec une différence (P-ETP) de 300 mm/an conduit à des doses d'irrigation de 400 à 500 mm/an, soit 3 fois plus. La surface irriguée dans le Sud-Ouest est de 7500 km<sup>2</sup> soit trois fois plus que dans le Sud-Est. Le total des besoins d'eau d'irrigation des deux régions est donc voisin, proche de 1 km<sup>3</sup>/an. La situation est toutefois beaucoup plus tendue dans le Sud-Ouest car, tandis que le Sud-Est dispose de fortes ressources exogènes (eaux du Rhône et de la Durance distribuées par la CNABRL et la SCP), le Sud-Ouest en est faiblement pourvu (eaux de la Neste distribuées par la CACG) voire dépourvu (cas de Poitou-Charentes) !

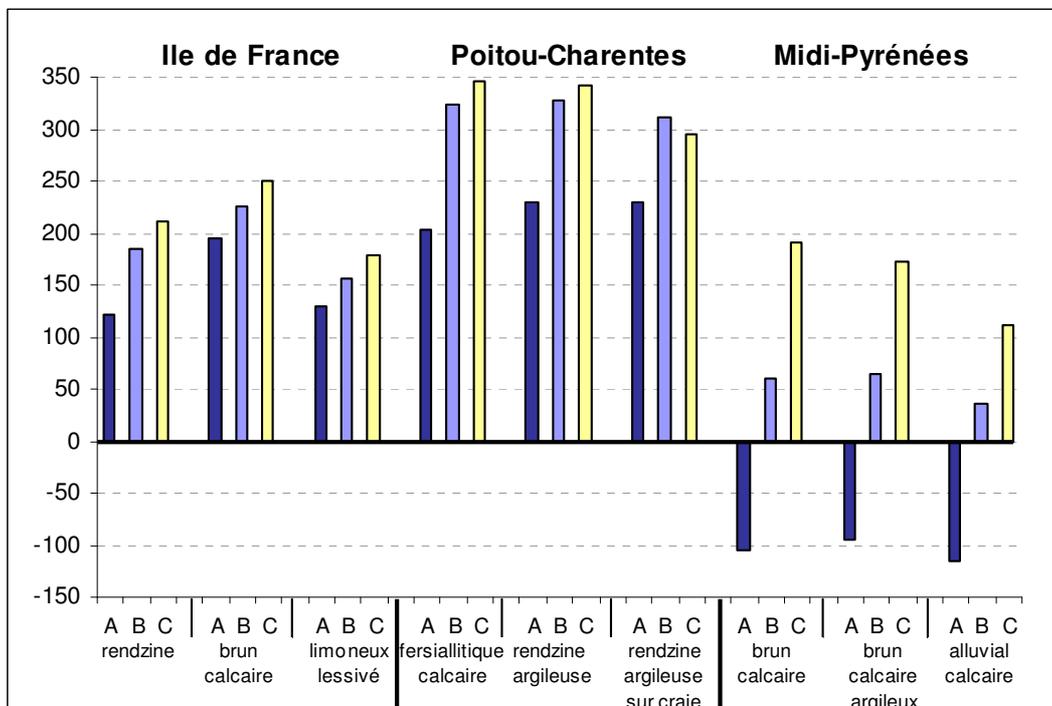
Nous avons pris, pour illustrer le contraste, une comparaison entre de vastes territoires. Dans les faits, la question se traite le plus souvent au niveau de bassins versants correspondant à des rivières d'ordre 3 ou 4, souvent appelée « échelle territoriale ». Confrontés à la multiplicité des situations, on manque aujourd'hui d'études de bilans hydrologiques à l'échelle de ces bassins versants. Les mécanismes en jeu sont bien maîtrisés à l'échelle de la parcelle pour l'établissement de bilans hydriques (au moins pour les situations de faible pente). L'exposé de N. Brisson sur le simulateur de cultures « STICS » illustrera ce point. La modélisation hydrologique de bassins versants est encore aujourd'hui du domaine de la recherche et son couplage avec l'hydrogéologie est quant à elle en projet. L'expertise « Agriculture et

sécheresse » a mis en avant la possibilité d'utiliser des simulateurs de cultures comme STICS pour estimer, sur une base annuelle, les flux d'eaux à l'échelle du bassin versant à partir du pédoclimat distribué ( $P_i$ ,  $ETP_i$ ,  $RU_i$ ) et des systèmes de cultures en place ( $SdC_i$ ). Le travail reste à faire pour les bassins versants concernés (voir plus loin : typologie de bassin versant : situation de bilan de réservoir) à partir des bases de données appropriés.

### b/ Incidence des systèmes de culture sur la restitution d'eau au milieu

Nous avons écrit plus haut que, globalement, les deux tiers de l'eau de pluie partent sous forme d'évapotranspiration. Il serait équivalent de dire qu'à l'échelle du territoire, le sol restitue à l'échelle annuelle un tiers de l'eau de pluie au milieu sous forme d'écoulement vers les nappes et les cours d'eau. Ceci recouvre une forte diversité de situations. En parallèle à l'expertise « Agriculture et sécheresse », le simulateur STICS a été utilisé (Brisson et al. 2006) pour comparer la restitution au milieu (drainage – irrigation) de trois systèmes de cultures (irrigué, irrigué en complément, pluvial), dans trois régions, sur trois types de sol (faible, moyenne et forte réserve utile). Le résultat de la simulation est présenté sur la Figure 1. La figure permet d'observer l'intérêt des systèmes en irrigation de complément, le problème posé par l'absence de nappes de stockage en Poitou-Charentes et la nécessité de disposer de ressources exogènes pour cultiver des cultures irriguées en Midi-Pyrénées.

**Différences (mm) entre le drainage et l'irrigation ( $D - I$ ) par type de sol pour différents systèmes de culture (en abscisse: A: irrigué, B: irrigué en complément, C: pluvial).**



**Figure 1** : Restitution d'eau au milieu ( $D-I$ ) pour différents systèmes de cultures. Le terme « drainage » ( $D$ ) représente ici l'eau percolant sous l'horizon de sol exploité par les racines. (d'après Brisson et al. 2006 – repris dans Amigues et al. 2006)

La comparaison présentée sur la figure 1 traite de différents systèmes de cultures. Une autre comparaison a été effectuée (Levrault et al., 2005) en Poitou-Charentes entre une rotation Maïs-Blé et une prairie, les deux conduits en pluvial. La quantité d'eau drainée sous la rotation Maïs-Blé excède de 100 mm/an celle drainée sous prairie pour la période 1971-2000. Ce résultat, cohérent avec des observations faites par des chercheurs travaillant sur forêt, illustre le fait que l'agriculture pluviale restitue davantage d'eau au milieu que ne le font les surfaces naturelles. Il est aisé de trouver l'explication de ce fait dans l'existence de périodes de sols nus dans les systèmes cultivés. Ainsi, l'agriculture pluviale est-elle, par comparaison au milieu naturel, un contributeur relatif à la ressource. Ce point devrait entrer dans le raisonnement des pourcentages de surface allouables à l'irrigation dans les négociations futures à conduire avec d'autres acteurs à l'échelle du bassin versant. Il n'exonère pas de la nécessité de promouvoir la diversité des systèmes de culture mais il permet de rationaliser le débat.

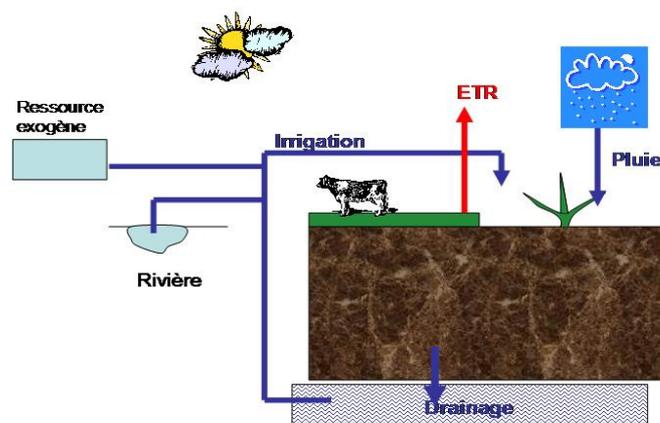
### **3. Systèmes de culture et pratiques en fonction de l'origine de la ressource en eau d'irrigation.**

On classe souvent les systèmes d'irrigation en fonction du mode de distribution (« par aspersion », « à la raie », « au goutte à goutte », etc...). Ces modes d'irrigation correspondent à des pratiques différentes et, souvent, à des systèmes de cultures différents.

L'origine de la ressource est rarement évoquée pour caractériser les systèmes d'irrigation et pourtant elle peut avoir une incidence forte sur l'intérêt de l'amélioration des pratiques et le choix des systèmes de cultures irrigués.

Nous allons illustrer le propos à partir de deux situations contrastées qui correspondent l'une aux systèmes irrigués de Beauce, l'autre aux systèmes irrigués de Poitou-Charentes.

**Pompage dans une nappe → « Bilan de réservoir »**  
**Pompage dans une rivière (alimentée ou non par une ressource exogène) → « Débit à assurer »**



**Figure 2** : Deux situations très contrastées : pompage dans une nappe et pompage dans une rivière

### 3.1) *Pompage dans une nappe : bilan de réservoir*

Lorsque l'irrigation est pratiquée à partir du pompage dans une nappe de grande envergure, la question majeure est celle du maintien du niveau de cette nappe. C'est dans cette situation que la notion de « restitution au milieu » illustrée par la figure 1 prend toute son importance. A l'échelle du bassin alimenté par cette nappe, ce qui importe c'est la part d'eau de pluie diminuée de la quantité prélevée pour l'irrigation qui alimentera la nappe afin d'assurer les autres usages de l'eau et, notamment, le débit aux exutoires. C'est la combinaison des systèmes de cultures pluviaux et irrigués (irrigation totale ou irrigation de complément) et les pourcentages alloués à chacun sur l'ensemble du bassin qui feront que la restitution au milieu est (ou n'est pas) suffisante pour assurer le maintien du niveau de la nappe. Il est important d'apporter une précision sur les « systèmes de cultures : deux cultures peuvent consommer pour croître des quantités d'eau voisines (par exemple, le maïs et le blé) mais il est clair qu'un système de culture à base de maïs consomme plus d'eau qu'un système de culture à base de blé en raison de la plus forte évaporation du sol pendant la période de sol nu du premier.

Dans une situation de bilan de réservoir, l'amélioration des pratiques n'a qu'un effet secondaire sur le plan quantitatif dans la mesure où l'eau d'irrigation distribuée en excès retournera à la nappe après percolation. Cette amélioration conserve, bien sûr, tout son intérêt sur le plan qualitatif.

La question clé dans ce cas, c'est la part des systèmes de cultures irriguées (irrigation totale ou de complément) en regard de celle correspondant aux systèmes pluviaux. Les accords collectifs conduisant à une gestion volumétrique doivent pouvoir s'appuyer sur des bases physiques où le rôle de consommateur de l'agriculture irriguée (totale et/ou de complément) est compensé par le rôle de contributeur relatif joué par l'agriculture pluviale par comparaison aux « milieux naturels ».

Dans cette situation, et en raisonnant sur une base annuelle, il est possible d'utiliser les simulateurs de cultures pour tester différentes combinaisons de systèmes de culture dans le cadre d'études conduites à l'échelle du bassin.

### 3.2) *Pompage dans une rivière : logique de débit*

Lorsque l'irrigation est pratiquée à partir du pompage dans une rivière, alimentée ou non par une ressource exogène, la question majeure est celle du débit d'étiage, tant pour des questions de quantité à réserver à d'autres usages que des questions de qualité. La temporalité du problème est alors un élément majeur. Ce n'est plus l'eau disponible à l'échelle annuelle qui compte (sinon la région Poitou-Charentes serait parmi les régions les mieux loties !) mais l'eau disponible en été dans les rivières qui fixe les potentialités du milieu en matière d'allocation de surface aux systèmes irrigués. Dans ce cas deux points importants sont à souligner :

- L'amélioration des pratiques conserve tout son intérêt, tant pour le producteur que pour le gestionnaire de la ressource. Pour le producteur qui peut irriguer une surface plus étendue avec la même allocation de ressource s'il gère correctement celle-ci. Pour le gestionnaire, car l'eau gaspillée n'est pas forcément restituée au cours d'eau pendant l'étiage.
- L'association de systèmes de cultures en irrigation de complément permet une augmentation de la surface potentiellement irrigable pour une même allocation de ressource. Qui plus est, en cas d'étiage sévère, ceux-ci seront beaucoup moins sensibles à d'éventuelles restrictions.

## Conclusions

L'agriculture doit se préparer à faire face demain à une situation de production sous contrainte hydrique. C'est vrai pour l'agriculture pluviale si le changement climatique en cours se traduit par une occurrence accrue de sécheresse. C'est également vrai pour l'agriculture irriguée si la pression sur la ressource liée à la concurrence pour les usages de l'eau s'accroît.

L'amélioration des pratiques ne peut à elle seule fournir la solution demain en situation de sécheresse. Que ce soit pour l'agriculture pluviale ou pour l'agriculture irriguée sous les deux types, la diversité des systèmes de culture est doublement intéressante car elle met en place une auto-protection pour l'agriculteur et économise la ressource en eau d'irrigation pour l'ensemble de la collectivité.

L'agriculteur dispose dès aujourd'hui de possibilités au travers de systèmes de cultures d'hiver ou du choix de variétés précoces dans les systèmes de cultures de printemps.

La mise en place de cultures alternatives tolérantes à la sécheresse pose une double question :

- à la recherche d'abord pour trouver des solutions techniques telles que l'amélioration de la tolérance d'espèces productives comme le maïs ou de la productivité d'espèces tolérantes comme le sorgho ;
- à la profession ensuite, et pas seulement à l'agriculteur individuel, car le choix de cultures comme le sorgho ne passe pas que par l'amélioration de sa productivité. Il passe aussi par la structuration d'une filière qui sécurise ce choix si les critères de productivité sont satisfaits.

## Références bibliographiques

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

Brisson N., 2008. Modéliser la réponse des cultures à la contrainte hydrique avec le modèle STICS pour comparer des stratégies et anticiper les changements climatiques. *Innovations Agronomiques* 2, 9-18.

Brisson N., Huard F., Graux A.I., Lebas C., Debaeke P., 2006. Impact de la variabilité des facteurs responsables de la sécheresse agricole à l'échelle du territoire par une approche de modélisation biophysique. Note technique Agroclim INRA Avignon

Debaeke P., Willaume M., Casadebaig P., Nolot J.M., 2008. Raisonner les systèmes de culture en fonction de la disponibilité en eau. *Innovations Agronomiques* 2, 19-36.

Grieu P., Maury P., Debaeke P., Sarrafi A., 2008. Améliorer la tolérance à la sécheresse du tournesol : apports de l'écophysiologie et de la génétique. *Innovations Agronomiques* 2, 37-51.

Le Corre-Gabens N., Hernandez-Zakine C., 2008. Vers une gestion durable des ressources en eau. Projet Cas-Dar. *Innovations Agronomiques* 2, 93-108.

Leenhardt D., Reynaud A., 2008. Répondre aux enjeux socio-économiques, de l'exploitation agricole au territoire. *Innovations Agronomiques* 2, 65-81.

Levrault F. Baraton E., Boucheny P., Chazalon J-M., Ferrane C., Fombour L., Genettais T., 2005. Fonctionnement hydrique de parcelles de maïs en Poitou-Charentes 22p. Atelier Cogito n°4, Agro-Transfert Poitou-Charentes

## **Modéliser la réponse des cultures à la contrainte hydrique avec le modèle STICS pour comparer des stratégies et anticiper les changements climatiques**

Nadine Brisson

Unité AGROCLIM, INRA Domaine St Paul Site Agroparc, 84914 Avignon Cedex 9

### **Résumé**

Le modèle de culture STICS rend compte des interactions entre les facteurs climatiques - édaphiques et les résultats agri-environnementaux des systèmes de culture. En particulier, il permet d'analyser les conséquences du manque d'eau qui risque d'affecter notre agriculture dans le futur. Pour représenter la réponse des cultures à la contrainte hydrique, STICS modélise tout d'abord la contrainte elle-même comme une fonction de la capacité du sol à stocker l'eau, du système racinaire à l'extraire et de la demande climatique qui s'exerce au niveau du couvert végétal. Ensuite, la simulation des effets de cette contrainte sur la physiologie de la plante concerne essentiellement l'évolution du feuillage et la photosynthèse nette, et l'ampleur de ces effets traduit les stratégies spécifiques des nombreuses plantes simulées par STICS vis-à-vis de leur économie en eau. Enfin, le modèle permet de simuler un ensemble important de techniques mises en œuvre par l'agriculteur pour faire face au déficit hydrique : irrigation, choix des dates de semis et variétés, labour, mulch végétal. Pour documenter les potentialités du modèle STICS dans le contexte de déficit hydrique, les principaux résultats de l'étude réalisée en marge de l'expertise collective « agriculture et sécheresse » sont synthétisés. L'étude repose sur une approche multilocale à partir d'une sélection de milieux pédoclimatiques permettant d'appréhender la variabilité des configurations de sécheresse d'origine climatique et/ou édaphique à l'échelle du territoire français. Sur l'ensemble des sites, prairies pluviales, irriguées et sol nu ont été simulés pour cerner les éléments du bilan hydrique des surfaces agricoles et sur un sous-ensemble de trois régions (Ile de France, Midi-Pyrénées et Poitou-Charentes), la dimension agricole a été introduite par la prise en compte de systèmes de culture réalistes. La capacité à restituer l'eau au milieu dépend, de manière contrastée entre région, du climat, du sol et du système végétal : une couverture végétale permanente restituant moins d'eau qu'un sol nu. L'analyse agricole met en évidence l'intérêt des systèmes avec irrigation de complément à base de cultures d'hiver et de cultures de printemps économe en eau comme le sorgho. Enfin un travail prospectif montre que l'augmentation de la fréquence des épisodes de sécheresse semblables à 2003-2006 aurait des conséquences importantes sur la restitution de l'eau au milieu et sur le confort hydrique des cultures.

### **Introduction**

Le changement climatique provoque une modification des interactions entre les cultures et l'eau, que ce soit à cause de l'augmentation significative des températures ou de leur variabilité qui bouleverse les cycles de développement, de l'amplification des différences de pluviométrie entre les saisons et les latitudes pouvant provoquer excès ou déficit hydriques ou de l'augmentation de la concentration en CO<sub>2</sub> de l'atmosphère modifiant le fonctionnement stomatique.

Dans ce cadre, le recours à la modélisation permet une analyse relativement complète de la problématique par la prise en compte des interactions entre les divers facteurs du climat, les possibilités de répétitivité spatiale et temporelle offertes, l'utilisation possible des scénarios de changement climatique proposés par les modélisateurs du climat et l'accès à des variables explicatives multiples.

En particulier, le modèle STICS (Brisson et al., 2003) se révèle être un outil bien adapté à la simulation des contraintes qui pèsent et vont peser sur notre agriculture, par son caractère générique, la prise en compte de successions de cultures et des impacts directs et indirects du changement climatique.

Pour documenter les potentialités du modèle STICS dans le contexte de déficit hydrique qui nous intéresse ici, une première partie sera consacrée à la modélisation de la réponse des cultures à la contrainte hydrique et une seconde partie illustrera le rôle prospectif que peut jouer le modèle dans le cadre d'une étude réalisée en marge de l'expertise « agriculture et sécheresse » (Amigues et al., 2007).

## **1. Modéliser la réponse des cultures à la contrainte hydrique**

Pour représenter la réponse des cultures à la contrainte hydrique, il est indispensable de modéliser la contrainte, son effet sur les plantes et enfin de tenir compte des pratiques qui interagissent avec elle et permettent d'y faire face. Nous expliciterons ci-après comment le modèle STICS représente ces diverses composantes

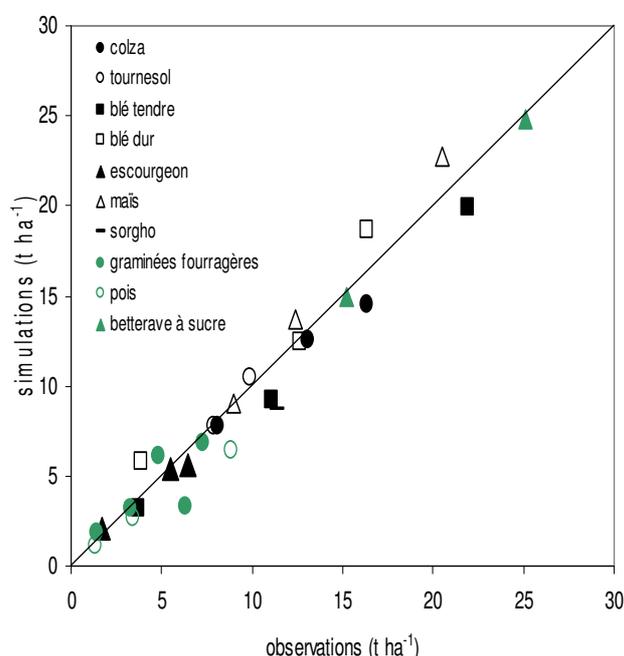
### *1.1. Modéliser la contrainte*

La contrainte hydrique se développe plus ou moins rapidement selon les propriétés hydrodynamiques du sol, la capacité de la plante à extraire l'eau disponible dans le sol et la demande climatique qui s'exerce au niveau du couvert végétal. Le sol est conçu comme un système de mini réservoirs d'un centimètre d'épaisseur se déversant les uns dans les autres par cascade dès que la teneur en eau excède la capacité au champ. Entre deux horizons, le changement textural ou structural peut engendrer un frein à l'infiltration et provoquer une rétention d'eau supérieure à la capacité au champ, voire même de l'excès d'eau qui pénalise le système racinaire. La capacité du sol à développer rapidement un mulch naturel (couche sèche de surface limitant fortement l'évaporation du sol) est un caractère important à considérer, en particulier en agriculture irriguée. Les processus de croissance - sénescence des racines sont directement calculés en longueur et dépendent à la fois de l'espèce et des contraintes physico-chimiques du sol (excès d'eau, semelle de labour,...). Le calcul de la demande climatique repose sur un modèle résistif, faisant intervenir les caractéristiques combinées de l'atmosphère (rayonnement, température, vent et humidité) et du couvert végétal (hauteur, LAI, conductance stomatique qui varie avec le CO<sub>2</sub>).

### *1.2. Modéliser l'effet de la contrainte sur les plantes*

Le déficit hydrique joue un rôle direct sur la physiologie des plantes ; il joue aussi un rôle indirect sur le microclimat et la disponibilité en azote. Toutes les fonctions physiologiques ne sont pas affectées en même temps et avec la même ampleur par la contrainte hydrique et le décalage d'effet sur l'expansion foliaire, la photosynthèse nette et la sénescence est à l'origine de certains comportements d'adaptation au stress hydrique. En effet, si la plante stoppe sa croissance foliaire sans fermer ses stomates (cas du tournesol), elle peut continuer à croître en biomasse tout en limitant ses pertes par transpiration; ce qui n'est plus possible si les deux mécanismes sont quasi-simultanés (cas du maïs). STICS a été adapté à des cultures variées (Figure 1). La stratégie spécifique d'une culture vis à vis de son économie en eau repose sur divers éléments du fonctionnement et de la morphologie de la plante renseignés par un paramétrage approprié aux niveaux de son développement phénologique, des dynamiques respectives de son feuillage et de son système racinaire, de la fermeture stomatique et de sa réactivité aux stress. Pour des raisons liées au bilan d'énergie, quand le couvert végétal limite sa transpiration par rapport à la demande climatique, la température ambiante augmente. Cela a pour conséquence d'accélérer le cycle (maximum d'une dizaine de jours pour une culture de blé). Une autre conséquence très importante du manque d'eau concerne l'alimentation azotée des cultures. En effet, avant même que les plantes ne souffrent du déficit hydrique, elles peuvent se trouver en déficit azoté par défaillance du rôle

de transporteur que joue l'eau entre les particules de sol et les sites d'absorption racinaire. Ce rôle est représenté dans le modèle par des lois de convection-diffusion de l'azote ammoniacal ou nitrique.



**Figure 1** : Comparaison entre mesures et simulations par STICS de la biomasse accumulée par des cultures très diversifiées

### 1.3. Tenir compte des pratiques qui jouent sur la contrainte

L'agriculteur dispose de plusieurs techniques pour faire face à la contrainte hydrique et les améliorations récentes du modèle ont eu pour objet de compléter la panoplie des pratiques modélisées. Il s'agit tout d'abord de l'irrigation pilotée, dans le modèle, par le niveau des besoins en eau à satisfaire, la capacité de rétention du sol (on remplit le réservoir sol dès que la satisfaction des besoins descend en dessous du seuil autorisé) et des seuils quantitatifs techniques. L'efficacité de cet apport d'eau dépend du mode d'irrigation (sur ou sous frondaison, goutte-à-goutte) et, s'il a un effet « levée du stress hydrique » immédiat, la persistance de cet effet bénéfique dépend des caractéristiques hydrodynamiques du sol (texture, profondeur, infiltrabilité, rapidité de formation du mulch naturel). Mais l'irrigation peut aussi avoir un effet négatif quand elle soustrait les nitrates à la plante par lessivage. Un ensemble d'autres techniques vise à utiliser au mieux les eaux de pluie soit en favorisant leur stockage dans le sol, soit en positionnant le cycle de culture de façon appropriée. Ainsi, le labour et des éventuels tassements liés à des passages d'engins en conditions trop humides ont des conséquences importantes sur les capacités de stockage-déstockage (par évaporation directe, infiltration, ruissellement) de l'eau dans le sol par modifications des caractéristiques hydrodynamiques (masse volumique, épaisseur, rugosité, infiltrabilité,...). Mais laisser les résidus de la culture précédente sur le sol (mulch végétal) permet aussi de limiter les pertes par évaporation directe, tout en stockant une partie de l'eau de pluie.

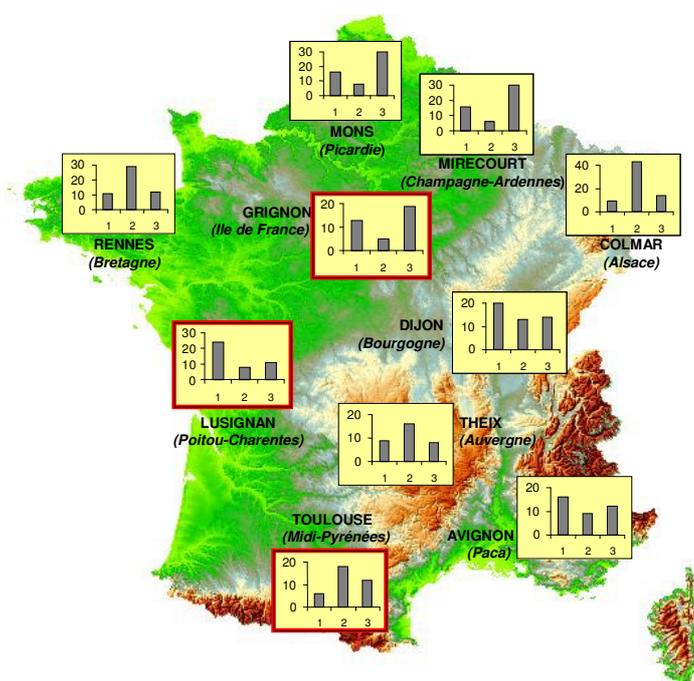
En simulant cet ensemble de techniques, on s'aperçoit que selon les situations pédoclimatiques ce sont les effets positifs ou les effets négatifs qui prédominent. De façon plus stratégique, l'agriculteur peut réaliser ses choix de culture, de date de semis ou de variétés de façon à échapper au déficit hydrique en calant le cycle sur des périodes à faible demande climatique et/ou forte pluviométrie : préférence pour les cultures d'hiver, les semis précoces et les variétés à cycle court. Cependant, la phénologie des cultures n'est pas la seule composante qui détermine la date de semis car semer dans des conditions trop froides, sèches ou incertaines au plan climatique peut pénaliser la germination ou la croissance

souterraine de la plantule (Lebonvallet, 2008). Un dernier élément technique concerne la fertilisation azotée et son interaction avec le bilan hydrique. En effet, l'exubérance du feuillage en début de cycle induite par une fertilisation azotée pléthorique favorise la transpiration et peut conduire à un épuisement précoce de la réserve en eau du sol, néfaste au moment du remplissage des organes de récolte.

## 2. STICS : outil de prospective sur la question « agriculture et sécheresse »

Les principaux résultats de l'étude réalisée en marge de l'expertise collective « agriculture et sécheresse » (Brisson et al., 2006) sont synthétisés ci-après pour illustrer le rôle que peut jouer le modèle STICS dans la problématique qui nous intéresse.

### 2.1. Protocoles de simulation



**Figure 2 :** Carte des régions sélectionnées (chacune étant représentée par une station climatique) et choix des sols par gamme de réserve utile (1 : 40 à 100 mm, 2 : 100 à 160 mm, 3 : >160 mm) et représentativité dans la région en %. Les régions encadrées de rouge ont été choisies pour l'étude agricole.

L'étude repose sur une sélection de milieux pédoclimatiques permettant d'appréhender la variabilité des configurations de sécheresse d'origine climatique et/ou édaphique à l'échelle du territoire français. Nous avons opéré cette sélection au niveau régional, échelle assurant le meilleur compromis entre les décisions relatives à l'eau et le découpage naturel du territoire français. Ainsi, 10 régions ont été choisies, chacune étant caractérisée par une station climatique pourvue d'une série de 25 ans de données au minimum et de trois types de sol (Figure 2). Le choix des sols s'est fait sur la base de leur capacité de stockage de l'eau, et de leur présence significative dans la région.

Sur l'ensemble des sites, une étude à caractère pédoclimatique a été menée, visant à cerner le poids relatif des sols et des climats sur les flux d'eau infiltrés et évaporés, les périodes de crise ainsi que les conséquences attendues sur le microclimat. Sur un sous-ensemble de trois régions, sélectionnées pour l'acuité des problèmes liés à l'usage de l'eau (Ile de France, Midi-Pyrénées et Poitou-Charentes), nous avons introduit de manière aussi réaliste que possible la dimension agricole (les systèmes de culture).

Le protocole « pédoclimatique » correspond à des situations de couverture du sol extrêmes : permanence de sol nu sans aucune couverture végétale comparée à un couvert de prairie de

graminées irrigué pour couvrir la totalité des besoins en eau des plantes. La même prairie conduite en « pluvial » a également été simulée afin d'estimer l'ampleur maximale du déstockage de l'eau du sol par une végétation permanente puisant uniquement dans les réserves « naturelles ».

Le protocole « agricole » a été construit avec l'aide d'experts régionaux de façon à évaluer trois systèmes de culture réalistes par région, matérialisés par des rotations au plus quadriennales et des itinéraires techniques propres à chaque région. Les systèmes « A » sont les plus consommateurs en eau à base de cultures entièrement irriguées (tableau 1). A l'opposé, les systèmes « C » sont les plus économes avec des cultures conduites sans irrigation (appelées aussi cultures pluviales). En position intermédiaire, les systèmes « B » utilisent l'irrigation d'appoint, qui ne couvre qu'une partie des besoins en eau des plantes (évaluée à 50%). Les systèmes « B » et « C » tendent à privilégier des stratégies d'esquive (ou d'échappement) en n'occupant pas le sol systématiquement pendant la période sensible de l'été. Les systèmes retenus ne sont pas forcément des systèmes très représentés dans les régions étudiées mais concrétisent une stratégie agri-environnementale que nous souhaitons tester.

Région	Ile de France			Midi Pyrénées			Poitou Charentes		
<b>Rotation</b>	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>
	Maïs	Colza	Tournesol	Maïs	Blé dur	Blé dur	Maïs	Colza	Tournesol
	Blé dur	Blé tendre	Blé tendre		Blé dur	Tournesol		Blé tendre	Blé tendre
	Betterave	Escourgeon	Pois		Sorgho			Escourgeon	Escourgeon
	Blé tendre		Blé tendre						

Tableau 1 : Rotations retenues pour les trois régions test.

### 2.2 Analyse des simulations « pédoclimatiques »

L'objectif de ces simulations était de cadrer l'impact de l'agriculture sur le bilan hydrique et le microclimat par l'analyse de situations extrêmes que sont le sol nu, la prairie irriguée et la prairie pluviale.

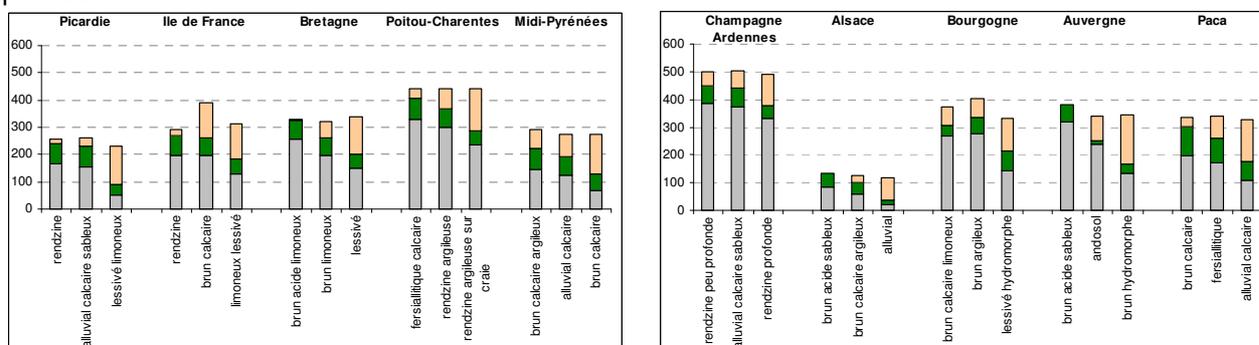


Figure 3 : Moyenne du cumul annuel drainage + ruissellement (mm) pour les trois surfaces étudiées, par type de sol (en abscisse), les sols étant regroupés par région. Les valeurs sont présentées de façon emboîtée (sol nu en beige, prairie irriguée en vert foncé et prairie pluviale en gris) mettant en évidence le classement respectif des deux valeurs.

La combinaison entre la capacité de rétention des sols, le régime pluviométrique (naturel et artificiel) et les flux évaporatoires détermine la quantité d'eau qui s'écoule hors du compartiment de sol exploitable par les racines (drainage + ruissellement représentés sur la figure 3). Ainsi, les situations pédoclimatiques où l'alimentation des nappes par les eaux drainées-ruisselées est particulièrement limitée correspondent à des situations à forte réserve utile, faible pluviométrie et forte demande climatique comme l'Alsace. A ce titre, il est intéressant de comparer les trois surfaces étudiées dont la capacité à restituer l'eau au milieu est décroissante depuis le sol nu jusqu'à la prairie pluviale. La différence entre les deux extrêmes que sont le sol nu et la prairie sèche peut aller de quelques dizaines

à une centaine de mm. La prairie irriguée est à un niveau le plus souvent intermédiaire entre sol nu et prairie pluviale, l'eau complémentaire apportée permettant un accroissement important de l'évapotranspiration. Cependant, pour les sols à faible capacité de rétention, les besoins élevés en irrigation peuvent compenser cet accroissement et engendrer des volumes d'eau drainée-ruiselée comparables à ceux du sol nu. Dans une large moitié des régions étudiées, les volumes d'eau drainée-ruiselée dépassent les besoins potentiels en irrigation (tableau 2). Pour les sols hydromorphes, les deux modes de conduite de la prairie n'engendrent que très peu de différence sur les volumes d'eau drainée-ruiselée car la persistance de l'eau dans la macroporosité des sols permet de mieux couvrir les besoins en eau des plantes que dans le cas de sols drainants.

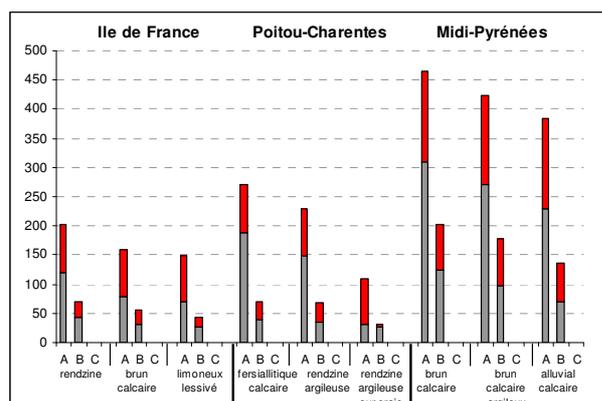
Picardie	Ile de France	Bretagne	Poitou-Charentes	Midi-Pyrénées	Champagne-Ardennes	Alsace	Bourgogne	Auvergne	PACA
-9	102	84	209	-82	161	-124	131	171	-178

**Tableau 2 :** Différences moyennes (interannuelles et intersols) entre le cumul drainage-ruisellement d'une part et l'irrigation d'autre part (en mm) pour une prairie irriguée.

Les besoins en irrigation et les volumes d'eau drainée-ruiselée sont les composantes du bilan hydrique les plus variables spatialement et temporellement. Le climat constitue une première clé d'explication des besoins en irrigation avec en tête les régions PACA (autour de 400 mm en moyenne), puis l'Alsace et la région Midi-Pyrénées (autour de 200 mm en moyenne). Vient ensuite la faible capacité de rétention en eau des sols qui explique les besoins en irrigation de régions comme Poitou-Charentes (Figure 2). Le poids des sols est également déterminant sur les volumes d'eau qui alimentent les nappes. Il existe des mécanismes naturels, liés aux propriétés des sols, permettant de limiter l'évaporation directe du sol au profit de la transpiration des plantes.

### 2.3 Analyse des simulations « agricoles »

Comme attendu, dans chacune des régions analysées, les trois systèmes de culture A, B et C correspondent à des niveaux de satisfaction de besoin en eau décroissants, les systèmes irrigués assurant presque 100 % des besoins alors que les systèmes pluviaux les plus déficitaires assurent 85% des besoins.



**Figure 4 :** Variabilités interannuelles de l'irrigation (mm) pour les 3 systèmes de cultures et 3 sols des régions choisies. Les valeurs minimales atteintes 8 années sur 10 sont en gris et celles atteintes 2 années sur 10 sont en rouge. L'ampleur de la différence entre ces deux grandeurs indique la variabilité interannuelle

Avec de 25 à 45% des quantités d'eau apportés aux systèmes intensifs A, les systèmes B (figure 4) couvrent 95 % des besoins en eau des cultures. Cela s'explique par la présence de cultures d'été plus tolérantes et de cultures d'hiver auxquelles s'ajoute le rationnement du besoin par une contrainte modérée qui joue sur la réduction de la surface foliaire. Sous les systèmes A, intensivement irrigués, les quantités d'eau de drainage sont très nettement diminuées par rapport aux systèmes pluviaux (« C ») car l'évapotranspiration est stimulée par l'exubérance du feuillage. En Midi-Pyrénées, contrairement aux systèmes B basés sur l'irrigation d'appoint, les systèmes A provoquent un véritable déstockage (cf figure 1 dans Itier, 2008) comme pour la prairie irriguée, à l'instar d'autres régions notoirement sèches comme l'Alsace ou la région PACA.

La culture de maïs est souvent désignée comme une culture très consommatrice en eau parce que très productive. Nos résultats, réexaminés par culture, indiquent (figure 5) que, excepté la betterave en Ile de France, le maïs est, en effet, la culture qui consomme le plus d'eau avec de 30 à 50% de cette consommation couverte par l'irrigation, l'augmentation des besoins en irrigation suivant très logiquement un gradient nord-sud.

Région	Ile de France		Poitou-Charentes		Midi-Pyrénées	
Sol	sol limoneux lessivé		rendzine argileuse sur craie		sol alluvial calcaire	
mm	Consommation	Irrigation	Consommation	Irrigation	Consommation	Irrigation
600-649					◀ maïs	
550-599						
500-549	◀ betterave				◀ sorgho	
450-499			◀ maïs		◀ blé dur	
400-449	◀ maïs					
350-399	◀ blé tendre ◀ colza ◀ escourgeon ◀ blé dur		◀ blé tendre ◀ colza ◀ escourgeon ◀ tournesol		◀ tournesol	
300-349	◀ tournesol					◀ maïs
250-299	◀ pois					
200-249		◀ betterave				
150-199				◀ maïs		◀ sorgho
100-149		◀ maïs				
50-99		◀ blé ◀ colza ◀ tournesol ◀ escourgeon, pois		◀ blé tendre ◀ tournesol, colza ◀ escourgeon		◀ blé dur
0-49						◀ tournesol

**Figure 5** : Positions relatives des cultures en termes de consommation en eau et de besoins en irrigation sur le sol à forte rétention en eau. Il s'agit de moyennes pour l'ensemble des systèmes de culture

Il existe d'autres cultures d'été moins consommatrices comme le sorgho (Midi-Pyrénées) ou le tournesol mais qui évidemment produisent moins (Figure 6) dans les contextes d'agriculture plus économes en eau dans lesquels ils sont produits (systèmes de culture B et C). Pourtant, le sorgho montre une efficacité de l'eau comparable à celle du maïs, ce qui lui confère un statut agronomique substitutif par rapport au maïs. Le blé est sans doute la culture dont consommation en eau et production se rapprochent le plus de celle du maïs. Son efficacité de l'eau est bien supérieure à celle du maïs en Midi-Pyrénées. Les performances du maïs sont également liées à la fertilisation azotée qui augmente de façon proportionnelle avec les apports d'eau par irrigation indiquant que l'intensification liée à l'irrigation s'accompagne d'une forte fertilisation. Evidemment, le choix du type de sol pèse lourd sur l'irrigation requise et la pratiquer sur un sol à faible réserve peut augmenter de 100 mm les besoins en eau d'irrigation.

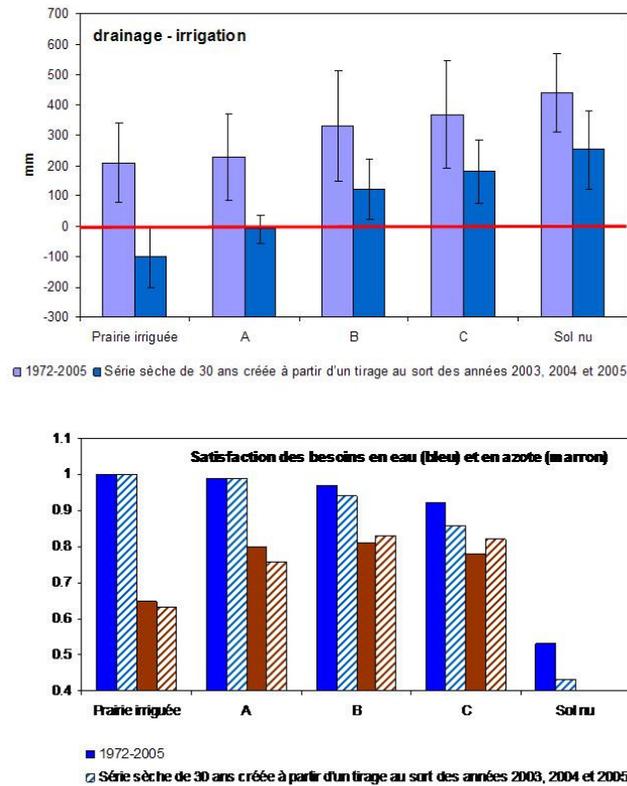
Région	Ile de France	Poitou-Charentes	Midi-Pyrénées
Sol t ha <sup>-1</sup>	sol limoneux lessivé	rendzine argileuse sur craie	sol alluvial calcaire
14-15	◀ betterave		
13-14			
12-13			
11-12			
10-11			
9-10			◀ maïs
8-9		◀ maïs	
7-8	◀ maïs		
6-7	◀ blé	◀ blé	◀ blé
5-6			
4-5			◀ sorgho

3-4	◀ escourgeon	◀ escourgeon	
2.3	◀ pois, colza, tournesol	◀ colza	
0-2		◀ tournesol	◀ tournesol

**Figure 6** : Positions relatives des cultures en termes de production récoltable ( $T\ ha^{-1}$  à 0% d'eau) :

#### *2.4 Et si les sécheresses s'accroissent....*

L'inquiétude qui fait suite aux sécheresses de 2003 et 2005 est-elle légitime ? Le simulateur STICS permet d'aborder cette question à caractère prospectif et, pour ce faire, nous avons extrait de la série climatique passée cinq années connues pour leur caractère sec le plus souvent au printemps et en été mais aussi en hiver (cas de l'année 2004). Parallèlement, nous nous sommes livrés à une étude prospective afin d'apprécier d'éventuels effets cumulatifs des sécheresses en supposant que la succession des années 2003 à 2005 se reproduisait 10 fois. Indépendamment du fait que ces années sont encore dans les mémoires, elles représentent un échantillonnage intéressant des divers modes de sécheresse : sécheresse combinée avec une canicule en 2003, sécheresse hivernale en 2004 et estivale en 2005. Afin de ne pas mélanger d'autres sources de variabilité que celle de l'occupation des sols, nous nous sommes concentrés sur un seul milieu pédoclimatique, en Poitou-Charentes, et sur le sol médian. Les résultats (Brisson et al, 2006) sont édifiants ; nous en avons extrait quelques composantes, comme par exemple sur la figure 7a, la diminution drastique de la restitution de l'eau au milieu qui, pour les systèmes complètement irrigués, peu aboutir à un déstockage. La figure 7b donne des éléments sur le fonctionnement des couverts. Elle montre une diminution de la satisfaction des besoins en eau pour les surfaces faiblement ou non irriguées et une diminution de la satisfaction des besoins en azote pour les surfaces irriguées en liaison avec un entraînement des nitrates par l'irrigation plus importante.



**Figure 7 :** Comparaison de l'impact des sécheresses en Poitou-Charentes sur rendzine argileuse (sol médian) sur la restitution de l'eau au milieu (en mm/an) (a) et sur le fonctionnement des couverts (b) à partir de deux séries climatiques (série réelle 1972-2005 et série fictive très sèche) avec les écart-types. Les valeurs sont comparables entre années ou séries climatiques mais pas entre systèmes de culture car les cultures sont différentes et les périodes sur lesquelles sont réalisées les moyennes également

## Conclusion

Cette étude montre l'intérêt du modèle pour reproduire les interactions, parfois complexes, entre les divers processus qui sont impliqués dans le fonctionnement hydrique des systèmes de culture. Il permet aussi d'en représenter les variabilités spatiale et temporelle. Le recours à la modélisation donne accès à des ordres de grandeurs des variables clés du bilan hydrique et à une hiérarchisation des facteurs de variation de l'impact de la sécheresse (climat, sol, système de culture). Pour autant, il peut exister des écarts importants avec une réalité agricole précise parce que les conditions pédoclimatiques ne sont pas celles prises en compte ou parce que certains mécanismes ne sont pas encore simulés par le modèle (cas des interactions avec des bioagresseurs par exemple).

Le rôle prospectif du modèle STICS est utilisé dans plusieurs projets où sont analysés les impacts du changement climatique sur l'agriculture ainsi que les adaptations envisageables. En particulier, le projet CLIMATOR (ANR Vulnérabilité Milieux et Climat 2007-2010) a pour objectif d'établir un référentiel sur ces impacts et adaptations pour divers systèmes prégnants de notre agriculture, à partir des scénarios fournis par les modélisateurs du climat (Brisson et al., 2007).

### Références bibliographiques

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

Brisson N., Huard F., Graux A.I., Lebas C., Debaeke P., 2006. Impact de la variabilité des facteurs responsables de la sécheresse agricole à l'échelle du territoire par une approche de modélisation biophysique. Note technique Agroclim INRA Avignon

Brisson, N., Gary, C., Justes, E., Roche, R., Mary, B., Ripoche, D., Zimmer, D., Sierra, J., Bertuzzi, P., Burger, P., Bussièrre, F., Cabidoche, Y.M., Cellier, P., Debaeke, P., Gaudillère, J.P., Maraux, F., Seguin, B., Sinoquet, H., 2003. An overview of the crop model STICS. Eur. J. Agron. 18, 309-332.

Brisson N., Huard F., Terray L., Guillioni L., 2007. ANR - CLIMATOR project: elaboration of tools and referentials to analyze vulnerability of agro ecosystems confronted to climate change In Seminary STICS, Session 5, 20-22 mars 2007, Reims, France.

Itier B., 2008 Agriculture et sécheresse : le contexte et les enjeux. Colloque Productions végétales et sécheresse. Toulouse 06/06/2008.

Lebonvallet S., 2008. Implantation du quinoa et simulation de sa culture sur l'Altiplano bolivien. Thèse AgroParisTech. 244 p.

## Raisonner les systèmes de culture en fonction de la disponibilité en eau

Philippe Debaeke<sup>(1)\*</sup>, Magali Willaume<sup>(2)</sup>, Pierre Casadebaig<sup>(1)</sup>, Jean-Marie Nolot<sup>(3)</sup>

(1) INRA, UMR AGIR, BP 52627, F-31326 Castanet-Tolosan cedex

(2) ENSAT, UMR AGIR, BP 52627, F-31326 Castanet-Tolosan cedex

(3) INRA, UE Domaine d'Auzeville, BP 52627, F-31326 Castanet-Tolosan cedex

**Mots clés** : choix de culture, choix variétal, itinéraire technique, succession de cultures, travail du sol, irrigation, déficit hydrique, sécheresse, eau du sol, esquivage, tolérance, rationnement

*Les systèmes de grande culture français sont soumis à des conditions hydriques de plus en plus limitantes et incertaines (augmentation de l'occurrence d'épisodes de déficit hydrique, tensions croissantes entre usagers). Il est donc impératif de s'interroger sur la façon d'adapter ces systèmes à une disponibilité en eau réduite et variable (sol, précipitations, irrigation), de diminuer leur sensibilité à des déficits hydriques en conditions restrictives (pas ou peu d'irrigation) et de réduire les besoins en eau des systèmes irrigués.*

### Résumé

Pour raisonner les systèmes de culture en fonction de la disponibilité en eau, certains éléments de stratégie peuvent d'ores et déjà être mobilisés par l'agronome. Le choix de cultures (espèces, variétés) peut être réfléchi en fonction de la ressource (privilégier les cultures d'hiver, les espèces tolérantes). L'outil LORA permet d'allouer la ressource en eau de manière optimale au sein de l'assolement irrigué. La gestion de la disponibilité en eau peut également consister en une maximisation du stockage de l'eau au semis, la modification du positionnement du cycle cultural pour esquiver la sécheresse (date de semis anticipée, variétés précoces) ou la réduction des besoins en eau des cultures par une stratégie de rationnement (densité de peuplement, fertilisation). Des travaux de recherche sont menés à l'INRA Toulouse dans ce cadre. Le projet SGCI a permis d'explorer trois stratégies agronomiques contrastées par la disponibilité en eau d'irrigation, d'établir des règles de décision pour le choix de la culture, de la variété et des autres opérations culturales. Un modèle de simulation du tournesol a permis d'explorer le comportement variétal pour différents contextes hydriques. Les besoins de recherche dans le domaine sont encore importants : élaboration de nouvelles références, modélisation de la réponse à l'eau d'une gamme large de systèmes de culture pour leur évaluation virtuelle, expérimentation au champ de systèmes de culture adaptés *ex ante* à la raréfaction des ressources en eau.

### Abstract

Cropping systems in France are coping with more and more uncertain and water-limited environments (increasing occurrence of water shortage, conflicts between water users). More effort should be produced for better adapting cropping systems to low water availability (soil, precipitation, irrigation) and reducing water needs in irrigated systems. Several crop management strategies can be combined. Choice of crop and cultivar can be adjusted to water availability (winter or drought-tolerant crops). Stored water in soil at sowing can be increased through intercropping and tillage management. Escaping water shortage periods (early sowing, early cultivar), or crop rationing (limiting crop water needs through reduced fertilization or plant density) are additional ways to manage limited water. Research in INRA Toulouse is dealing with these questions. In the SGCI program, crop management strategies, with contrasting irrigation opportunities, were designed (decision rules for crop choice and

---

\* correspondance : [debaeke@toulouse.inra.fr](mailto:debaeke@toulouse.inra.fr), Tel. 05.61.28.50.16

crop management) and evaluated using 8-yr experiment and summary simulation. A dynamic simulation model was developed to explore the response of sunflower cultivars in contrasting water environments. Further research is needed to elaborate new references, to model water needs in a wide range of cropping systems, and to conduct field experiments to test promising cropping systems.

## 1. Introduction

Dans de nombreuses régions du monde (en particulier régions arides ou semi-arides, climats de type méditerranéen ou tropical sec), le choix d'une variété, d'une espèce cultivée, d'une succession de cultures sont des décisions clés pour faire face à un déficit hydrique plus ou moins chronique (en particulier, Australie, Maghreb, Proche-Orient, USA). La littérature internationale est extrêmement riche en références utilisables dans ce type de contexte (par exemple Cooper et Gregory, 1987 ; Gerik et Freebairn, 2004). Les manuels d'aridoculture (ou 'dry farming') abordent les questions suivantes (Dregne et Willis, 1983) : choix des cultures en fonction du niveau de remplissage de la réserve en eau du sol au semis, modes de travail du sol, techniques de mulching, périodes optimales de semis, structure de peuplement idéale... Dans ces conditions où la ressource en eau est très limitée, le raisonnement du système de culture a un impact majeur sur la faisabilité et la performance de la production végétale.

On ne considère pas en général que l'agriculture française est soumise de manière structurelle à une contrainte hydrique aussi marquée, en raison de régimes pluviométriques de type humide à sub-humide qui satisfont en général les besoins en eau des grandes cultures. Cependant, dans un certain nombre de situations (sols superficiels, cultures d'été, régions méridionales, cultures à haute valeur ajoutée), les agriculteurs ont recours à l'irrigation pour limiter la variabilité inter-annuelle des rendements et satisfaire aux exigences de qualité technologique (Tiercelin, 1998 ; Debaeke, 2003).

Cependant, à la suite de plusieurs crises climatiques, agronomes, pouvoirs publics et professionnels s'interrogent aujourd'hui sur la durabilité de la ressource en eau pour l'agriculture, que celle-ci soit irriguée ou non (Amigues et al., 2006). Deux raisons à cela :

- La fréquence des épisodes de sécheresse augmente.

Ainsi, depuis 2003, les régions Sud-Est, Sud-Ouest et Centre-Ouest de la France connaissent des épisodes récurrents de sécheresses édaphiques et hydrologiques avec des impacts sensibles sur la production quantitative (-10 à -25 % pour les cultures, -50 % pour les fourrages) et la mobilisation des ressources pour l'irrigation (+ 85 % en 2003 dans le bassin Adour-Garonne) (Agreste, 2005 ; Debaeke et Bertrand, 2008). Au cours des 20 dernières années, une baisse de la pluviométrie estivale d'environ 10 % est signalée par Météo-France dans le Sud de la France (Dubuisson et Moisselin, 2006). Parallèlement à l'augmentation des températures, les scénarios de changement climatique à plus long terme indiqueraient une intensification de la sécheresse printanière et estivale, mais une pluviométrie hivernale plus abondante, en particulier dans le Sud (Dufresne et al., 2006). Dans tous les cas, il est fait mention d'une plus grande irrégularité pluviométrique qui augmente l'incertitude pour les décideurs (agriculteurs et gestionnaires de la ressource).

- La tension sur les usages de l'eau s'est renforcée au cours des vingt dernières années.

Après les sécheresses de 1976, puis de 1989-90 dans le Sud-Ouest, les surfaces irriguées ont augmenté régulièrement. En 2005, 1.7 millions d'ha ont été irrigués, localisés principalement dans le grand Sud-Ouest, la Beauce, la Provence et l'Alsace. Le maïs-grain est la principale culture irriguée (51 % de la sole irriguée en 2000) et son taux d'irrigation est de 45 % (Gleyzes et Rieu, 2004). En Midi-Pyrénées, les volumes d'irrigation moyens pour le maïs peuvent fluctuer de manière importante (100 mm à plus de 200 mm sur la période 2001-2005) (Teyssier, 2006). Ainsi, en période estivale, besoins en eau potable, respect des débits d'étiage (salubrité) et irrigation du maïs entrent en

concurrence et les prélèvements peuvent excéder les ressources renouvelables (80 % des consommations estivales sont dues à l'irrigation) (Blum, 2005). C'est pourquoi, malgré une situation nationale relativement favorable (seules 19 % des ressources en eau douce sont exploitées), des risques importants de pénurie d'eau existent de manière locale et saisonnière, conduisant chaque année les préfets à prendre des arrêtés de restriction d'usages dans un département sur deux en moyenne.

Face au risque de sécheresse et à la pénurie d'eau pour l'irrigation, plusieurs stratégies sont envisageables (Amigues et al, 2006 ; Debaeke et Amigues, 2008) :

- (i) ajuster l'offre à la demande, par la création de ressources supplémentaires ;
- (ii) ajuster la demande à l'offre de ressources par des solutions génétiques, agronomiques, réglementaires, socio-économiques ;
- (iii) développer une gestion concertée locale entre acteurs autour du partage de la ressource en eau ;
- (iv) indemniser les pertes de production ou de revenu par le fonds de calamité agricole substitué progressivement par l'assurance-récolte, lorsque les mesures précédentes n'ont pas permis d'ajustement acceptable.

L'agronome est plus spécialement interrogé sur les voies et moyens techniques pour ajuster la demande en eau agricole à l'offre de ressource (stratégie (ii)), qu'elle provienne du sol, du climat ou de l'irrigation (lacs, rivières, nappes). Pour faire face aux ressources que l'on pressent de plus en plus limitées, la sélection végétale est fortement sollicitée (demande de variétés tolérantes à la sécheresse) ; au-delà de l'irrigation dont la disponibilité ne peut être étendue, il faut travailler à la mise au point de systèmes de culture esquivant, atténuant ou tolérant le déficit hydrique.

De manière très concrète, la recherche agronomique est interrogée par la profession agricole et par les pouvoirs publics sur plusieurs questions techniques :

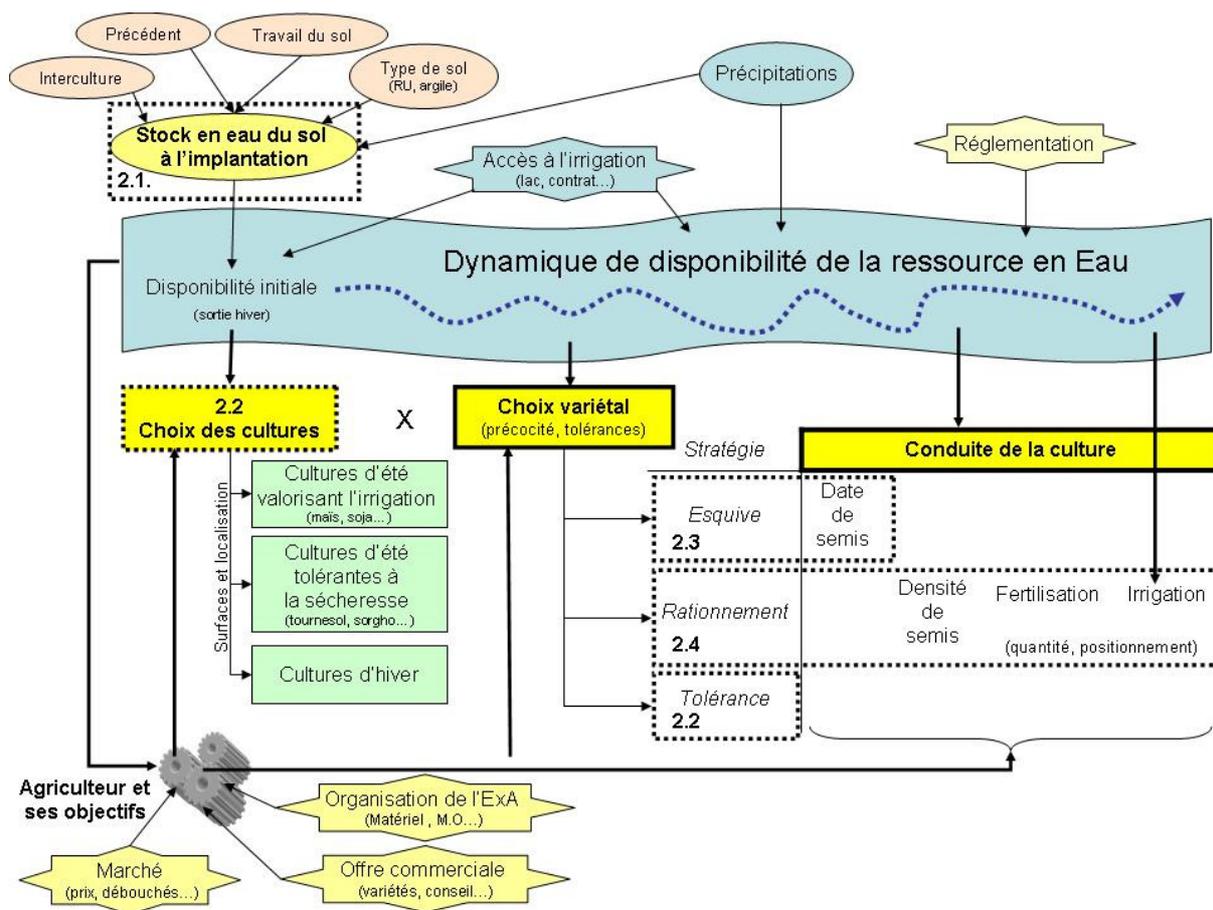
- *en l'absence d'irrigation, comment adapter le choix de cultures et de variétés et leur conduite à la réserve en eau du sol, et en particulier aux sols superficiels<sup>1</sup> ?*
- *quelles cultures plus économes en eau substituer au maïs dans la sole irriguée ?*
- *comment adapter l'itinéraire technique du maïs pour réduire le recours à l'eau d'irrigation ?*
- *quelles adaptations des systèmes de culture opérer pour faire face à une moindre disponibilité en eau avec le changement climatique ?*
- *comment gérer l'eau pour les cultures énergétiques ?*

Après avoir analysé les connaissances à notre disposition pour raisonner aujourd'hui l'adaptation des systèmes de culture à la disponibilité en eau, nous présenterons quelques travaux de recherche menés à l'INRA Toulouse dans ce cadre, et ferons le point sur les besoins de recherche dans le domaine.

## **2. Éléments de stratégie pour raisonner les systèmes de culture en fonction de la disponibilité en eau ; connaissances et outils disponibles**

La Figure 1 positionne les principales étapes de la construction d'un système de grande culture dans un contexte où la disponibilité en eau (sol, précipitations, irrigation) est un élément clé de l'élaboration d'une stratégie. Ceci concerne un grand nombre d'exploitations en France : exploitations irriguées (16 %) mais aussi exploitations d'agriculture 'pluviale' du Sud de la Loire, souvent composées de 'petites terres'. Cette figure illustre les multiples compromis à trouver à l'échelle du système de culture qui définiront la cohérence d'une stratégie s'écartant de la recherche de performances maximales et valorisant esquivage, rationnement et tolérance.

<sup>1</sup> 15 % des sols français ont moins de 80 mm de réserve utile, source : INFOSOL, INRA Orléans



**Figure 1** : Principales étapes du raisonnement des systèmes de culture contraints par une disponibilité en eau limitée (les chiffres font référence aux paragraphes correspondants)

### 2.1. Stocker et conserver l'eau dans le sol

Maximiser le stockage de l'eau au semis de la culture est une problématique qui concerne en premier lieu les zones méditerranéennes semi-arides pour lesquelles l'essentiel des pluies est hivernal. Il est ainsi préconisé soit un travail du sol superficiel avec mulch de résidus de culture pour limiter l'évaporation et faciliter l'infiltration en réduisant le ruissellement (Unger et al., 1991), soit d'introduire une jachère nue (plus ou moins longue) pour stocker et conserver l'eau (Figure 2). Dans les régions semi-arides, c'est même la décision de semer une culture ou d'installer une jachère qui dépend de la réserve en eau du sol au semis.

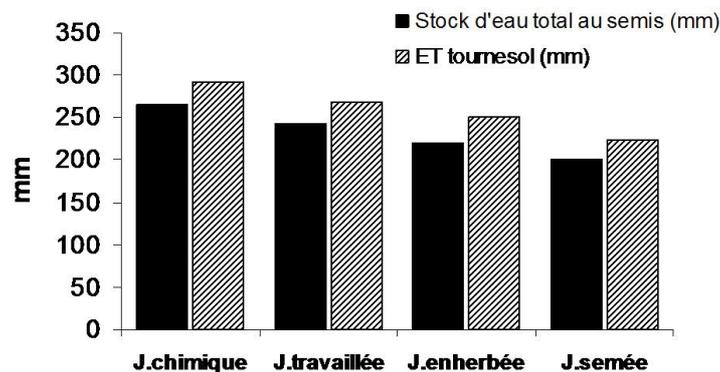
Si la fréquence des sécheresses d'automne-hiver devait augmenter dans nos conditions européennes, ces techniques de conservation pourraient alors être considérées. Dans l'état actuel, la fréquence de recomblement de la réserve en eau en sortie d'hiver reste élevée sauf en sols profonds et/ou après des précédents à forte extraction en profondeur comme le tournesol ou la luzerne (Debaeke et Cabelguenne, 1994)<sup>2</sup>. Ajoutons cependant qu'un profil hydrique trop proche de la capacité au champ à l'automne ou au printemps augmente le risque de tassement lors des opérations de semis et de récolte avec des conséquences néfastes en cas de sécheresse printanière ou estivale.

On pouvait craindre que la pratique des cultures intermédiaires pièges à nitrates (CIPAN) contribue à dessécher davantage le profil de sol au printemps. Cependant, en France, l'effet positif des CIPAN sur

<sup>2</sup> Néanmoins, les taux de remplissage hivernaux des sols seraient en tendance plus faibles ces dernières années

la réduction de l'évaporation du sol (et sur l'infiltration) compenserait en moyenne le supplément de transpiration lié au couvert, pourvu que celui-ci soit détruit assez tôt au printemps (Justes et al., 2002).

Dans les régions où la demande évaporative est forte, les expérimentations montrent en général une plus forte humidité du sol dans les premiers horizons pour les techniques culturales simplifiées par rapport aux techniques conventionnelles avec labour, car si l'infiltration est souvent meilleure après labour, l'évaporation y est aussi plus grande. Ce supplément d'humidité en non-labour est probablement utile dans les sols les plus superficiels ou lors de sécheresses printanières précoces évitant ainsi des irrigations trop tôt (Scopel, 1994). En conditions tempérées, un meilleur comportement des cultures face à la sécheresse par la simplification du travail du sol n'est attendu que dans certaines situations (labour tardif et printemps sec, non recombement de la réserve en hiver). On ne peut espérer pour autant une réduction très significative des besoins en irrigation.



**Figure 2** : Effet du mode de gestion de l'interculture blé – tournesol (jachère) sur le stock en eau au semis du tournesol et sur sa consommation (Meknès, Maroc), Debaeke et Aboudrare (2004)

J.chimique: traitement glyphosate, non travail du sol ; J.travaillée : hersage début Décembre ; J.enherbée : repousses blé et adventices ; J.semée : semis d'orge mi-October ; différences significatives à  $P < 0.05$  (LSD).

*Dans ce contexte semi-aride, il faut maintenir nue la jachère pour conserver de l'eau pour la culture suivante ; en climat plus humide, les risques de ruissellement et de drainage seraient plus à craindre*

## 2.2. Optimiser le choix de cultures en fonction de la ressource

En l'absence d'irrigation, la clé de l'adaptation à la disponibilité en eau réside dans la diversification des cycles culturaux et des espèces afin de répartir les risques climatiques et de disposer de solutions d'esquive. Le choix des espèces est à adapter à la réserve utile du sol. Dans les petites terres à cailloux, seules les cultures d'hiver (colza, blé ou orge) sont envisageables. En sols moyennement profonds, 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, d'atténuer les risques sanitaires et, pour ce qui nous intéresse ici, les risques climatiques. En sols de vallées profonds, les possibilités de diversification sont maximales.

A l'échelle de l'exploitation, une diversification de la sole irrigable peut être recherchée pour mieux ajuster la demande en eau globale à la disponibilité en irrigation (en volume et dans le temps), aux moyens d'arrosage (matériel, main d'œuvre), et à la rentabilité des productions (Deumier et al., 1996). Comme ce sont surtout les cultures d'été qui mobilisent de gros volumes d'irrigation, la composition finale de l'assolement (choix des cultures selon les précédents, répartition entre sole irrigable ou non)

est actée au printemps sur la base de la connaissance du stockage hivernal (lacs, barrages) et d'un diagnostic préalable du risque de pénurie estivale.

L'irrigation maximale n'est pas toujours la plus rentable (si l'on tient compte du temps de travail et du coût complet de l'eau) : on peut avoir intérêt à irriguer peu un grand nombre de productions réputées tolérantes à la sécheresse (sorgho, tournesol), jouer sur l'étalement du calendrier d'irrigation par l'introduction de cultures semées tôt au printemps ou en hiver (pois, céréales) et pouvant valoriser au mois de mai une eau peu utilisée par ailleurs. Ainsi, en Poitou-Charentes, l'irrigation des céréales à paille (ou du pois) avec un objectif de rendement élevé est une alternative à la diminution de la surface en cultures d'été irriguées (Bouthier, 2005). Les années sèches, dans un contexte de disponibilité en eau pour l'irrigation limitée au printemps, un appoint sur ces cultures permet d'assurer un niveau de rendement régulier. De même, dans le contexte de la nouvelle PAC 2006, l'irrigation du tournesol peut être rentable si la ressource ne permet pas de cultiver du maïs sur toute la sole irrigable et dans les situations où une interdiction précoce d'irrigation (début à mi-août) est fréquente, car le tournesol nécessite un petit nombre d'irrigations autour de la floraison (juillet).

Dans les régions à déficit hydrique estival, il est montré depuis longtemps que le rendement du sorgho dépasse celui du maïs en l'absence d'irrigation (Cabelguenne et al., 1982 ; Verdier, 2006). Cette culture est très bien adaptée aux conditions thermiques et hydriques du Sud de la France mais aussi de Poitou-Charentes dès lors que la ressource en eau est limitée. Un observatoire technico-économique mené pendant 3 ans (2002-04) par ARVALIS dans trois régions (Midi-Pyrénées, vallée du Rhône et Poitou-Charentes) indique que le sorgho est compétitif dans les assolements par rapport aux grandes cultures d'été dominantes (maïs et tournesol) (Verdier, 2006). Les marges brutes de ces différentes cultures ont été comparées, les calculs étant réalisés sur la base de la PAC 2006, à savoir un découplage des aides à 75% et avant l'envolée des prix en 2007. En système non irrigué, la marge brute du sorgho est supérieure à celle du tournesol dans les sols à bonne réserve hydrique. En système irrigué, le sorgho est compétitif face au maïs là où le rendement de ce dernier ne dépasse pas 11 t/ha, avec un écart de rendement entre sorgho et maïs jusqu'à 2 t/ha. Par ailleurs, dans le contexte de la nouvelle PAC, le sorgho est une réponse à la nécessaire diversification des rotations.

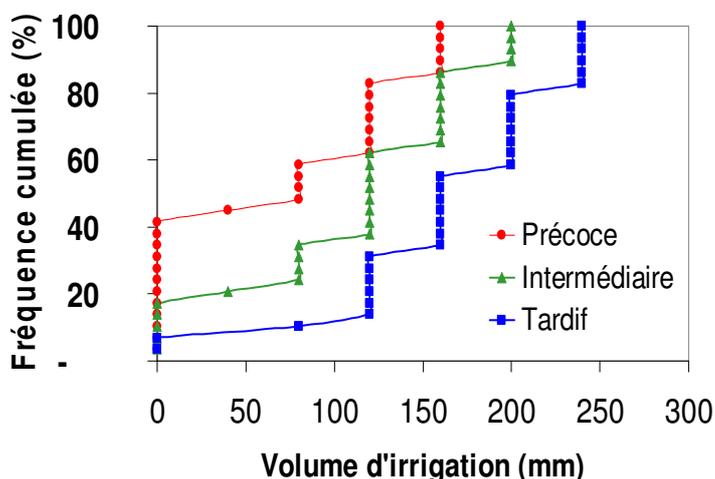
L'outil LORA a été développé par l'INRA et l'ITCF pour optimiser la recherche d'assolement pour la sole irriguée (Jacquin et al., 1993). Cet outil se base sur un concept déjà ancien : les fonctions eau-rendement (Cabelguenne et al., 1982), qui prédisent la production d'une culture en fonction du taux de satisfaction du besoin en eau, considérant ainsi que l'eau est le seul facteur limitant du rendement. L'optimisation se fait sur un critère de marge économique sous contrainte de débit et volume d'irrigation d'une part, de main d'œuvre d'autre part. Des actualisations et des adaptations régionales ont été apportées à l'outil initial. Il n'en demeure pas moins qu'une extension à la sole non irriguée serait souhaitable, avec une approche plus intégrée de ce qui constitue la réponse à l'eau des cultures, en particulier en s'appuyant sur la modélisation dynamique des cultures.

L'outil LORA est cependant mobilisé lors de changements importants de contexte liés à la ressource en eau ou aux conditions de production (prix). Ainsi, des travaux récents menés en Poitou-Charentes et Vendée par ARVALIS avec le logiciel LORA ont testé les conséquences de la PAC 2006, d'une diminution des quotas et de restrictions d'irrigation en cours de campagne pour 8 fermes types (Druesne et al., 2006) : la substitution du maïs par le sorgho, le tournesol ou les céréales à paille dans le cas d'une réduction de 15 à 30 % du volume d'irrigation n'est intéressante que pour les exploitations ayant un faible quota initial ; néanmoins des pertes de revenu par rapport à la situation initiale subsistent. Si le quota initial est élevé, c'est le maïs en conduite restrictive qui conserve une place importante. Si les restrictions estivales deviennent plus fréquentes, c'est la part des cultures irriguées au printemps qui doit augmenter dans l'assolement.

### 2.3. Esquiver la sécheresse

La stratégie d'esquive consiste à décaler les stades phénologiques les plus sensibles au déficit hydrique (souvent la floraison) par le choix de variétés précoces ou de semis anticipés (Debaeke et Aboudrare, 2004). Dans un contexte de dates d'arrêt très précoces de l'irrigation de fin de cycle (arrêtés préfectoraux) et d'épuisement progressif de la réserve hydrique, la stratégie d'esquive du stress par avancée des stades les plus sensibles du maïs est une adaptation souvent suggérée. Aussi, en Poitou-Charentes sur sol de groies, une étude a été conduite par ARVALIS en 2005 pour tester cette stratégie dans un contexte climatique très propice à l'esquive (Lorgeou et al., 2006). L'utilisation de variétés demi-précoces (au lieu de variétés demi-tardives ou tardives) en situation restrictive en eau dès la fin juillet est (i) autant voire plus rentable que la conduite habituelle, et permet (ii) l'économie du dernier tour d'eau, (iii) une économie de frais de séchage qui compense en partie la baisse de rendement due à la précocité, (iv) une avancée des dates de récolte (effet positif sur la structure du sol et l'étalement des travaux). En 2005, le gain de rendement net (séchage inclus) a été de 4-5 q/ha pour les variétés demi-précoces avec arrêt précoce fin juillet, alors qu'en situation potentielle (irrigation sur tout le cycle), la perte est de 4-6 q/ha pour ces mêmes variétés comparées aux variétés plus tardives. Les expérimentations sur ce thème se poursuivent pour en confirmer l'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), rendant plus difficile un semis plus précoce pourtant nécessaire pour maximiser l'intérêt d'une esquive.

L'utilisation de modèles de simulation comme STICS permet de simuler les besoins en eau d'irrigation pour différentes précocités variétales (Debaeke, 2004). Un exemple est donné ici pour le blé d'hiver à Avignon en climat méditerranéen et pour un sol de 165 mm de réserve utile (Figure 3): les besoins médians sont respectivement de 80, 120 et 200 mm avec l'allongement du cycle végétatif. Dans 40 % des cas, l'utilisation de variétés précoces permettrait de maximiser le rendement de ces variétés sans recourir à l'irrigation alors que pour des variétés tardives (peu utilisées), l'irrigation serait requise dans 90 % des cas.



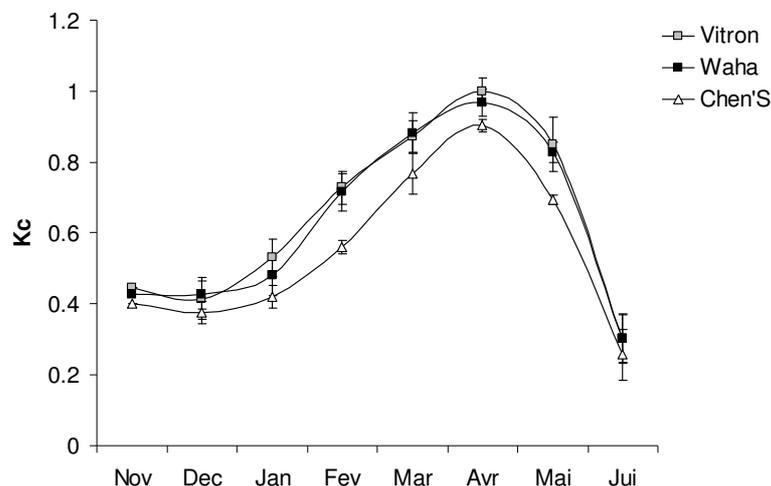
**Figure 3 :** Simulation du besoin en eau d'irrigation pour le blé d'hiver à Avignon en fonction de la précocité d'épiaison de la variété (modèle STICS 4, 1967-2000) - Debaeke (2004)

*La dose d'irrigation est à adapter à la précocité d'épiaison de la variété*

#### 2.4. Réduire les besoins en eau des cultures par une stratégie de rationnement

Par la densité de peuplement et la fertilisation azotée, il est possible de piloter le développement de la surface foliaire dans le sens d'une réduction de la transpiration pendant la période végétative afin de reporter l'eau non consommée vers la phase de remplissage (Passioura, 1977). C'est particulièrement vrai dans les situations où l'eau est abondante dans la première partie du cycle et déficitaire dès la floraison. Ceci peut conduire à utiliser des variétés à indice foliaire modéré ou à faible conductance stomatique (Richards, 2004 ; Casadebaig, 2008). La Figure 4 illustre bien que la variabilité génétique peut être mieux exploitée. Sur cette figure, les 3 variétés de blé dur diffèrent par leur besoin en eau ( $K_c$ ), croissant avec l'indice foliaire potentiel.

Dans le même temps, une fermeture rapide du couvert peut être recherchée pour réduire l'évaporation du sol et contrôler les adventices (Soltani et Galeshi, 2002), stratégie qui passe par l'utilisation de variétés précoces, mais aussi par des interrangs étroits, des densités de peuplements élevées, une fertilisation azotée suffisante.



**Figure 4** : Comparaison du coefficient cultural pour 3 variétés de blé dur en Algérie (4 années).

*Les variétés cultivées peuvent différer par leur besoin en eau (Bouthiba et al., 2008)*

Du fait de ces effets contradictoires, seul un modèle de simulation dynamique représentant correctement les processus en jeu et prenant en compte la variabilité climatique et l'intensité des contraintes, permet d'évaluer les stratégies de rationnement (et d'esquive) dans nos conditions de milieu, car l'expérimentation classique ne peut prendre en charge seule l'extrême variabilité inter-annuelle et intra-saisonnière des précipitations, la grande variabilité des sols, la gamme très large des scénarios cultureux à tester et les interactions qui en résultent (Sivakumar et Glinni, 2002 ; Debaeke, 2004). Un exemple de l'utilisation de modèle pour raisonner une stratégie de choix variétal pour différents niveaux de contrainte hydrique sera développé plus loin (§ 3.2).

### 3. Deux exemples de travaux menés à l'INRA sur la mise au point de stratégies culturales adaptées à la disponibilité en eau.

#### 3.1. Adapter le choix de cultures et les itinéraires techniques à la disponibilité en eau d'irrigation : le dispositif «Systèmes de Grandes Cultures Intégrés » (SGCI) de Toulouse

A partir d'une prospective régionale en Midi-Pyrénées, trois contextes de production différant par la disponibilité en eau d'irrigation ont été identifiés.

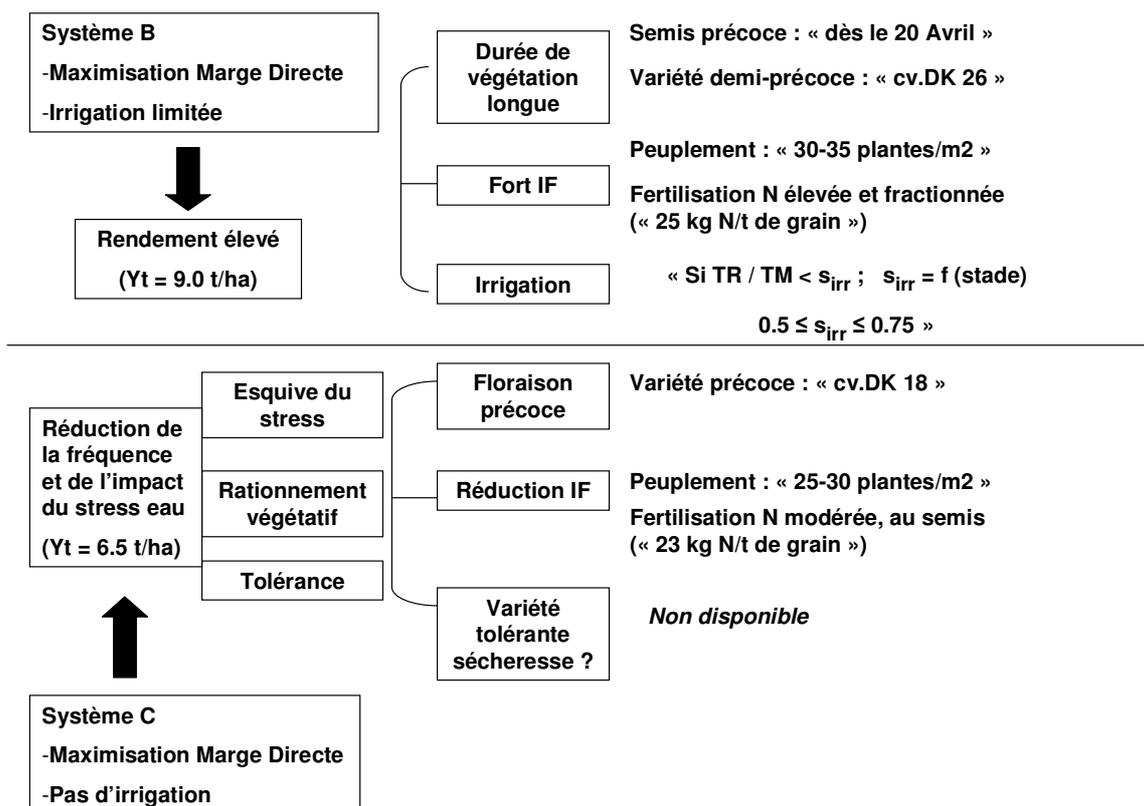
En A, l'eau d'irrigation (240 mm en moyenne pour les cultures d'été) et la main d'œuvre ne sont pas limitantes ; en B, l'accès à la ressource est plus réduit (120 mm) et la main d'œuvre limitante (grande exploitation) ; enfin, en C, il n'y a pas d'irrigation et l'agriculteur est peu disponible (pluri-activité).

Pour répondre à ces cahiers des charges, des stratégies agronomiques contrastées ont été proposées pour chaque système (Tableau 1). Des règles de décision ont été construites pour le choix de cultures et de variétés, ainsi que pour les autres opérations culturales (Nolot et Debaeke, 2003 ; Debaeke et al., 2005).

**Tableau 1** : Stratégies agronomiques en réponse à la disponibilité en eau d'irrigation de 3 systèmes

Système	Stratégie agronomique
A – Productif et propre Eau d'irrigation : 240 mm « Productivité et prévention des fuites azotées »	<input type="checkbox"/> Viser le rendement potentiel ou une qualité particulière <input type="checkbox"/> Satisfaire des besoins en eau, azote et protection phytosanitaire, mais sans majoration d'assurance sur les intrants <input type="checkbox"/> Choisir cultures et variétés les plus productives (éventuellement tardives et moins tolérantes aux stress biotiques et abiotiques) : maïs, soja, pois de printemps, blé dur.
B – Extensif et technique Eau d'irrigation : 120mm « Valorisation optimale de ressources limitées »	<input type="checkbox"/> Réduire le besoin en eau, le niveau de protection phytosanitaire, les charges opérationnelles et le temps de travail <input type="checkbox"/> Rationner par l'eau, l'azote et la densité de peuplement, pour réduire la surface foliaire en phase végétative : tolérer des carences temporaires en azote et eau. <input type="checkbox"/> Rationner correctement pour assurer un bon compromis entre maintien de la productivité et baisse des charges (régularité de rendement et qualité, maîtrise de l'itinéraire technique). <input type="checkbox"/> Choisir des cultures et variétés tolérantes : sorgho, tournesol, pois d'hiver, blé dur
C – Rustique et simple Non irrigué « Préserver l'outil de production »	<input type="checkbox"/> Rationner (objectif de rendement réduit) et esquiver les problèmes agronomiques <input type="checkbox"/> Maintenir la fertilité physico-chimique et biologique du milieu à moyen terme <input type="checkbox"/> Choisir les cultures et variétés les plus tolérantes aux stress en eau et en azote, et aux maladies, et des successions longues atténuant les risques parasitaires.

On peut illustrer la construction de ces règles sur le sorgho-grain en systèmes B et C (Figure 5). Ainsi, en B, l'irrigation permet de viser de hauts rendements, accessibles par une durée de végétation plus longue (variété plus tardive) et une interception du rayonnement plus élevée (dose d'azote et densité de peuplement plus élevées). A l'inverse, le risque de contrainte hydrique en C justifie le choix d'une variété plus précoce, et d'un niveau d'intrants plus modéré, en privilégiant ainsi les logiques d'esquive et de rationnement. Le recours à l'irrigation en B permet aussi un meilleur ajustement dans le temps de l'offre en azote par le fractionnement des apports. L'application de ces règles a conduit à une irrigation moyenne de 125 mm (de 50 à 190 mm selon les années). De même, les doses d'azote moyennes ont été de 120 kg N.ha<sup>-1</sup> en B et de 50 kg N.ha<sup>-1</sup> en C. A titre de comparaison, le maïs en A, a reçu 190 mm d'irrigation et 195 kg N.ha<sup>-1</sup>.



**Figure 5** : Construction des règles de décision pour deux sorghos selon l'accès à l'irrigation (Debaeke et al., 2006).

Les systèmes ont été évalués à Auzeville pendant huit ans (1995-2002) en sol alluvial profond de texture argileuse à limono-argileuse (RU = 180 à 250 mm), selon une démarche combinant diagnostic agronomique, essais factoriels et simulation dynamique (Nolot et Debaeke, 2003).

A l'aide d'une feuille de calcul construite à partir d'une synthèse des résultats produits sur le dispositif SGCI, on peut accéder à une simulation d'assolements pour différentes disponibilités en eau d'irrigation. Les systèmes ont été évalués sur plusieurs critères : rendement, eau utilisée, marge directe selon des variantes de climat, de type de sol, et de prix des intrants (eau, N) et des récoltes.

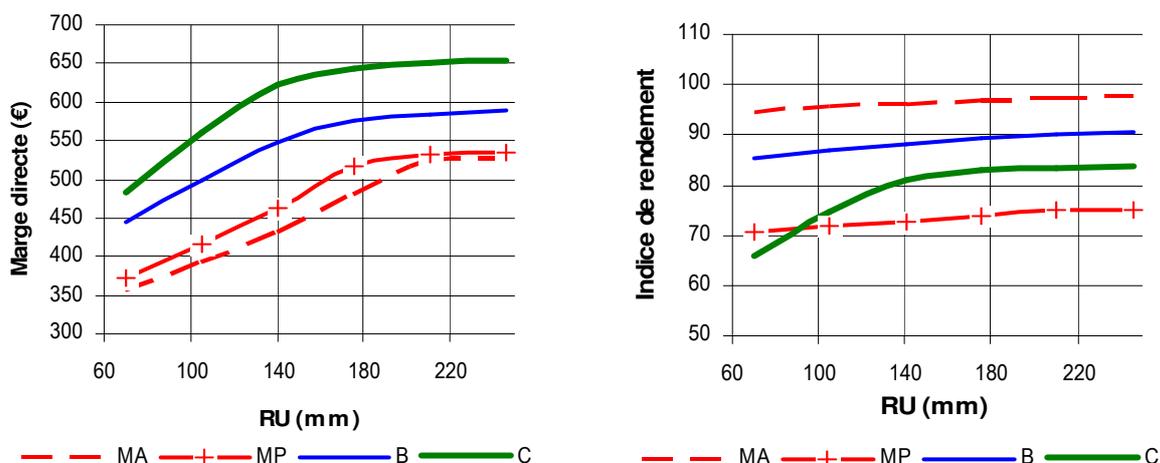
A titre d'exemple, on compare quatre systèmes :

- monoculture de maïs irriguée (100 % été), notée MA,

- monoculture de maïs utilisant des variétés précoces, conduite rationnée (densité de semis, irrigation et fertilisation moindre), notée MP (100 % été),
- rotation sorgho-tournesol-pois-blé dur (avec irrigation de complément, 50 % été), notée B
- rotation colza-blé dur-tournesol-blé dur (25 % cultures été, sans irrigation), notée C

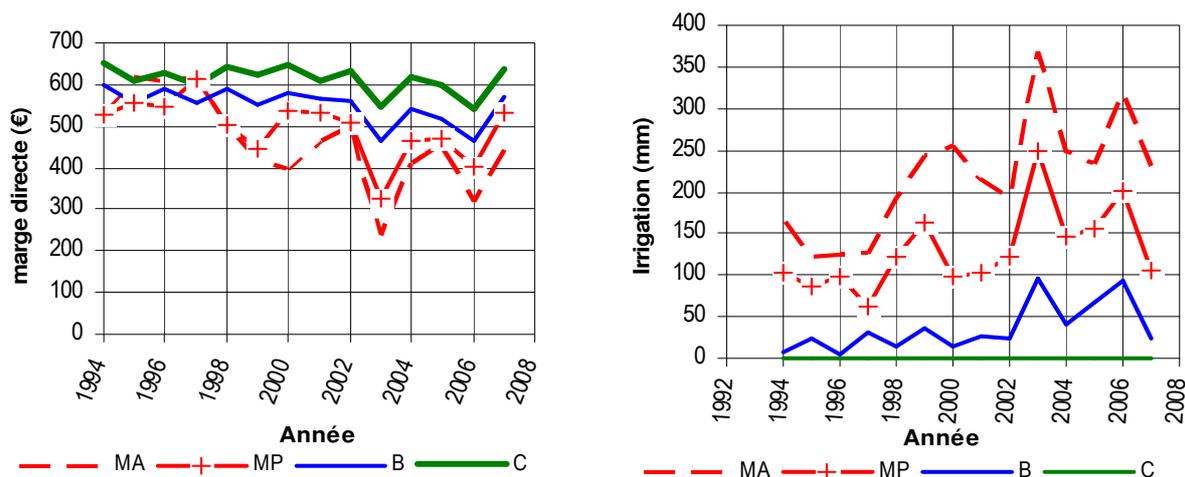
Dans cette simulation, l'irrigation des cultures est raisonnée pour un taux de satisfaction du besoin en eau plus ou moins élevé entre systèmes mais constant entre années : ainsi, en irrigué, le niveau de stress varie peu d'une année à l'autre, contrairement au volume d'irrigation. On ne fixe pas de volume d'irrigation maximum, le rationnement étant inclus dans les règles de décision.

On présente et commente ci-dessous quelques courbes de réponse (rendement, marge directe, irrigation) des quatre systèmes de culture aux variantes de sol, de climat et de prix (Figures 6-8).



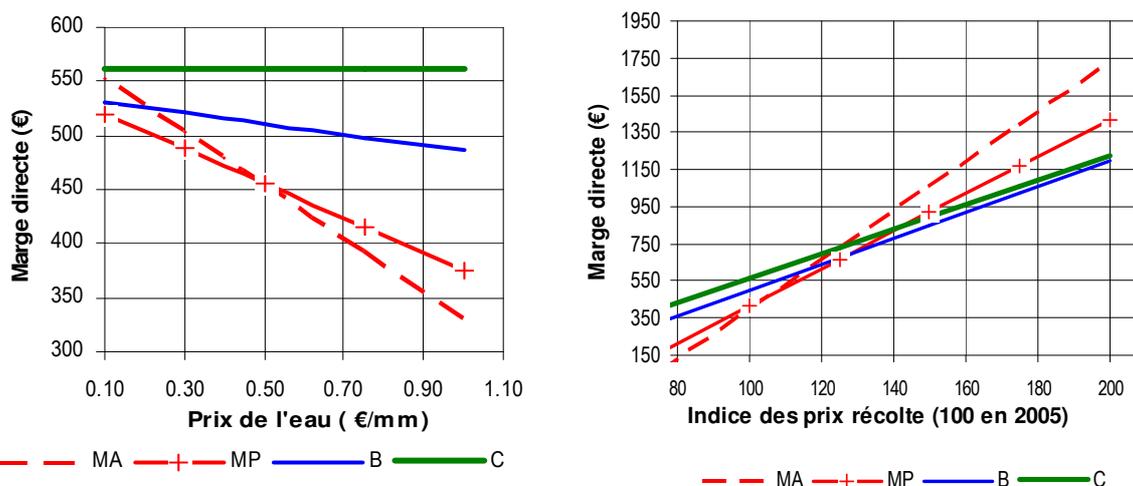
**Figure 6** : Marge directe (produit brut – [charges opérationnelles + charges matérielles]) et indice de rendement (en % du rendement potentiel de chaque culture), en fonction de la réserve utile (RU). (Contexte : prix 2005, climat moyen 1994-2007, eau à 0.75 €/mm)

Dans ce contexte, quelle que soit la réserve utile, le système C (sans irrigation et avec une forte part de blé dur) est le plus rentable. Le maïs irrigué de façon non limitée est le système le moins rentable. Le maïs précoce et rationné, en dépit de son faible indice de rendement, obtient des résultats économiques équivalents à MA. On note une rupture pour des valeurs de RU de 140 mm : en dessous de cette valeur, l'indice de rendement chute en système non irrigué, et la marge directe en système irrigué décroît également en lien avec de forts besoins d'irrigation satisfaits de façon coûteuse.



**Figure 7 :** Influence de la variabilité interannuelle du climat sur la marge directe et le volume d'eau utilisé pour l'irrigation (Contexte : prix 2005, RU 105 mm, eau à 0.75 €/mm)

Dans ces conditions de prix, le système C est le plus rentable économiquement quelle que soit l'année climatique. Les plus faibles résultats économiques (systèmes fortement irrigués, années 2003 ou 2006) sont liés à des charges d'irrigation fortes ces années là (années sèches en été). Les systèmes B et C esquivent grandement ces problèmes. On remarque l'accroissement notable des besoins d'irrigation sur les 10 dernières années.



**Figure 8 :** Marge directe en fonction des évolutions possibles du prix de l'eau (valeur 2005 : 0.75 €/mm) et de l'indice des prix de vente des récoltes (base 100 en 2005, évolution identique des prix des différentes cultures) (contexte : RU 105 mm, climat moyen 1994-2007, eau à 0.75 €/mm ou prix récolte 2005)

Un prix de l'eau élevé favorise économiquement des systèmes moins exigeants en eau (par ordre croissant mais rationné, système peu irrigué B, système pluvial C). Dans le contexte actuel de hausse importante des prix, les rapports de force économiques entre les différents systèmes étudiés s'inversent : les systèmes plus économes en eau deviennent moins intéressants face à des systèmes très consommateurs d'eau mais très productifs. L'augmentation du prix des intrants atténue cet effet. Le prix de l'azote peut à nouveau rendre attractifs les systèmes plus économes.

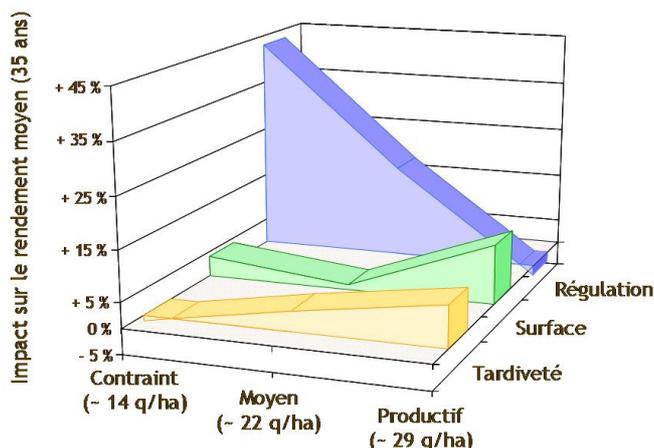
### 3.2. Adapter le choix variétal à la disponibilité en eau: le cas du tournesol

L'expérimentation SGCI a bien souligné la nécessité de raisonner conjointement choix variétal et conduite de culture, avec des modalités variables selon la disponibilité en eau. Cette voie a été explorée plus en détail sur la culture de tournesol, dont on connaît l'intérêt pour les conditions hydriques contraignantes.

A l'aide d'un modèle de simulation construit pour représenter le fonctionnement des variétés de tournesol et en particulier leur comportement vis à vis de la contrainte hydrique, la question de l'adaptation du choix variétal pour différents contextes hydriques a pu être largement explorée (Casadebaig, 2008). Plusieurs traits phénologiques (durée post-floraison), morphologiques (surface foliaire) et physiologiques (vitesse de fermeture stomatique et réduction de l'expansion foliaire) ont été combinés et testés sur des séries climatiques longues et pour différents types de sols couvrant l'aire de production française.

On illustre ici pour trois milieux contrastés (les effets sols et climats sont résumés par le rendement moyen) l'intérêt différentiel des traits variétaux selon la disponibilité en eau. Ainsi, en milieu contraint, on recherchera des variétés à fermeture stomatique précoce, permettant de conserver la ressource en eau du sol ; les variétés seront plutôt précoces avec une surface foliaire suffisante pour ne pas être trop pénalisées par l'effet des contraintes. A l'inverse, en milieu productif, on favorisera les critères maximisant l'interception du rayonnement et la photosynthèse, la transpiration plus précoce étant compensée ici par une bonne disponibilité hydrique tout au long du cycle (sol profond, précipitations). Pour les milieux intermédiaires, la surface foliaire aura moins d'importance que la tardiveté.

On conclut qu'un conseil variétal standard peut être réalisé dans la plupart des régions de production afin de concilier productivité et tolérance à la sécheresse sauf en région méditerranéenne où il faut privilégier l'esquive et le rationnement et en région Centre-Nord où il faut mettre en avant les critères de production potentielle sous réserve de bon contrôle des maladies.



**Figure 9** : Réponse relative du rendement du tournesol pour trois traits observés au sein de la gamme variétale : Régulation (Fermeture stomatique précoce vs tardive), Surface (Surface foliaire forte vs faible), Tardiveté (Durée post-floraison longue vs. courte) et pour trois milieux différenciés par leur rendement accessible.

*Les caractéristiques à privilégier dans le choix d'une variété dépendent de la disponibilité hydrique du milieu*

## 4. Quelles recherches mener pour adapter les systèmes de culture à une plus faible disponibilité en eau ?

### 4.1. *Rapide historique des recherches menées à l'INRA sur cette question*

**1970-90** : Les premiers travaux ont porté sur les méthodes destinées à satisfaire le besoin en eau des cultures par l'irrigation (dans un contexte de ressource non limitée), d'où le développement d'indicateurs hydriques au niveau sol et plante en vue du pilotage. L'étude de la réponse à l'eau des cultures et du repérage de phases sensibles a été une activité importante durant cette période (construction d'un référentiel encore largement utilisé aujourd'hui).

**1990-2000** : Puis, les contraintes de ressource en eau qui sont apparues (sécheresse, tensions sur les usages) ont orienté les travaux sur la recherche de calendriers d'irrigation optimaux et sur l'allocation optimale de l'eau entre cultures de l'exploitation, sachant que les irrigants n'ont jamais les moyens techniques de satisfaire le besoin des cultures à l'ETM, et que les rapports de prix et le coût de l'eau déterminent le choix des cultures à irriguer.

Dans le même temps, l'échelle parcellaire n'a plus été jugée suffisante pour traiter des problèmes de ressource limitée ; des travaux ont été menés avec les économistes de l'exploitation pour prendre en compte les contraintes d'organisation du travail à cette échelle.

Le développement des modèles de simulation dynamique sol-plante (EPIC, CERES, CropSyst, STICS,...) a permis d'évaluer des scénarios techniques variant par la disponibilité en eau (climat, sol, irrigation), en permettant une approche plus intégrée des besoins en eau (modulation de l'apport d'eau selon la conduite du peuplement). Des expérimentations « systèmes de culture intégrés » à base de règles de décision ont permis de vérifier le bien-fondé de cette approche.

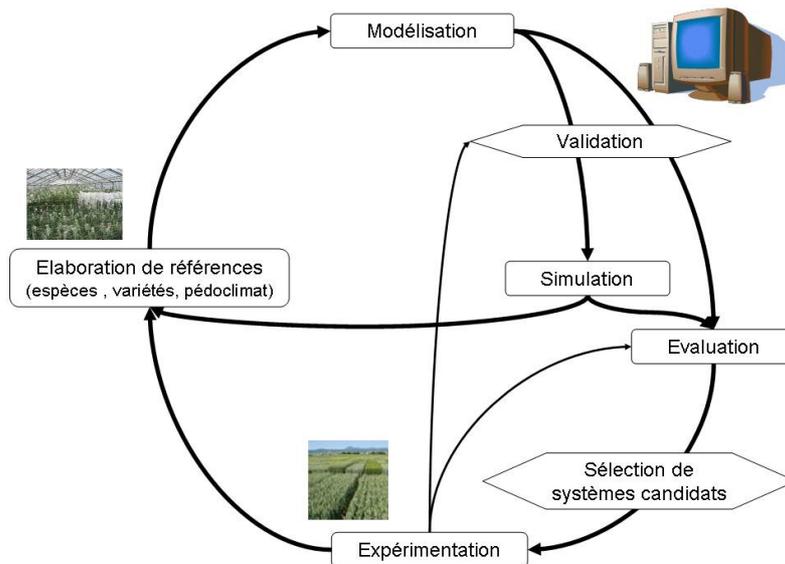
**Depuis 2000** : Des modèles bio-décisionnels (ex.Moderato) ont été proposés basés sur l'explicitation de règles de décision pour l'irrigation. Des travaux ont porté sur la prévision de la demande en eau régionale. De plus en plus, les modèles de culture prennent en compte la variabilité génétique donnant accès à une évaluation des stratégies d'esquive, d'évitement et de tolérance.

L'échelle de l'exploitation agricole pour la gestion des ressources en eau a été abandonnée depuis 10-15 ans : les outils d'aide à la réflexion stratégique ayant peu évolué depuis en dépit d'un changement de contexte marqué, cet objectif est aujourd'hui celui de l'UMT construite en 2007 à Toulouse entre l'INRA, Arvalis et le Cetiom.

De nouveaux enjeux questionnent aujourd'hui la gestion quantitative de l'eau : changement climatique, cultures énergétiques, « intensification à haute valeur écologique »....

### 4.2. *Proposition d'une démarche de recherche pour mieux raisonner les systèmes de culture en fonction de la disponibilité en eau*

La démarche de recherche proposée est itérative (Figure 10) :



**Figure 10 :** Démarche de recherche pour améliorer l'adaptation des systèmes de culture à diverses disponibilités en eau

Elle combine :

- élaboration de références pour une meilleure évaluation de la réponse des cultures et des variétés à la contrainte hydrique.

Les domaines suivants ont été identifiés :

- établissement de protocoles pour une évaluation variétale en routine dans le cadre des procédures d'inscription (comportement des nouvelles variétés face au stress hydrique),
  - production de références pour les nouvelles cultures (énergétiques),
- modélisation (et validation) de la réponse à la contrainte hydrique des cultures soumises à une gamme large de systèmes de culture
- prise en compte de la variabilité génétique dans la réponse à la contrainte hydrique,
  - prise en compte des processus d'adaptation liés à des combinaisons variées de contraintes,
  - prise en compte du travail du sol dans la dynamique de l'eau,
  - collaboration avec des équipes du bassin méditerranéen,
- mise en place de dispositifs d'évaluation virtuelle pour trier les systèmes de culture candidats et en sélectionner les plus prometteurs
- élaborer un simulateur de systèmes de culture,
  - l'utiliser avec les acteurs du développement pour concevoir et tester ex ante des systèmes candidats innovants en matière de consommation d'eau (et d'intrants).
- expérimentation au champ (en station ou en réseau de parcelles) de systèmes de culture adaptés *ex ante* à la raréfaction des ressources en eau
- réseau associant différents contextes (petites terres du Centre, coteaux du Sud-ouest, situations méditerranéennes,...) et différents acteurs de la recherche et du développement.

## Conclusion

La gestion de l'eau quantitative est encore trop abordée dans le cadre strict de la réponse à l'eau des cultures (en vue notamment de l'irrigation). Elle devrait être aussi considérée suivant les deux perspectives suivantes :

- dans le cadre d'une production agricole intégrée qui considère les interactions entre l'eau et les autres techniques (travail du sol, fertilisation, protection phytosanitaire,...)
- dans le cadre d'une gestion intégrée de la ressource en eau à l'échelle d'un paysage et d'un territoire afin de pouvoir prendre en compte les interactions entre l'ensemble des acteurs concernés qui sont mutuellement interdépendants.

## Références bibliographiques

- Agreste, 2005. L'irrigation, un outil de développement en voie de stabilisation, Agreste Aquitaine, n°3, Mars 2005.
- Amigues J.P., Debaeke P., Itier B., Lemaire G., Seguin B., Tardieu F., Thomas A. (éditeurs), 2006. Sécheresse et agriculture. Adapter l'agriculture à un risque accru de manque d'eau. Rapport de l'expertise scientifique collective, INRA, Paris.
- Blum A., 2005. Les prélèvements d'eau en France et en Europe. Les données de l'environnement, IFEN, n°104.
- Bouthiba A., Debaeke P., Hamoudi S.A., 2008. Varietal differences in the response of durum wheat (*Triticum turgidum* L. var. durum) to irrigation strategies in a semi-arid region of Algeria. *Irrigation Science* 26, 239-251.
- Bouthier A., 2005. Irrigation des céréales : pour sécuriser rendement et qualité. *Perspectives Agricoles* 313, 68-71.
- Cabelguenne M., Marty J.R., Hilaire A., 1982. Comparaison technico-économique de la valorisation de l'irrigation par 4 cultures d'été. *Agronomie* 2, 567-576.
- Casadebaig P., 2008. Analyse et modélisation des interactions génotype - environnement – conduite de culture : application au tournesol. Thèse de doctorat, INP Toulouse.
- Cooper P.J.M., Gregory P.J., 1987. Soil water management in the rain-fed farming systems of the Mediterranean region. *Soil Use and Management* 3, 57-62.
- Debaeke P., 2003. Supplemental irrigation. In : B.A. Stewart, T.Howell (eds), *Encyclopedia of Water Science*, Marcel Dekker, Inc., New York, p 537-539.
- Debaeke P., 2004. Scenario analysis for cereal management in water-limited conditions by the means of a crop simulation model (STICS). *Agronomie* 24, 315-326.
- Debaeke P., Aboudrare A., 2004. Adaptation of crop management to water-limited environments. *European Journal of Agronomy* 21, 433-446.
- Debaeke P., Amigues J.P., 2008. Face à la sécheresse et à la pénurie d'eau, quelles mesures pour ajuster la demande agricole à l'offre de ressource en eau ? *La Houille Blanche* (sous presse).
- Debaeke P., Bertrand M., 2008. Evaluation des impacts de la sécheresse sur le rendement des grandes cultures en France. *Cahiers Agricultures* (sous presse).
- Debaeke P., Cabelguenne M., 1994. Influence of previous crop on available water for a subsequent winter wheat on a deep silty clay soil. *Proceedings of the 3rd ESA Congress, Padova (Italy)*, 682-683.
- Debaeke P., Nolot J.M, Raffaillac D., 2005. Mise au point de systèmes de culture adaptés à la ressource en eau : enseignements tirés de l'expérimentation SGCI de Toulouse (1995-2002).

Comptes-Rendus de l'Académie d'Agriculture de France, Séance du 9 Nov 2005, [www.academie-agriculture.fr](http://www.academie-agriculture.fr) (publication en ligne)

Debaeke P., Nolot J.M., Raffaillac D., 2006. A rule-based method for the development of crop management systems applied to grain sorghum in south-western France. *Agricultural Systems* 90, 180-201.

Deumier J.M., Balas B., Leroy P., Jacquin C., 1996. Maîtrise des systèmes irrigués. Gestion d'un équipement existant. *Comptes-Rendus de l'Académie d'Agriculture de France* 82, 89-102.

Dregne H.E., Willis W.O. (eds), 1983. *Dryland Agriculture*. ASA Monograph 23. American Society of Agronomy, Madison, Wisconsin, USA.

Druesne C., Baudart C., Bouthier A., Clouté G., Leclech N., Moynier J.L., Renoux J.P., Fournier C., 2006. Irrigation : anticiper les restrictions d'eau. *Perspectives Agricoles* 322, 19-33.

Dubuisson B., Moisselin J.M., 2006. Evolution des extrêmes climatiques en France à partir des séries observées. *La Houille Blanche*, 6, 42-47

Dufresne J.L. (et 30 co-auteurs), 2006. Simulation du climat récent et futur par les modèles du CNRM et de l'IPSL. *La Météorologie* 55, 45-59.

Gerik T., Freebairn D., 2004. Management of extensive farming systems for drought-prone environments in North America and Australia. *Proceedings 4<sup>th</sup> International Crop Science Congress, Brisbane (Australia)*, [www.cropscience.org.au](http://www.cropscience.org.au), 9 p

Gleyses G., Rieu T., 2004. *L'irrigation en France. Etat des lieux 2000 et évolution*. Cemagref Editions.

Jacquin C., Deumier J.M., Leroy P., 1993. LORA et la gestion de l'eau dans l'exploitation agricole. *Perspectives Agricoles* 184, 73-82.

Justes E., Dorsainvil F., Thiébeau P., Alexandre M., 2002. Effect of catch crops on the water budget of the fallow period and the succeeding main crop. *Proceedings 7th ESA Congress, Cordoba (Spain)*, 503-504.

Lorgeou J., Bouthier A., Renoux J.P., Clouté G., 2006. Stratégie d'évitement en maïs-grain pour le Centre-Ouest : adapter le cycle aux contraintes hydriques par la précocité ? *Perspectives Agricoles* 321, 62-68.

Nolot J.M., Debaeke P., 2003. Principes et outils de conception, conduite et évaluation de systèmes de culture. *Cahiers Agricultures* 12, 387-400.

Passioura J.B., 1977. Grain yield, harvest index and water use of wheat. *Journal of Australian Institute of Agricultural Science* 43, 117-120.

Richards R.A., 2006. Physiological traits used in the breeding of new cultivars for water-scarce environments. *Agricultural Water Management* 80, 197-211.

Scopel E., 1994. Le semis direct avec paillis de résidus dans la région de V. Carranza au Mexique : intérêt de cette technique pour améliorer l'alimentation hydrique du maïs pluvial en zones à pluviométrie irrégulière. Thèse de doctorat, INA PG.

Sivakumar M.V.K., Glinni A.F., 2002. Applications of crop growth models in the semiarid regions. In : Ahuha L.R., Ma L., Howell T.A. (eds), *Agricultural System Models in Field Research and Technology transfer*, 178-205. Lewis Publishers, CRC Press, Boca Raton, FL, USA.

Soltani A., Galeshi S., 2002. Importance of rapid canopy closure for wheat production in a temperate sub-humid environment : experimentation and simulation. *Field Crops Research* 77, 17-30.

Teyssier F., 2006. Consommations d'eau pour l'irrigation sur 2001-2005 en Midi-Pyrénées. *Agreste Midi-Pyrénées, Données n° 35*.

Tiercelin J.R. (ed), 1998. *Traité d'irrigation*. Lavoisier TEC & DOC, Paris.

Unger P.W., Stewart B.A., Parr J.F., Singh R.P., 1991. Crop residue management and tillage methods for conserving soil and water in semi-arid regions. *Soil Tillage Research* 20, 219-240

Verdier J.L., 2006. Le sorgho trouve sa place dans les assolements du Sud de la France. Dossier Sorgho, ARVALIS, [www.arvalisinstitutduvegetal.fr](http://www.arvalisinstitutduvegetal.fr)

## **Améliorer la tolérance à la sécheresse du tournesol : apports de l'écophysiologie et de la génétique.**

Philippe Grieu<sup>(1)\*</sup>, Pierre Maury<sup>(1)</sup>, Philippe Debaeke<sup>(2)</sup>, Ahmad Sarrafi<sup>(3)</sup>

(1) ENSAT INPT, UMR AGIR (Agrosystèmes et Développement Territorial), BP 32607 31326 Castanet-Tolosan Cedex

(2) INRA, UMR AGIR (Agrosystèmes et Développement Territorial), BP 52627, 31326 Castanet-Tolosan Cedex

(3) ENSAT INPT, S2P (Symbiose et Pathologie des Plantes), BP32607 31326 Castanet-Tolosan Cedex

\* : Correspondant : [grieu@ensat.fr](mailto:grieu@ensat.fr)

### **Résumé**

Le tournesol est une culture d'intérêt que l'on rencontre dans des situations de sécheresse et de sols pauvres. Il est considéré adapté à la sécheresse, bien que les bases physiologiques et les efforts d'amélioration pour la tolérance à la sécheresse restent encore insuffisants. Les agronomes qui conçoivent des modèles de culture et les généticiens n'ont pas, jusqu'à présent, partagé la même vision du choix de génotype pour améliorer une production. Cependant, il est désormais reconnu que pour améliorer efficacement cette sélection, une démarche d'interdisciplinarité est nécessaire. Cet article présente quelques travaux mettant en jeu une collaboration entre modélisateurs, écophysiologistes et généticiens pour étudier les interactions génotype x environnement. Les principaux processus physiologiques et leur intégration sont décrits. La première approche présente les réponses de la plante à la sécheresse en termes de stratégies d'adaptation conditionnées par le génotype et l'environnement (y compris la conduite de culture comme par exemple l'avancée des dates de semis). La deuxième approche propose l'utilisation de modèles dynamiques comme moyen d'étude des interactions génotype x environnement. L'article présente quelques progrès significatifs d'études sur le tournesol et l'intégration des connaissances pour améliorer la sélection et la conduite de culture.

### **Abstract**

Sunflower is a valuable crop in dry conditions already removed on poor soils without irrigation. Sunflower is considered well-adapted to drought, although systematic analyses of the physiological bases of it, and purposeful attempts to breed for greater drought tolerance are still limited. Crop modellers and geneticists have developed a vision of their roles in plant breeding from their own perspective. However, to improve breeding efficiency, interdisciplinary collaboration becomes increasingly important. Opportunities for collaboration between crop modellers, ecophysiologists and geneticists are explored in this article, to propose powerful tool to resolve genotype x environment interactions. Several views of the integration of physiological responses will be discussed. The first looks at basic responses and considers how linkages can be strengthened by genotype or management (e.g., early sowing). The second introduces simulation modelling as a way to study genotype x environment interactions. The article focuses on significant progress to the study of sunflower and to the integration of knowledge to assist plant improvement and crop management.

## 1. Le programme Tournesol 2010 : Quelles stratégies agronomiques et génétiques pour améliorer la productivité du tournesol en présence de contraintes hydriques ?

Ces dernières années, les débouchés de la culture de tournesol se sont diversifiés d'un point de vue industriel (lipochimie, biomatériaux) et énergétique. Ces dernières années, la production d'huiles végétales en Europe a stagné autour de 10 Mt, alors que la consommation a doublé du fait de leur conversion en diester. Ce constat peut s'expliquer par une marge brute insuffisante au regard d'autres productions et par une image de culture à bas niveaux d'intrants chimiques et minéraux qui peut décourager certains organismes d'approvisionnement. De ce fait, la culture a tendance à être restreinte aux conditions pédoclimatiques difficiles (sols peu profonds, situations non irriguées) où la réponse à l'intensification est limitée. On constate donc que le rendement de la culture, après une hausse régulière jusqu'au début des années 90, plafonne actuellement entre 20 et 25 quintaux par hectare dans les principales régions de production en France.

Le potentiel de production constaté en sélection a progressé régulièrement au rythme de 1,3 % par an (Vear *et al.*, 2003) entre 1970 et 2003. Le potentiel actuellement est estimé à 60 q/ha. Or, les surfaces nationales de culture du tournesol ont diminué de 42 % de 1990 à 2006. Le différentiel important entre rendement réel et rendement permis par le progrès génétique est surprenant et est spécifique au tournesol. Il contribue ainsi à fragiliser la place du tournesol dans l'assolement en rognant la rentabilité économique de la culture et plus généralement dans la filière.

Indépendamment du progrès génétique réalisé, la performance d'un génotype est très variable selon les conditions pédoclimatiques dans lequel il est cultivé et l'itinéraire technique auquel il est soumis : on parle ainsi d'interactions (IGEC) entre le génotype, l'environnement (sol, climat, bioagresseurs) et la conduite de culture. L'évolution du contexte de production, par le déplacement des zones de cultures et le réchauffement climatique (Ciais *et al.*, 2005), renforce l'importance à accorder à l'adaptation variétale locale plutôt que générale. Il est possible d'espérer un gain de productivité par une évaluation variétale intégrant les aspects d'adaptation spécifique d'un génotype (ou de ses caractéristiques) à un contexte de production donné. Plus concrètement, dans le contexte de sélection actuel, même en disposant d'un génotype performant, certains choix « génotype-milieu-conduite » pourraient se révéler bien plus intéressants que d'autres en termes de rendement ou de teneur en huile.

Plante économe en intrants et adaptée aux situations de contraintes hydriques et de fortes chaleurs, aux débouchés nationaux et internationaux garantis, le tournesol doit donc impérativement améliorer ses performances agronomiques pour rester compétitif sur les exploitations agricoles françaises. Un effort coordonné de Recherche agronomique et de Développement sur cette espèce s'est mis en place pour être en mesure de répondre au Marché (programme Tournesol 2010). Nous disposons en France du premier effort mondial en matière de sélection privée, puisque les moyens déployés autour de Toulouse par Soltis (Euralis/Limagrain), Monsanto (Dekalb) et Syngenta (NK) sont très significatifs. Ces dispositifs de recherche sont sans équivalents dans le monde. Le progrès génétique de cette espèce, confrontée à des défis de performances souvent liés à des problèmes de contraintes abiotiques (sécheresse) est donc dépendant d'un effort de recherche mené en France.

En amont de la sélection, les efforts conjugués de généticiens, de physiologistes, de pathologistes, de biologistes moléculaires et d'agronomes, doivent permettre, dans les 5 à 10 ans à venir, au tournesol de retrouver un gain de rendement significatif.

Un des volets majeurs du programme tournesol 2010 est l'amélioration de la tolérance à la sécheresse de cette espèce.

## 2. Sécheresse : perception et caractérisation

Il existe de nombreuses définitions du terme 'sécheresse'. Tout d'abord, elle se réfère toujours à un déficit de pluviométrie et l'on parle de sécheresse au sens météorologique. Actuellement, cette caractérisation météorologique de la sécheresse est essentiellement limitée à la durée des périodes sans pluie (nombre de jours consécutifs sans pluie). Lorsque ce déficit de pluviométrie est systématique sur une région donnée, cette région devient une zone aride. Dans ce contexte, une plante tolérante à la sécheresse est une plante qui survit à des situations de contrainte hydrique sévère. Hors de ces régions, la sécheresse peut être considérée comme un phénomène climatique aléatoire qui se caractérise davantage par une déviation par rapport à une valeur moyenne de pluviométrie. Dans ce contexte, et pour un agronome, une sécheresse se définit par tout manque d'eau qui ne permet pas aux plantes cultivées d'exprimer le rendement qui serait attendu en situation favorable, ou qui peut affecter la qualité des produits récoltés. Une plante tolérante est dans ce cas, celle qui permet d'atteindre une production aussi élevée que possible dans un scénario donné de sécheresse.

En situation agricole de grandes cultures que l'on rencontre en France, on ne voit pas les plantes cultivées mourir de sécheresse. L'étude de la survie des plantes et des mécanismes sous-jacents d'adaptation n'est pas particulièrement pertinente dans ce cas, bien qu'elle ait fait l'objet de très nombreuses recherches, notamment en termes d'apport des biotechnologies au choix ou à la création de variétés adaptées à la sécheresse. De plus, l'adaptation des espèces cultivées à la contrainte hydrique est très différente d'un contexte pédoclimatique à un autre. En effet, un même manque d'eau ou un même symptôme de sécheresse a des conséquences différentes suivant la période du cycle cultural à laquelle il est appliqué. Il a aussi des conséquences différentes suivant les autres conditions pédoclimatiques pendant la sécheresse : sécheresse de l'air, rayonnement solaire, état nutritionnel du sol. Les conséquences d'une sécheresse en situation agricole de grandes cultures dépendent de l'ensemble du scénario climatique. Les sécheresses se caractérisent donc par leur intensité, leur dynamique de mise en place (brutale ou progressive), leur durée et leur époque d'apparition par rapport au cycle cultural. Ces remarques préliminaires ont une conséquence évidente : il est très difficile expérimentalement ou bien dans des réseaux de parcelles de cerner précisément les caractéristiques de la sécheresse à laquelle l'agronome est confronté. De plus, la caractérisation des milieux et des conduites à l'aide de variables quantitatives et qualitatives est généralement insuffisante.

L'installation d'une sécheresse se manifeste par la combinaison d'une part, de la restriction de la disponibilité en eau du sol et, d'autre part, de l'augmentation de la demande évaporatoire de l'air. L'eau traverse la plante, c'est la transpiration, à cause d'une différence de potentiel hydrique (énergie qu'il faut apporter à l'unité de masse d'eau du sol pour qu'elle passe à l'état d'eau libre) entre l'air et le sol. L'intensité de la sécheresse à un moment donné peut donc être caractérisé physiquement par (i) l'état hydrique du sol et (ii) celui de l'atmosphère. L'état hydrique de l'air est aisé à déterminer. Il dépend du rayonnement solaire, du degré de saturation de l'air en vapeur d'eau (VPD) et de la vitesse du vent. Par contre, dans le sol, il existe une très grande hétérogénéité de l'état hydrique, et de surcroît, sa mesure est difficile à mettre en œuvre, particulièrement au champ. L'état hydrique d'une plante est directement lié à la différence entre le flux d'eau entrant par les racines et celui qui s'échappe par les feuilles au même instant. La sécheresse ressentie par la plante se définit donc, à chaque instant, par les conditions hydriques aux bornes de la plante, dans le sol et dans l'air.

### 3. Réponses de la plante à la sécheresse : mécanismes d'adaptation

Des génotypes soumis aux mêmes contraintes hydriques ne perçoivent pas de la même façon ces contraintes. Des mécanismes très variés, résumés par Tardieu *et al.* (2007) entrent en jeu à des pas de temps différents. De plus, une importante variabilité génotypique est associée à ces mécanismes chez la plupart des espèces cultivées, en particulier chez le tournesol.

#### 3.1 Réponses à court terme

À l'échelle de quelques minutes, la plante peut réduire sa transpiration en fermant ses stomates (pores microscopiques sur les feuilles par lesquels s'effectuent les échanges gazeux ( $H_2O$  et  $CO_2$ )). Ce degré de fermeture des stomates est déterminé par la mesure de la conductance stomatique (gs).

Pour le tournesol, cette régulation semble différente selon que le stade de développement se situe avant ou après l'anthèse (Connor et Hall, 1997). Avant l'anthèse, le tournesol est réputé avoir une fermeture stomatique moins sensible à la sécheresse que la plupart des autres espèces. Par contre, après l'anthèse, la fermeture stomatique est un processus clé du contrôle de l'état hydrique de la plante, et elle devient plus sensible à la contrainte hydrique. La fermeture stomatique s'accompagne d'une réduction de l'assimilation de  $CO_2$  dans les feuilles (par diminution de diffusion) et d'une augmentation de la température des feuilles (le flux transpiratoire contribue à une dissipation de l'énergie radiative incidente) qui peut entraîner une altération des processus photochimiques de la photosynthèse, et la synthèse de composés toxiques à caractères oxydants dans les cellules (stress oxydatif). Or, chez le tournesol, le maintien d'une photosynthèse élevée est un processus majeur pour l'obtention d'un rendement élevé. Des travaux récents (Poormohamad Kiani *et al.*, 2007) menés à Toulouse sur différentes populations de tournesol montrent qu'il existe une forte variabilité génotypique de la conductance stomatique, de l'assimilation nette de  $CO_2$  et du fonctionnement photochimique de la photosynthèse. De plus, des seuils de fermeture stomatique différents selon les variétés ont été mis en évidence (Casadebaig *et al.*, 2008) en fonction de la fraction d'eau transpirable (disponible pour la plante) du sol. Il y a donc une différence génétique de performance des génotypes en termes de contrôle du taux de transpiration (transpiration par unité de surface foliaire).

La régulation de la conductance stomatique reste le mécanisme majeur intervenant à court terme pour limiter les pertes d'eau : le potentiel hydrique foliaire sera maintenu d'autant plus longtemps que la fermeture des stomates est précoce. Celle-ci peut intervenir à des potentiels hydriques foliaires différents en fonction du génotype (Mojayad, 1993) et du stade de développement (Morizet et Merrien, 1990). La régulation de la conductance stomatique dépend, à un instant donné, du potentiel hydrique foliaire et de l'humidité de l'air au champ. Les génotypes à faible conductance sont plus sensibles au déficit de vapeur de l'air et à la baisse du potentiel hydrique foliaire que les génotypes à forte conductance. Une faible conductance est généralement proposée comme un trait favorable à l'adaptation à la sécheresse (Jones, 1979). Si la fermeture des stomates n'est pas totale, en raison de la différence entre les coefficients de diffusion de l'eau et du  $CO_2$  dans la feuille, la transpiration est plus réduite que l'assimilation nette : l'efficacité d'utilisation de l'eau (WUE) est alors augmentée.

En revanche, une telle sensibilité des stomates à la diminution de potentiel hydrique peut augmenter la fréquence des épisodes de photoinhibition. La chaîne de transport des électrons est alors rétro-réglée afin de dissiper l'énergie lumineuse en excès. Il est admis que le photosystème II (PSII) joue un rôle central dans les processus d'utilisation et de régulation de l'énergie lumineuse (Baker, 1991). Lorsque la fixation du  $CO_2$  ne consomme plus assez d'énergie, d'autres voies métaboliques, telles que la photorespiration, peuvent contribuer au maintien du transfert non cyclique des électrons. Lorsque cette 'voie photochimique' est saturée, la dissipation thermique, par l'intermédiaire du cycle des

xanthophylles, joue un rôle important au sein des mécanismes photoprotecteurs en limitant la destruction des PSII (Demmig-Adams et Adams, 1992). Cependant, une augmentation supplémentaire de l'énergie lumineuse absorbée, conduit à une inactivation des PSII plus ou moins réversible, liée à des modifications structurales de la protéine D1 (Critchley et Russel, 1994). Ces modifications du fonctionnement photochimique peuvent être associées à une altération de la biochimie du chloroplaste. En effet, chez le tournesol, la réduction de la concentration intercellulaire en CO<sub>2</sub> peut s'accompagner d'une diminution durable de l'efficacité du chloroplaste à utiliser le CO<sub>2</sub>, même si par la suite, la disponibilité de celui-ci n'est plus limitante (Wise *et al.*, 1991). Cette altération du fonctionnement chloroplastique, plus ou moins rapidement réversible, peut contribuer à réduire le bilan journalier d'assimilation nette de certains génotypes, suite à la dépression de conductance stomatique à la mi-journée ou en période de post-sécheresse.

Le fonctionnement stomatique est également étroitement lié à la conductivité hydraulique des tissus de la plante, notamment des racines. Chez le tournesol, cette conductivité est généralement considérée comme élevée en comparaison d'autres plantes de grandes cultures. Quelques travaux conduits sur le tournesol ont montré le rôle important joué par les aquaporines (protéines trans-membranaires) sur la conductivité hydraulique des racines (Ouvrard *et al.*, 1996).

### 3.2 Réponses à moyen terme (heures, jours)

A l'échelle de quelques heures à quelques jours, la plante peut maintenir la turgescence de ses tissus. Les processus de croissance sont particulièrement sensibles à la déshydratation et la performance des plantes soumises à des contraintes hydriques dépend des capacités d'amélioration de l'acquisition de l'eau, mais également. Elle est liée à la capacité des organes à maintenir leurs fonctions physiologiques (Morgan, 1984). Le maintien de la turgescence au cours du déficit hydrique contribue à limiter les effets négatifs du stress hydrique sur la conductance stomatique et la photosynthèse (Maury *et al.*, 2000), ainsi que sur l'expansion cellulaire (Cosgrove, 1986), la croissance (Barlow, 1986), notamment celle des racines. Des travaux effectués chez le tournesol montrent que l'ajustement osmotique (c'est-à-dire la capacité à accumuler activement des solutés dans les vacuoles des cellules) contribue à la tolérance à la sécheresse (Chimenti *et al.*, 2002).

La croissance foliaire est réduite en cas de déficit hydrique, avant toute réduction de la photosynthèse ou d'autres processus métaboliques (Boyer, 1970). Comme la turgescence est le moteur de la croissance, de nombreux programmes génétiques ont visé à favoriser son maintien lors d'un déficit hydrique *via* l'accumulation de solutés dans la cellule. D'autres mécanismes sont impliqués dans le maintien de la croissance comme la division cellulaire (Granier *et al.*, 2000), les caractéristiques mécaniques des parois cellulaires (Cosgrove *et al.*, 2005), le maintien d'une conductivité hydraulique élevée *via* des protéines membranaires, les aquaporines (Martre *et al.*, 2002) et la signalétique hormonale (Sharp, 2002).

### 3.3 Réponse à long terme (semaines)

A l'échelle de quelques semaines, la plante ajuste sa transpiration par une diminution des surfaces foliaires. Il s'agit d'un mécanisme adaptatif qui consiste à limiter la croissance des tissus foliaires. De la même façon, les racines sont concernées avec une conséquence majeure : le maintien de croissance permet de prospecter des couches de sol plus profondes, là où les réserves d'eau sont plus importantes.

Lors de sécheresses précoces, la réduction de la surface foliaire est associée à une diminution de l'expansion foliaire plus qu'à une sénescence accélérée des feuilles. Cependant, chez le tournesol, cette diminution de la surface assimilatrice peut s'accompagner d'une baisse de rendement si l'indice

foliaire (LAI) chute en-dessous de 2,5 à la floraison (Merrien et Grandin, 1990). Le rendement, corrélé à la durée de vie de la surface foliaire après floraison, est fortement affecté lorsque la sénescence est accélérée par des déficits hydriques tardifs.

L'optimisation de l'absorption d'eau est liée à un ensemble complexe de caractères morphologiques des racines : masse et volume, ramification, profondeur (Ramanjulu et Bartels, 2002). De nombreuses plantes adaptées aux zones arides ne contrôlent que très peu leurs pertes en eau par transpiration, mais possèdent un enracinement très profond capable d'extraire l'eau du sol. La croissance racinaire en conditions sèches peut être maintenue par l'ajustement osmotique qui limite la baisse du potentiel de turgescence (Turner, 1986). Cependant, deux types de raisons limitent beaucoup l'utilisation des critères racinaires par les sélectionneurs (Turner *et al.*, 2001) : l'impraticabilité du criblage au champ pour cette caractéristique sur une grande échelle et la difficulté de corréler des observations au champ à celles qui sont faites en pots. L'absence d'une compréhension précise du rôle exact des racines en conditions de ressources hydriques limitées est un autre facteur limitant à la mise en place d'un système de criblage économe et efficace (Passioura, 1994).

#### 4. Stratégies d'adaptation à la sécheresse chez le tournesol.

Les différents mécanismes adaptatifs combinés entre eux peuvent conférer aux géotypes et variétés étudiés des comportements différents en situation de contraintes hydriques. Ces différents comportements sont habituellement décrits par 2 voire 3 stratégies d'adaptation à la sécheresse (Jones, 1992).

##### 4.1 Eviter la sécheresse

La première façon d'éviter la sécheresse est l'esquive. L'esquive permet à la plante de réduire ou d'annuler les effets de la contrainte hydrique par une bonne adaptation de son cycle de culture à la longueur de la saison des pluies. Le développement rapide avec une floraison précoce permet à la plante d'éviter les périodes sèches. Cette stratégie appliquée aux espèces cultivées a amené à décaler la date de semis et/ou à sélectionner des variétés plus précoces permettant d'éviter les déficits hydriques de fin de cycle.

La deuxième façon d'éviter la sécheresse est la capacité de la plante à maintenir un état hydrique satisfaisant. La stratégie de l'évitement est principalement liée, d'une part, à la réduction de la transpiration et, d'autre part, à une optimisation de l'absorption d'eau par les racines. La diminution de la transpiration est principalement liée à la fermeture des stomates. Il s'ensuit une chute de l'assimilation de CO<sub>2</sub> donc une baisse de production de biomasse. Elle peut être due également à une diminution des surfaces évaporantes. Parmi les mécanismes permettant de réduire la transpiration, la réduction de la surface foliaire et la diminution de la conductance stomatique (gs) jouent un rôle déterminant.

##### 4.2 Tolérer la sécheresse

La tolérance est la stratégie qui permet à la plante d'assurer ses fonctions physiologiques malgré une dégradation de son état hydrique. Le maintien de la turgescence lors d'un déficit hydrique permet de retarder la fermeture des stomates (Mojayad et Planchon, 1994), de maintenir le volume chloroplastique (Gupta et Berkowitz, 1987) et de réduire le flétrissement foliaire (Jones et Turner, 1980). Cette aptitude confère à la plante une meilleure tolérance au déficit hydrique interne (Ludlow *et al.*, 1983).

Cette tolérance au déficit hydrique interne permet un fonctionnement prolongé de la photosynthèse. Les produits carbonés peuvent alors être utilisés autant pour l'ajustement osmotique que la croissance racinaire. Une autre conséquence du maintien du métabolisme carboné sera une diminution de la fréquence des épisodes de photoinhibition. Les processus de régulation d'un excès d'énergie photochimique au niveau chloroplastique s'avèrent contrastés selon les génotypes (Maury *et al.*, 1996).

Les capacités d'ajustement osmotique sont variables chez le tournesol et dépendent du génotype (Maury *et al.*, 2000 ; Chimenti *et al.*, 2002), des modalités d'installation du déficit hydrique (Jones et Rawson, 1979), et de l'âge de la feuille (Jones et Turner, 1980 ; Sadras *et al.*, 1993 ; Chimenti *et al.*, 2002). Les solutés impliqués sont essentiellement des ions inorganiques, des sucres solubles, des acides aminés et organiques. Le coût énergétique d'un tel ajustement est plus faible chez le tournesol, que chez d'autres espèces comme le blé (Munns et Weir, 1981), étant donné que la contribution des ions inorganiques est plus importante.

La tolérance à la sécheresse est le résultat de mécanismes physiologiques, biochimiques et moléculaires complexes. L'expression de différents gènes et l'accumulation de divers osmolytes (l'ajustement osmotique) couplés à un système antioxydant efficace sont souvent les principaux mécanismes de tolérance au déficit hydrique. Plusieurs de ces mécanismes ont été caractérisés chez différentes plantes (Ramanjulu et Bartels, 2002).

## 5. Analyse génétique de la tolérance du tournesol à la sécheresse

La sélection classique, qui consiste à effectuer des croisements puis à sélectionner des génotypes favorables parmi les descendants au cours des générations suivantes, a permis d'augmenter le rendement en conditions non limitantes en eau. Le progrès génétique est estimé à 1,3 q/ha/an pour le tournesol au cours de ces 30 dernières années (Vear *et al.*, 2003). Des résultats obtenus chez différentes espèces (comme le maïs et le blé) montrent que ces méthodes traditionnelles de sélection ont apporté un progrès non seulement en conditions non limitantes en eau, mais aussi en conditions de déficit hydrique. Cette stratégie d'amélioration peut encore s'appuyer sur un réservoir de variabilité naturelle assez peu utilisée pour la plupart des plantes cultivées (Tardieu *et al.*, 2007). Chez le tournesol, des travaux ont été développés pour sélectionner des pools génétiques tolérants à la sécheresse, avec un fort ajustement osmotique (Chimenti *et al.*, 2004 ; Chimenti et Hall, 1994) ou une forte efficacité d'utilisation de l'eau (Lambrides *et al.*, 2004).

Le développement des techniques de biologie moléculaire fournit de nouveaux outils pour l'analyse génétique et pour l'amélioration de la tolérance à la sécheresse via la sélection assistée par marqueurs.

Une démarche consiste à rechercher des zones du génome contrôlant des caractères quantitatifs (QTL pour Quantitative Trait Loci) associées à des marqueurs (polymorphes) sans *a priori* sur le rôle de ces zones. Il s'agit d'une mise en relation statistique entre les valeurs moyennes d'un caractère et les formes alléliques d'un marqueur.

La méthode la plus courante consiste à analyser une population (de 100 à 200 génotypes) de lignées fixées (lignées recombinantes) obtenues par autofécondations successives d'individus F2 issus du croisement de deux parents contrastés. La population ainsi obtenue est génotypée grâce à l'établissement d'une carte génétique relativement dense. Chez le tournesol, la première carte génétique a été établie en se basant sur des marqueurs RFLP (Gentzbittel *et al.*, 1995). Par la suite, une carte génétique de référence a été construite à l'aide de 459 SSRs pour le tournesol (Tang *et al.*, 2002). Récemment, Poormohammad Kiani *et al.* (2007) ont établi une nouvelle carte génétique de référence pour le tournesol basée sur 191 SSRs et 304 AFLPs. Poormohammad Kiani (2007) montre

que des zones chromosomiques (QTLs) associées à la tolérance au déficit hydrique (capacité d'ajustement osmotique (AO) et turgescence foliaire) sont co-localisées avec des QTLs de caractères impliqués dans l'élaboration du rendement (surface foliaire, biomasse de la plante, et poids du capitule). Un QTL majeur identifié pour l'AO est également détecté pour le rendement par plante, la surface foliaire et le poids du capitule. Ceci indique une base génétique commune pour la tolérance à la sécheresse et des caractères associés au rendement. Un QTL majeur pour l'AO sur le groupe de liaison 5 est co-localisé avec les QTLs contrôlant plusieurs caractères de l'état hydrique des plantes. Une cartographie fine de ce QTL permettrait d'envisager le clonage positionnel afin d'identifier la fonction du ou des gènes impliqués. Ebrahimi *et al* (2008) ont également identifié des QTLs pour des paramètres de qualité de la graine de tournesol en conditions de déficit hydrique. A des fins d'application, l'ensemble des marqueurs SSR identifiés pourrait être testé plus précisément pour envisager une utilisation dans des programmes de sélection assistée par marqueurs (SAM) pour l'amélioration de la tolérance du tournesol à la sécheresse.

Une autre méthode d'identification de QTL, basée sur la génétique d'association, consiste à rechercher des corrélations entre des marqueurs moléculaires et le caractère d'intérêt dans une large collection de génotypes représentant au mieux la diversité existant dans l'espèce. Chez le tournesol, cette méthode sera mise œuvre dans le cadre d'un projet d'amélioration du rendement et de la qualité des graines en conditions de stress hydrique (projet ANR 2007-2010, SUNYFUEL).

Une démarche complémentaire vise à évaluer le rôle de gènes 'identifiés' dans la variabilité du caractère étudié. Il est suggéré que la variabilité génétique de la tolérance à la sécheresse est principalement liée à l'expression différentielle des gènes répondant à la sécheresse (Krishnan *et al.*, 1989 ; Joshi *et al.*, 1997). Un grand nombre de gènes qui répondent à la sécheresse au niveau transcriptionnel ont été décrits dans la littérature (Ingram et Bartels, 1996 ; Shinozaki et Yamaguchi-Shinozaki, 2000 ; Seki *et al.*, 2001, 2002 ; Watkinson *et al.*, 2003 ; Oono *et al.*, 2003 ; Bray, 2002,2004). Chez le tournesol, nous nous sommes intéressés à l'expression de gènes impliqués, d'une part dans la tolérance à la contrainte hydrique, et d'autre part dans les processus limitant les dommages oxydatifs, pour quatre génotypes ayant un comportement contrasté en situations de contrainte hydrique. L'expression des gènes étudiés a été mise en relation avec les caractères physiologiques relatifs à l'état hydrique des plantes, la photosynthèse et la photochimie (processus impliqués dans l'assimilation du carbone pour la croissance). Parmi les principaux résultats, on note une différence notable de l'expression des gènes impliqués dans l'état hydrique selon les génotypes, plus particulièrement de l'aquaporine (Poormohammad Kiani *et al.*, 2007). L'expression d'un gène de la famille des aquaporines est corrélée à l'état hydrique de plante (teneur en eau relative des feuilles). Pour les processus photochimiques, ce sont principalement les niveaux d'expression des gènes codant pour la superoxyde dismutase, la catalase et la peroxidase qui différencient les génotypes soumis à la sécheresse (Poormohammad Kiani *et al.*, soumis à Plant Science).

Les techniques de « puces à ADN » permettent d'étudier simultanément la quasi totalité des transcrits d'un tissu d'un individu à un instant donné. Chez le tournesol, une quantification des variations du niveau d'expression des gènes induites en conditions de contrainte hydrique a été conduite pour deux génotypes l'un sensible et l'autre tolérant à la sécheresse (Roche *et al.*, 2007). Cette étude a été développée à l'aide d'une puce à ADN (constituée de 800 produits PCR de séquences de tournesol impliquées dans différentes voies du métabolisme de base et dans la transduction du signal) réalisée par la Génopôle Midi-Pyrénées. La majorité des transcrits différenciellement exprimés en conditions de contrainte hydrique présente des profils d'expression opposés chez le génotype tolérant par rapport au génotype sensible. Ce résultat suggère que la différence génotypique entre tolérant et sensible est associée à une modification qualitative et non quantitative de l'expression des gènes. Une analyse d'expression sur un nombre plus élevé de gènes, et pour différents scénarios de sécheresse sera développée dans le cadre du projet ANR 2007-2010 (SUNYFUEL) afin d'effectuer une analyse plus exhaustive des gènes impliqués dans la tolérance du tournesol à la sécheresse.

## 6. Applications. Perspectives

Une diversification de l'offre (sélectionneurs) et de la demande variétale (agriculteurs, organismes d'approvisionnement et de collecte, transformateurs) soit dans le sens de tolérance aux facteurs limitants (abiotiques, biotiques), soit dans celui de diverses qualités technologiques renforce le besoin d'une activité d'évaluation variétale multi-environnements et multi-objectifs. Au démarrage d'un programme d'amélioration génétique se pose la question des critères (traits morphologiques, physiologiques, etc...) à privilégier dans le processus de sélection en vue d'une adaptation aux environnements. Le développement de modèles dynamiques pour évaluer un choix conduite x variété nécessite (i) de choisir la base de modélisation répondant le mieux aux objectifs fixés et (ii) d'identifier les paramètres génotypiques du modèle (Casadebaig, 2008).

Dans le cadre du programme Tournesol 2010, différentes actions sur l'amélioration de la tolérance du tournesol à la sécheresse se sont développés à Toulouse ces dernières années.

### 6.1 Adapter le choix variétal à la disponibilité en eau : modèle de simulation

Parmi les trois éléments caractérisant un choix variété-milieu-conduite, la variété apparaît comme le facteur le plus facilement contrôlable par l'exploitant. Or, dans les modèles de culture actuels, la représentation de ce qui fait la spécificité d'une variété a tendance à être en retrait par rapport à celle de l'environnement (facteurs limitants et réponse de la plante). La représentation de la variabilité génétique au travers du paramétrage des modèles de culture constitue aujourd'hui un front de recherche en modélisation agronomique (Jeuffroy *et al.*, 2006). Un travail mené à Toulouse ces dernières années a consisté à prendre en compte la composante génotypique dans un modèle de culture initialement développé par Debaeke *et al.* (2004), et à analyser la capacité de ce modèle à rendre compte et à prévoir les interactions génotype-environnement-conduite de culture (IGEC) dans un but opérationnel.

Les avancées récentes en biotechnologies végétales ont conduit à créer de gigantesques bases de données sur la génomique d'espèces modèles (*Arabidopsis thaliana*). Cependant, le lien fonctionnel entre l'information génétique (par exemple une combinaison d'allèles) et l'expression phénotypique de la plante *in situ* reste encore actuellement extrêmement ténu. Une démarche plus réaliste et plus pragmatique pour combler le fossé entre les approches moléculaires et le phénotype de la plante est d'utiliser l'outil de modélisation biophysique pour formaliser le déterminisme génétique d'un phénotype.

La production du tournesol peut être appréhendée comme un système biophysique captant des ressources et les transformant en biomasse. Cette biomasse est ensuite allouée aux différents organes. En utilisant le modèle de Monteith (1977), cette chaîne de processus est représentée par trois termes et leur intégration temporelle comme suit :

$$RDT = IR \int_{j=\text{levée}}^{\text{récolte}} \epsilon b_j \quad \epsilon i_j \quad PAR_j \quad dt$$

PAR est le rayonnement incident reçu par les plantes (Rayonnement Photosynthétiquement Actif Incident (MJ.m<sup>-2</sup>.j<sup>-1</sup>)) ;  $\epsilon i$  est l'efficacité d'interception (proportion du rayonnement incident intercepté par les feuilles) ;  $\epsilon b$  est l'efficacité biologique de conversion du rayonnement (rapport qui détermine la conversion du rayonnement intercepté en biomasse (g.MJ<sup>-1</sup>)) ; IR est l'Indice de Récolte ; RDT est le rendement en graines (g.m<sup>-2</sup>).

La phénologie détermine la durée de l'intégration des efficacités d'interception et biologique. Chez le tournesol, les étapes clés de l'ontogenèse de la plante sont l'apparition du bouton étoilé, la floraison, le début du remplissage des graines et la maturité physiologique (Connor et Hall, 1997). Ces étapes déterminent les phases de l'élaboration des composantes du rendement : nombre de graines, poids d'une graine et teneur en huile. Elles délimitent des périodes du cycle en termes de physiologie de la plante pour l'organogenèse, la morphogenèse, l'activité photosynthétique, l'hydrolyse protéique et la lipidogenèse.

L'efficacité d'interception chez le tournesol est déterminée par la surface foliaire de la plante et la densité de peuplement dont le produit correspond au LAI (indice foliaire ( $m^2$  feuilles /  $m^2$  sol)) ainsi qu'un coefficient d'extinction  $k$  qui intègre la géométrie des organes et leur disposition spatiale (architecture). La surface foliaire résulte des processus d'organogenèse et de morphogenèse, abondamment étudiés (Dosio *et al.*, 2003).

L'efficacité biologique est une variable très intégrative mais dont les variations sont principalement déterminées par le niveau de l'activité photosynthétique. L'explicitation de sa variabilité phénotypique en liaison avec la photosynthèse nécessite une analyse des déterminants biochimiques de l'activité photosynthétique proposée par Farquhar *et al.* (1980).

Enfin, la répartition de la biomasse entre les organes est un déterminant majeur de la physiologie de la plante (Yan *et al.*, 2004). La phase de développement et de maturation des graines influence considérablement la physiologie de la plante. L'explicitation des compétitions internes pour les ressources à l'échelle des organes apparaît comme une voie pour améliorer notre compréhension de la variabilité génotypique de l'indice de récolte de la biomasse et de l'azote (Lecoeur et Sinclair, 2001).

Le modèle biophysique permet de rendre compte de la variabilité phénotypique de la productivité sous contrainte hydrique, d'un panel de géotypes de tournesol représentant le progrès génétique de ces 30 dernières années. La première étape a été l'identification des caractéristiques à acquérir pour décrire les performances de ces géotypes. Ces caractéristiques recouvrent les quatre grands volets décrits ci-dessus : phénologie, efficacité d'interception de la lumière, efficacité biologique et répartition de la biomasse. Puis, il a fallu rendre compte de l'interaction entre ces caractéristiques et les mécanismes d'adaptation à la sécheresse. Pour être éligibles, les caractéristiques choisies doivent, à la fois, être fonctionnellement reliées à l'approche énergétique de la production de biomasse, mais aussi avoir un sens physiologique.

La deuxième étape, en cours, est l'analyse de leur déterminisme génétique. Cette démarche inclut l'évaluation des méthodologies d'estimation des paramètres décrivant ces caractéristiques pour un nombre important de géotypes. Il convient de vérifier que le paramètre génotypique est bien lié au génome du géotype (analyse QTL). Outre un progrès pour le phénotypage de la productivité et la modélisation de l'expression phénotypique de sa variabilité génétique, cette démarche d'évaluation *a priori* et *in silico* des performances d'un géotype pourrait accompagner les programmes de création variétale.

## 6.2 Avancer les dates de semis pour esquiver la sécheresse estivale

Différentes stratégies agronomiques et génétiques ont été envisagées dans le projet « Tournesol 2010 » pour améliorer la productivité, un programme a notamment été développé afin d'évaluer les possibilités d'une anticipation des dates de semis dans le but d'accroître le rendement et d'esquiver la contrainte hydrique. En effet, un semis anticipé d'environ un à deux mois (semis en Février-Mars au lieu d'Avril-Mai tel qu'il est actuellement pratiqué en France), permettrait *i)* d'augmenter la durée potentielle du cycle végétatif soit l'accumulation de biomasse, et *ii)* d'éviter les périodes de déficits hydriques sévères lors de la floraison, étape essentielle dans l'élaboration du rendement.

La stratégie d'avancement de la date de semis du tournesol a été déjà envisagée dans beaucoup de pays méditerranéens mais également en Argentine et en Australie. Ces travaux montrent tous que l'avancement de la date de semis est une stratégie pertinente pour augmenter le rendement. En région méditerranéenne (Espagne Centre et Sud, Italie du Sud, Portugal, Maroc), plusieurs études ont été menées dans les années 80-90, pour évaluer les potentialités des semis d'automne (e.g. Gimeno *et al.*, 1989 ; Boujghagh, 1990, 1993 ; Anastasi *et al.*, 2000 ; Barros *et al.*, 2004). Le gain de rendement est de 5 à 12 q/ha selon les conditions. En Espagne, où le semis d'automne a été testé chez les agriculteurs, le rendement augmente d'environ 20%. Le rendement huileux est également amélioré. Le gain de rendement est lié à l'augmentation effective de la durée de cycle et à une esquivance des contraintes hydriques et thermiques de fin de cycle. Le comportement hydrique du tournesol est nettement amélioré pour 4 raisons (Orgaz *et al.*, 1990) : a) une augmentation de l'évapotranspiration totale, liée à un cycle plus long, une plus forte pluviométrie cumulée et à un enracinement plus efficace ; b) une augmentation du rapport transpiration/évaporation liée à une meilleure couverture du sol pendant les périodes de forte disponibilité en eau ; c) une augmentation de l'efficacité de transpiration liée à la plus faible demande évaporative (VPD) ; d) une augmentation de l'indice de récolte, due à l'esquivance du déficit hydrique pendant la période post-floraison.

D'autres travaux ont étudié l'intérêt d'une anticipation de 1 à 2 mois par rapport aux pratiques actuelles. Il en résulte également une augmentation du rendement mais une baisse du rapport oléique/linoléique (Flagella *et al.*, 2002), en raison des conditions thermiques. Ainsi, en Espagne, ce sont les semis de mi-février qui constituent la règle avec des décalages vers le printemps lors d'années pluvieuses.

Cependant, l'obstacle principal à une avancée significative de la date de semis sous nos climats concerne la tolérance au froid et au gel dans les premières phases de développement des plantes.

L'objectif scientifique de ce travail mené actuellement à Toulouse est de caractériser (analyser et modéliser) la croissance et le développement de génotypes de tournesol soumis à des contraintes de basses températures en début de cycle. Les objectifs finalisés de ce travail sont 1) de contribuer au développement de modèles fonctionnels pour l'analyse des interactions génotype x environnement x conduite technique afin de permettre un choix variétal adapté à une situation climatique et à un itinéraire technique et 2) de proposer des outils, indicateurs morpho-physiologiques et marqueurs moléculaires, pour la sélection de génotypes d'intérêt.

Deux approches sont développées dans ce travail. La première consiste à obtenir une représentation fonctionnelle de la croissance et du développement du tournesol en étudiant la phase semis-levée (durée, acquisition de l'autotrophie, température seuil de croissance, tolérance au gel), la mise en place de la surface foliaire qui conditionne l'interception du rayonnement par le couvert et l'utilisation du rayonnement intercepté pour produire de la biomasse. La deuxième approche, menée en parallèle, étudie quelques caractères ou traits morpho-physiologiques étroitement liés aux processus impliqués dans la tolérance au froid et au gel. La littérature scientifique propose de nombreuses méthodes ou tests simples que nous avons adaptés à notre matériel végétal. Par exemple, la fuite d'ions à travers les membranes plasmiques provoquée par un choc thermique et mesurée par conductimétrie, le fonctionnement photochimique de la photosynthèse affecté par les basses températures et accessible par la mesure de la fluorescence de la chlorophylle a. Mais aussi des indicateurs comme par exemple, la position et la taille de la plus grande feuille développée qui rend compte du développement foliaire à un stade donné.

Nous disposons pour ce travail d'une large gamme de génotypes constituée de différentes populations de tournesol afin d'étudier la variabilité génétique des réponses physiologiques aux basses températures. Ainsi, nous nous intéresserons à une population de variétés cultivées qui représentent les 30 dernières années d'amélioration génétique (progrès génétique) et d'écotypes sauvages choisis en fonction de leurs origines géographiques variées (régions plus ou moins froides des USA). De plus, nous intégrons à notre étude une population de lignées recombinantes (RILs) (Flores Berrios *et al.*

2000), afin de mettre en évidence les zones du génome impliquées (QTLs) dans les processus de tolérance au froid chez le tournesol.

### 6.3 Rechercher des génotypes d'intérêt en combinant les approches moléculaires, génétiques, physiologiques et agronomiques.

La modélisation des interactions Génotype x Environnement, à partir de l'analyse du fonctionnement de plante sous contrainte hydrique, permet de développer des modèles de cultures à paramètres variétaux (une variété est représentée par un ensemble de paramètres). Des méthodes de phénotypage « simplifiées » à l'échelle de la plante ou du couvert végétal sont développées pour estimer ces paramètres sur un grand nombre de génotypes. Ainsi, différentes populations de génotypes sont étudiées dans le cadre d'analyses génétiques pour évaluer l'héritabilité des paramètres et pour rechercher des marqueurs moléculaires afin d'aider à la sélection de génotypes innovants. Le modèle de culture ainsi paramétré offre la possibilité de tester *in silico* différentes combinaisons variété x environnement afin d'évaluer les poids des différents paramètres variétaux sur des variables de sorties du modèle (rendement, qualité...) pour aider à la définition d'idéotypes et au choix variétal dans des systèmes de cultures contraints par l'eau. Cette démarche, associant l'agronomie, la génétique et l'écophysiologie est mise en œuvre à Toulouse sur le modèle « tournesol x sécheresse », et s'appuie sur différents projets menés en étroite collaboration avec les acteurs de la filière.

### Références bibliographiques

- Anastasi U., Cammarata M., Abbate V., 2000. Yield potential and oil quality of sunflower (oleic and standard) grown between autumn and summer. *Italian Journal of Agronomy* 4, 23-36.
- Baker N.R., 1991. A possible role for photosystem II in environmental perturbations of photosynthesis. *Physiology Plantarum* 81, 563-570.
- Barlow E.W.R., 1986. Water relations of expanding leaves. *Aus J Plant Physiol* 13, 45-58.
- Barros J.F.C., de Carvalho M., Basch G., 2004. Response of sunflower (*Helianthus annuus* L.) to sowing date and plant density under Mediterranean conditions. *European Journal of Agronomy* 37, 749-757.
- Boujghagh M., 1990. Effets des semis d'hiver sur deux génotypes de tournesol dans la région du Saïss-Fès. *Helia* 13, 107-119.
- Boujghagh M., 1993. Comportement de dix génotypes de tournesol en semis d'hiver dans trois sites pédoclimatiques marocains. *Helia* 16, 31-44.
- Boyer J.S., 1970. Leaf enlargement and metabolic rates in corn, bean and sunflower at various leaf water potential. *Plant Physiology* 46, 233-235.
- Bray E.A., 2002. Classification of genes differentially expressed during water-deficit stress in *Arabidopsis thaliana*: an analysis using microarray and differential expression data. *Annals of Botany* 89 Spec No: 803-811.
- Bray E.A., 2004. Genes commonly regulated by water-deficit stress in *Arabidopsis thaliana*. *Journal of Experimental Botany* 55, 2331-2341.
- Casadebaig P., 2008. Analyse et modélisation des interactions génotype - environnement – conduite de culture : application au tournesol. Thèse de doctorat, INP Toulouse.
- Casadebaig P., Debaeke P., Lecoeur J., 2008. Threshold for leaf expansion and transpiration response to soil water deficit in a range of sunflower genotypes. *European Journal of Agronomy*, sous presse.
- Chimenti C.A., Pearson J., Hal A.J., 2002. Osmotic adjustment and yield maintenance under drought in sunflower. *Field Crops Research* 75, 235-246.

- Chimenti C.A., Hall A.J., 1994. Responses to water stress of apoplastic water fraction and bulk modulus of elasticity in sunflower (*Helianthus annuus* L.) genotypes of contrasting capacity for osmotic adjustment. *Plant and Soil*, 166, 101-107.
- Chimenti C.A., Giuliano J., Hall A., 2004. Osmotic adjustment, its effects on yield maintenance under drought in sunflower. In: Proc. XVI International Sunflower Conference, Fargo, USA, 1, 261-266.
- Ciais P., Reichstein M., Viovy N., Granier A., Ogee J., Allard V., Aubinet M., Buchmann N., Bernhofer C., Carrara A. et al, 2005. Europe-wide reduction in primary productivity caused by the heat and drought in 2003. *Nature* 437(7058), 529-533.
- Connor D.J., Hall A.J., 1997. Sunflower physiology. In ASA, CSSA, SSSA (éds) *Sunflower Technology and Production*. Agronomy Monograph 35, ASA, CSSA, SSSA, Madison, WI, USA pp. 113-182.
- Cosgrove D.J., 1986. Biophysical control of plant cell growth. *Ann. Rev. Plant Physiol.* 37, 377-405.
- Cosgrove D.J., 2005. Growth of the cell wall. *Nature Reviews. Molecular Cell Biology* 6, 850-861.
- Critchley C., Russel A.W., 1994. Photoinhibition of photosynthesis *in vivo*: The role of protein turnover in photosystem II. *Physiologia Plantarum* 92, 188-196.
- Debaeke P., Triboui A.M., Vear F., Lecoœur J., 2004. Crop physiological determinants of yield in old and modern sunflower hybrids. In 16th International Sunflower Conference, 29 août au 2 septembre, Fargo, ND, USA. 6 p.
- Demmig-Adams B., Adams III W.W., 1992. Photoprotection and other responses of plants to high light stress. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology* 43, 599-626.
- Dosio G., Rey H., Lecoœur J., Izquierdo N., Aguirrezabal L., Tardieu F., Turc O., 2003. A whole-plant analysis of the dynamics of expansion of individual leaves of two sunflower hybrids. *Journal of Experimental Botany* 54, 2541-2552.
- Ebrahimi A., Maury P., Poormohammad Kiani S., Berger M., Grieu P., Sarrafi A, 2008. Effects of water stress on sunflower seed quality in Recombinant Inbred Lines (Genome, sous presse).
- Farquhar G.D., von Caemmerer S., Berry J.A., 1980. A biochemical model of photosynthetic CO<sub>2</sub> assimilation in leaves of C<sub>3</sub> species. *Planta* 149, 78-90.
- Flagella Z., Rotunno T., Tarantino E., Di Caterina R., De Caro A., 2002. Changes in seed yield and oil fatty acid composition of high oleic sunflower hybrids in relation to the sowing date and the water regime. *Eur. J. Agron.* 17, 221-230.
- Gentzbittel L., Vear F., Zhang Y.-X., Bervillé A., Nicolas P., 1995. Development of a consensus linkage RFLP map of cultivated sunflower (*Helianthus annuus* L.). *Theor Appl Genet* 90, 1079-1086.
- Gimeno V., Fernandez Martinez J.M., Fereres E., 1989. Winter planting as a means of drought escape in sunflower. *Field Crops Research* 22, 307-316.
- Granier C., Inzé D., Tardieu F., 2000. Spatial distribution cell division rate can be deduced from that of P34cdc2 kinase activity in maize leaves grown in contrasting conditions of temperature and water status. *Plant Physiology* 124, 1393-1402.
- Gupta S.A., Berkowitz G.A., 1987. Osmotic adjustment, symplast volume, and nonstomatally mediated water stress inhibition of photosynthesis in wheat. *Plant Physiology* 87, 1040-1047.
- Ingram J., Bartels D., 1996. The molecular basis of dehydration tolerance in plants. *Ann. Rev. Plant Physiol. Plant Mol. Biol.* 47, 377-403
- Jeuffroy M.H., Barbottin A., Jones J., Lecoœur J., 2006. Estimating genotypes parameters for crop models. dans INRA (éds) *Working with dynamic crop models*, John Wiley & Sons, New York, NY, USA. Section 5, 281-307.
- Jones H.G., 1992. *Plants and microclimate. A quantitative approach to environmental plant physiology*. Cambridge University press, Cambridge, UK. 428 p.
- Jones M.M., Rawson H.M., 1979 Influence of rate of development of leaf water deficits upon photosynthesis, leaf conductance, water use efficiency, and osmotic potential in sorghum. *Physiologia Plantarum* 45, 103-111.

- Jones M.M., Turner N.C., 1980. Osmotic adjustment in expanding and fully expanded leaves of sunflower in response to water deficits. *Aust. J. Plant Physiol.* 7, 181–192.
- Joshi C.P., Klueveva N.Y., Morrow K.J., Nguyen H.T., 1997. Expression of a unique plastid localized heat shock protein is genetically linked to acquired thermotolerance in wheat. *Theor. Appl. Genet.* 95, 834-841.
- Krishnan M., Nguyen H.T., Burke J.J., 1989. Heat shock protein synthesis and thermotolerance in wheat. *Plant Physiology* 90, 140-145.
- Lambrides C.J., Chapman S.C., Shorter R., 2004. Genetic Variation for Carbon Isotope Discrimination in Sunflower: Association with Transpiration Efficiency and Evidence for Cytoplasmic Inheritance, *Crop Sci.* 44, 1642–1653.
- Lecoeur J., Sinclair T.R., 2001. Analysis of nitrogen partitioning in field pea plants resulting in linear increase in nitrogen harvest index. *Field Crops Research* 71, 151-158.
- Ludlow M.M., Chu A.C.P., Clements R.J., Kerlake R.G., 1983. Adaptation of species of *Centrosema* to water stress. *Aust. J. Plant Physiol.* 10, 119–130.
- Martre P., Morillon R., Barrieu F., Gretchen B.N., Park S.N., Maarten J.C., 2002. Plasma membrane aquaporin play a significant role during recovery from water deficit. *Plant Physiology* 130, 2101-2110.
- Maury P., Berger M., Mojayad F., Planchon C., 2000. Leaf water characteristics and drought acclimation in sunflower genotypes. *Plant and Soil* 223, 153-160
- Maury P., Mojayad F., Berger M., Planchon C., 1996. Photosynthesis response to drought acclimation in two sunflower genotypes. *Physiologia Plantarum* 98, 57-66.
- Merrien A., Grandin L., 1990. Comportement hydrique du tournesol: Synthèse des essais 'irrigation' 1983-88. In *Le tournesol et l'eau* (eds. R. Blanchet & A. Merrien), pp. 75–90. Cetiom Pub., Paris.
- Mojayad F., 1993. Adaptation à la sécheresse, photosynthèse et photoinhibition chez le tournesol (*Helianthus annuus* L.). PhD Thesis. Institut National Polytechnique, Toulouse, France, 97p.
- Mojayad F., Planchon C., 1994. Stomatal and photosynthetic adjustment to water deficit as the expression of heterosis in sunflower. *Crop Sci.* 34, 103–107.
- Monteith J., 1977. Climate and the efficiency of crop production in Britain. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Series B Biological Sciences* 281, 277-294.
- Morgan J.M., 1984. Osmoregulation and water stress in higher plants. *Ann. Rev. Plant Physiol.* 35, 299-319.
- Morizet J., Merrien A., 1990. Principaux traits du comportement hydrique du tournesol. In *Le tournesol et l'eau* (eds. R. Blanchet & A. Merrien), pp.7–21. Cetiom Pub., Paris.
- Oono Y., Seki M., Nnjo T., Narusaka M., Fujita M., Satoh R., Satou M., Sakurai T., Ishida J., Akiyama K., Lida K., Maruyama K., Satoh S., Yamaguchi-Shinozaki K., Shinozaki K., 2003. Monitoring expression profile of Arabidopsis gene expression during rehydration process after dehydration using ca 7000 full-length cDNA microarray. *Plant Journal* 34, 868-887
- Orgaz F., Gimenez C., Fereres E., 1990. Efficiency of water use in winter plantings of sunflower in a Mediterranean climate, Proc.1st ESA Cong., Paris, Session 1-01
- Ouvrard O., Cellier F., Ferrare K., Tusch D., Lamaze T., Dupuis J.-M., Casse-Delbart F., 1996. Identification and expression of water stress- and abscisic acid-regulated genes in a drought-tolerant sunflower genotype. *Plant Mol. Biol.* 31, 819–829.
- Passioura J.B., 1994. The yield of crops in relation to drought. In: *Physiology and Determination of Crop Yield*, Boote KJ et al. (Ed). Crop Science Society of America. Madison WI, pp. 343-359.
- Poormohammad Kiani S., Grieu P., Maury P., Hewezi T., Gentzbittel L., Sarrafi A., 2007. Genetic variability for physiological traits under drought conditions and differential expression of water stress-associated genes in sunflower (*Helianthus annuus* L.). *Theoretical and Applied Genetics* 114,193-207.
- Poormohammad Kiani S., 2007. Analyse génétique des réponses physiologiques du tournesol (*Helianthus annuus* L.) soumis à la sécheresse, Ph D Thesis, INP Toulouse, 213p

- Poormohammad Kiani S., Maury P., Sarrafi A., Grieu P., 2008. Chlorophyll fluorescence variation and differential expression of antioxidant genes under well-watered and water-stressed conditions in recombinant inbred lines of sunflower (*Helianthus annuus* L.) (Plant Science, Revised manuscript)
- Poormohammad Kiani S., Talia P., Maury P., Grieu P., Heinz R., Perrault A., Nishinakamasu V., Hopp E., Gentzbittel L., Paniego N., Sarrafi A., 2007. Genetic analysis of plant water status and osmotic adjustment in recombinant inbred lines of sunflower under two water treatments. *Plant Science* 172, 773-787.
- Ramanjulu S., Bartels D., 2002. Drought and desiccation-induced modulation of gene expression in plants. *Plant Cell and Environment* 25, 141-151
- Roche J., Hewezi T., Bouniols A., Gentzbittel L. 2007. Transcriptional profiles of primary metabolism and signal transduction-related genes in response to water stress in field-grown sunflower genotypes using a thematic cDNA microarray. *Planta* 226, 601-617.
- Sadras V.O., Villalobos F.J., Fereres E., Wolfe D.W., 1993. Leaf responses to soil water deficits: Comparative sensitivity of leaf expansion rate and leaf conductance in field-grown sunflower (*Helianthus annuus* L.). *Plant and Soil* 153, 189-194.
- Seki M., Narusaka M., Abe H., Kasuga M., Yamaguchi-Shinozaki K., Carninci P., Hayashizaki Y., Shinozaki K., 2001. Monitoring the expression pattern of 1300 Arabidopsis genes under drought and cold stresses using full-length cDNA microarray. *Plant Cell* 13, 61-72.
- Seki M., Narusaka M., Ishida J., Nanjo T., Fujita M., Oono Y., Kameyama A., Nakajima M., Enju A., Sakurai T., Satou K., Akiyama K., Taji T., Yamahuchi-Shinozaki K., Carninci P., Kawai J., Hayashizaki Y., Shinozaki K., 2002. Monitoring the expression profiles of 7000 Arabidopsis genes under drought, cold and high-salinity stresses using a full-length cDNA microarray *Plant Journal* 31, 279-292.
- Sharp R.E, 2002. Interaction with ethylene: changing views on the role of abscisic acid in root and shoot growth responses to water stress. *Plant Cell and Environment* 25, 211-222.
- Shinozaki K., Yamaguchi-Shinozaki K., 2000. Molecular responses to dehydration and low temperature: Differences and cross-talk between two stress signaling pathways. *Curr. Opin. Plant Biol.* 3, 217-223.
- Tang S., Yu J.K., Slabaugh M.B., Shintani D.K., Knapp S.J., 2002. Simple sequence repeat map of the sunflower genome. *Theor. Appl. Genet.* 105, 1124-1136.
- Tardieu F., Cruiziat P., Durand J.L., Triboï E. Zivy M., 2007. ESCo « sécheresse et agriculture » p 242-257.
- Turner N.C., 1986. Adaptation to water deficits: A changing perspective. *Aust. J. Plant Physiol.* 13, 175-190.
- Turner N.C., Wright G.C., Siddique K.H.M., 2001. Adaptation of grain legume to water-limited environments. *Advances in Agronomy* 71, 193-231.
- Vear F., Bony H., Joubert G., Tourvieille de Labrouhe D., Pauchet I., Pinochet X., 2003. The results of 30 years of sunflower breeding for France. *Oléagineux, Corps gras, Lipides* 10, 66-73.
- Watkinson J.I., Sioson A.A., Vasquez-Robinet C., Shukla M., Kuma D., Ellis M., Heath L.S., Ramakrishnan N., Chevone B., Watson L.T., Van Zyl L., Egertsdotter U., Sederoff R.R., Grene R., 2003. Photosynthetic acclimation is reflected in specific patterns of gene expression in drought-stressed loblolly pine. *Plant Physiology* 133, 1702-1716
- Wise R.R., Sparrow D.H., Ortiz-Lopez A., Ort D.R., 1991. Biochemical regulation during the mid-day decline of photosynthesis in field-grown sunflower. *Plant Science* 74, 45-52.
- Yan H.P., Kang M.Z., Reffye P., Dingkun M., 2004. A dynamic, architectural plant model simulating resource-dependent growth. *Annals of Botany* 93, 591-602.

## **Gestion de l'irrigation : du stratégique au tactique. Quelques apports de la recherche**

Jacques-Eric Bergez<sup>(1,3)</sup>, Bernard Lacroix<sup>(2,3)</sup>

(1) INRA, UMR 1248 AGIR, BP 52627, 31326 Castanet Tolosan, FRANCE

(2) ARVALIS - Institut du végétal, 6 chemin de la côte vieille, 31450 Baziège, FRANCE

(3) UMT « Outils et méthodes pour la gestion quantitative de l'eau : du bloc d'irrigation au collectif d'irrigants »

### **Résumé**

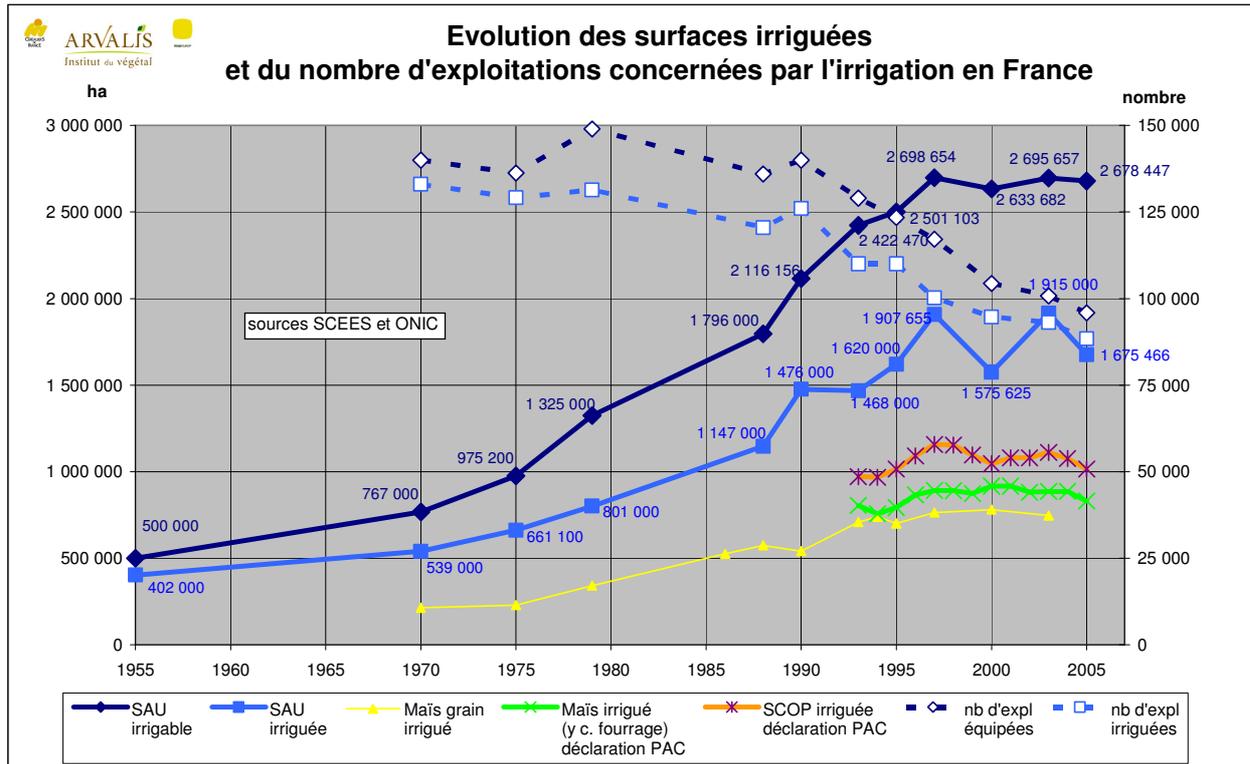
L'irrigation est une pratique culturale complexe qui ne peut se résumer à ouvrir un robinet. Elle est le résultat d'un choix stratégique de l'agriculteur, choix intégrant de l'équipement, des cultures, des surfaces, mais aussi des stratégies de conduite mobilisant des aspects économiques et sociaux. D'un schéma mental initial appelé le plan d'action prévisionnel, l'agriculteur doit ensuite gérer en cours de campagne l'irrigation de ses cultures. Cette gestion intègre le développement de la culture, les conditions climatiques mais également les risques de restriction d'utilisation de la ressource et les pannes. Différents outils ont été développés par la recherche et par les instituts techniques pour aider aux approches aussi bien stratégiques que tactiques. Tout dernièrement l'INRA, ARVALIS - Institut du végétal et le Cetiom se sont groupés sous une structure commune appelée Unité Mixte Technologique pour aller plus loin dans ces questions.

### **Abstract**

Irrigation is quite a difficult agricultural operation. This is not just opening a tap. Irrigation is the result of strategic farmer's behaviour: choice of equipment, crops, soil and surfaces but also economical and social aspects leading to a provisional irrigation strategy. From this mental description, called "provisional management plan", farmers have to manage irrigation along the season. Crop development, weather but also shortage and irrigation bans and break-downs have to be accounted for. Different tools have been developed by the research or by the development to help on the strategic and tactical aspects of irrigation. Lately, INRA, ARVALIS - Institut du végétal and Cetiom joined in a structure called "Joined Technological Unit" to deeper analyse these questions.

### **Introduction**

L'irrigation des grandes cultures est une pratique culturale relativement récente. Débutant dans les années 1960, elle a surtout pris son essor dans les années 1970 (Figure 1). En 30 ans, les surfaces irriguées en France ont alors été multipliées par trois. Depuis le début des années 2000, les surfaces ont eu tendance à se stabiliser voire même à présenter une légère réduction après 2003. Les raisons telles que les fortes sécheresses récurrentes, les modifications de la PAC, la périurbanisation ou les pressions sociales peuvent être avancées (Darses, 2007).



**Figure 1:** Evolution des surfaces irriguées entre 1955 et 2005 (d'après ARVALIS - Institut du végétal)

Le développement de l'irrigation a permis en premier lieu l'augmentation et la stabilisation des rendements et des revenus des agriculteurs. Ceci a été possible car l'eau d'irrigation permet de combler un déficit de pluviométrie chronique ou aléatoire. L'irrigation a également permis une diversification plus importante des cultures, rendant possible l'implantation de cultures plus fortement demandeuses en eau mais à plus forte marge brute. Indirectement, le développement de l'irrigation a permis de conserver une activité en milieu rural. Cependant, l'augmentation des surfaces irriguées est allée de pair avec une augmentation des prélèvements d'eau par les agriculteurs. Dans un contexte actuel d'étés plus secs, pouvant poser des problèmes pour l'environnement et les loisirs, les prélèvements pour et par l'agriculture sont générateurs de conflits sociaux entre les mondes ruraux et les mondes urbains. Il y a donc un véritable besoin de gestion de l'irrigation.

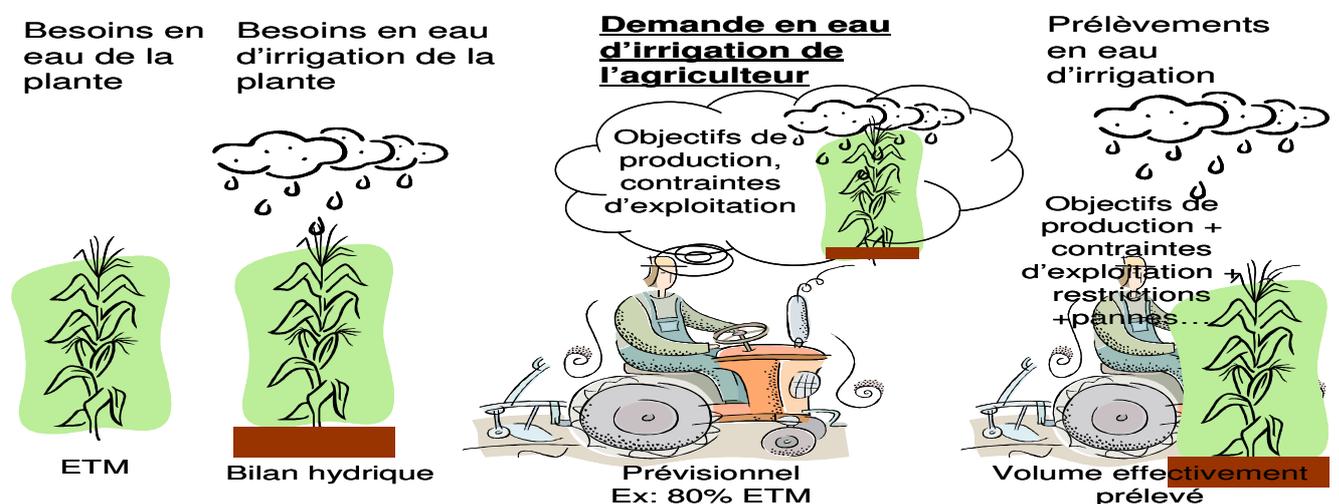
Outre l'aspect conflit d'usage sur la ressource, d'autres aspects encouragent un raisonnement plus poussé sur la problématique de l'irrigation. Tout d'abord, l'irrigation est une pratique qui coûte cher. Ainsi, une étude du Cemagref (2002) a montré que pour un canon enrouleur, il fallait compter un investissement à l'hectare de l'ordre de 1200 € (occasionnant un amortissement de près de 145 € par hectare et par an) et pour un pivot d'une vingtaine d'hectares, en moyenne 2600 € par hectare étaient nécessaires représentant un amortissement de l'ordre de 300 € par hectare et par an (voir également les chiffres relatifs aux coûts de l'irrigation en Midi-Pyrénées qui seront présentés par Deumier et al dans ce colloque). L'augmentation actuelle du coût de l'énergie a aussi un impact direct sur les charges opérationnelles liées à l'irrigation. Il y a donc un équilibre à trouver entre la valorisation des équipements onéreux (et par exemple l'irrigation des cultures traditionnellement conduites en sec) et la réduction des charges opérationnelles. Ensuite, l'irrigation est une pratique de plus en plus encadrée par différentes législations et réglementations (PAC/Lois sur l'eau). La conduite de l'irrigation est directement concernée. Enfin, l'irrigation comme toute pratique agricole peut avoir des impacts négatifs sur l'environnement si elle n'est pas correctement raisonnée.

Raisonnement la conduite de l'irrigation est alors une nécessité afin d'assurer un optimum économique tout en préservant l'environnement. Cependant au niveau des grandes cultures, la gestion de l'eau ne se résume pas à la gestion de l'irrigation. Il ne sera pas question dans ce papier de l'esquive, de la résistance, de l'évitement ou de la conservation qui sont des éléments de pratique culturale permettant de réduire la demande en eau d'irrigation des cultures. Nous nous focaliserons sur la pratique d'irrigation même. De plus, gérer l'irrigation, ce n'est pas juste ouvrir un robinet. Loin s'en faut !

Cette présentation propose quelques éléments sur le pilotage de l'irrigation. Après une clarification de quelques termes, l'irrigation sera replacée dans un cadre temporel, dissociant les aspects stratégiques des aspects tactiques. Dans une partie suivante, on se focalisera sur la présentation de quelques outils et des questions que cela pose à la recherche. Enfin, dans une partie conclusive, on ouvrira le débat de l'irrigation à la question plus générale de la gestion de l'eau.

## De quelle eau parle-t-on ?

Pour bien comprendre la question de l'irrigation, il est important de bien définir ce qu'on appelle les prélèvements en eau d'irrigation par les agriculteurs (Figure 2) :

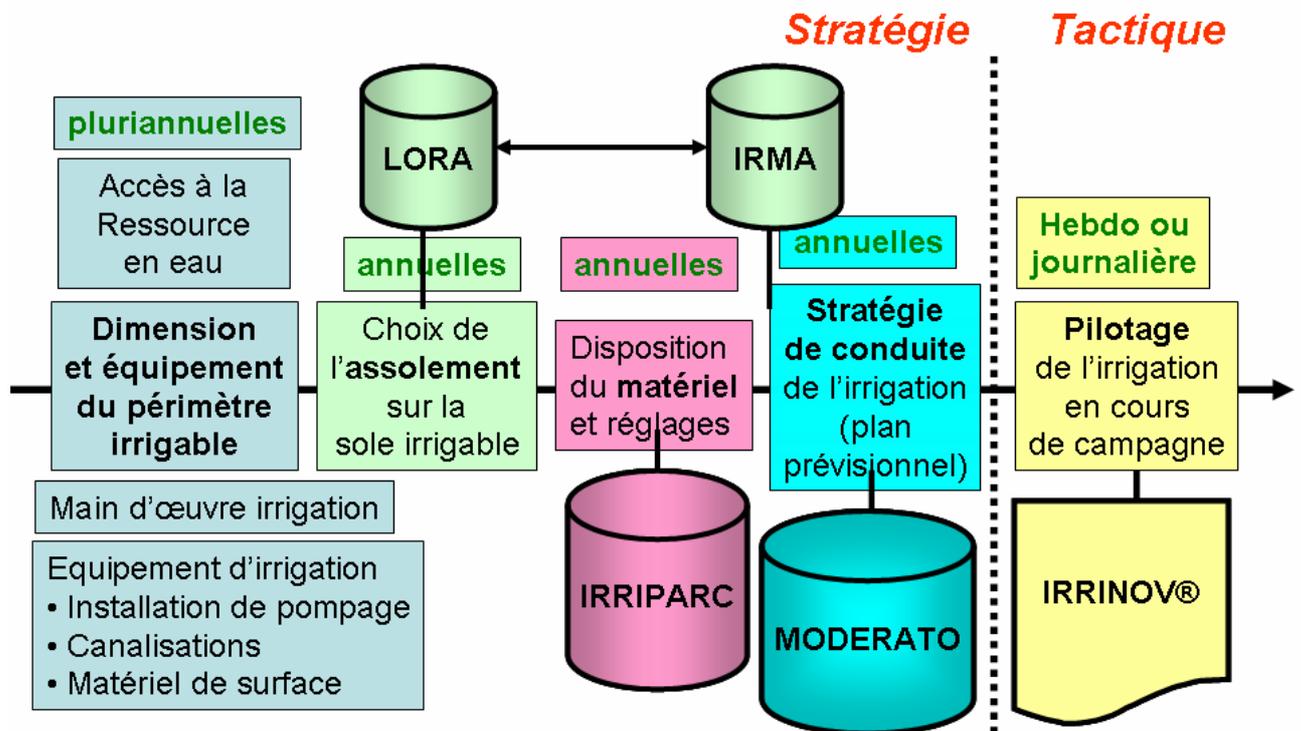


**Figure2** : Les différentes demandes en eau : de la plante à l'agriculteur (d'après Maton, 2006).

- 1) Pour satisfaire la demande évaporative de l'atmosphère, un peuplement végétal dans une parcelle est susceptible d'évapotranspirer en bonnes conditions hydriques une certaine quantité d'eau. Il s'agit de l'ETM (EvapoTranspiration Maximale) ;
- 2) Le climat permet un certain apport d'eau (pluies, rosées et brouillards). Le sol, qui peut être vu comme un réservoir plus ou moins bien rempli, fournit également de l'eau. Les besoins en eau d'irrigation sont alors la différence entre l'ETM et les apports du climat et du sol ;
- 3) L'agriculteur peut avoir des stratégies de production qui ne sont pas obligatoirement d'irriguer à 100% d'ETM. Il peut choisir pour des raisons diverses (économiques, de temps de travail, d'équipement) d'irriguer à 60 ou 80% de l'ETM. Une raison très simple est qu'il est impossible à l'agriculteur d'irriguer tous les jours au complément de l'ETM : le matériel utilisé en grandes cultures ne le permet pas ;
- 4) Finalement, l'agriculteur va demander une certaine quantité d'eau d'irrigation, mais celle-ci pourra être réduite du fait de différentes pannes ou restrictions (arrêtés préfectoraux de restriction de pompage en période d'étiage). Cette dernière valeur correspond aux prélèvements d'irrigation des agriculteurs.

## Inscrire la pratique d'irrigation dans un cadre temporel

L'action d'irrigation peut être représentée selon une césure temporelle : une réflexion stratégique, qui se situe en amont de la campagne d'irrigation et une réflexion tactique, qui se situe durant la campagne d'irrigation. A chacune de ces étapes, des outils existent ou sont en cours de développement pour améliorer la maîtrise de l'irrigation (Figure 3).

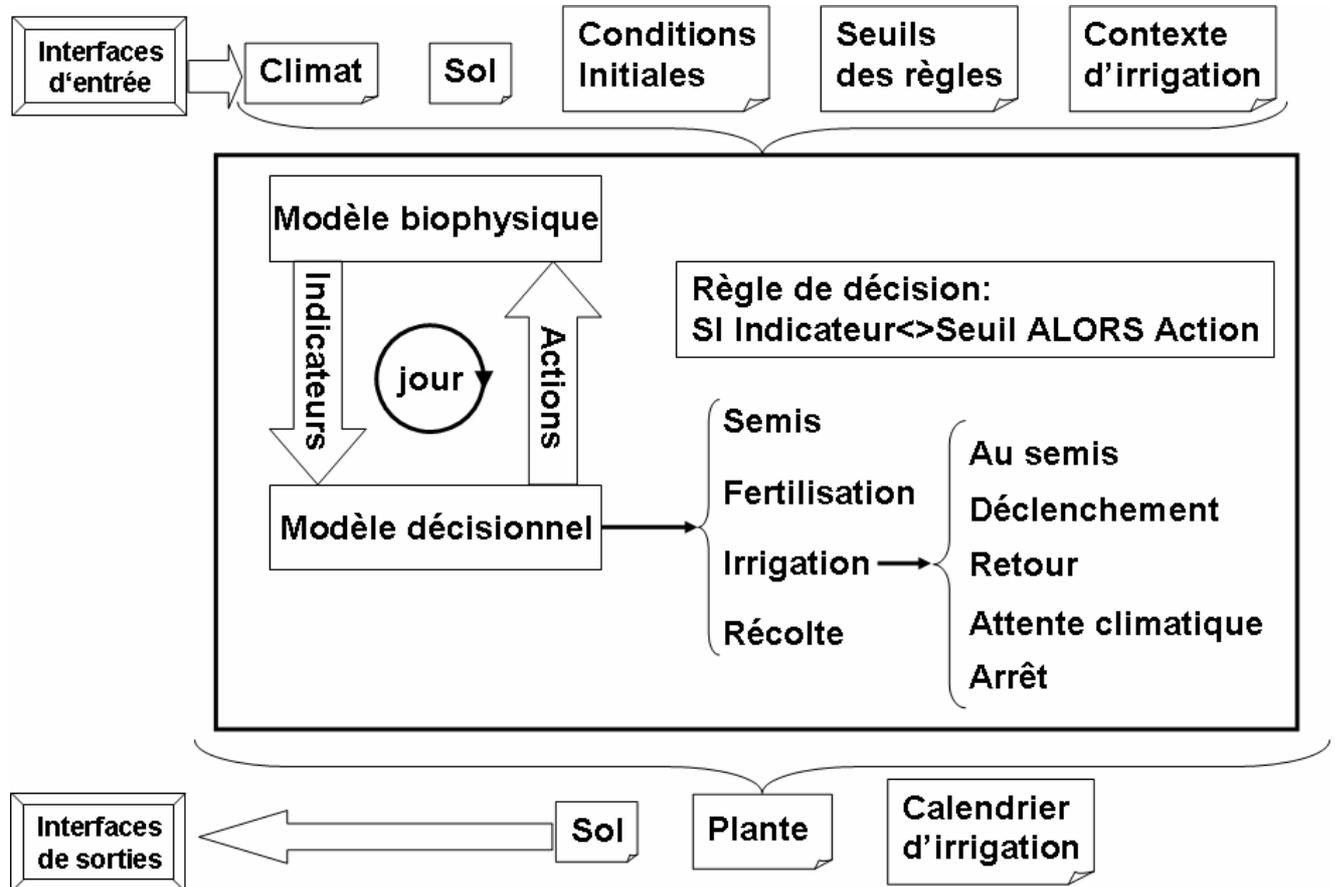


**Figure 3 :** Différents outils d'aide aux décisions d'irrigation en grandes cultures (d'après Lacroix, 2004)

Dans le domaine stratégique, on distingue les décisions à long terme, touchant à la structure de l'exploitation, des décisions à plus court terme, influant sur la saison de culture à venir (Debaeke et al., 2007). La réflexion stratégique à long terme prend en compte : i) le choix du matériel d'irrigation, ii) les contrats d'accès à l'eau et iii) les créations de ressources. Des progrès importants ont été faits sur le matériel avec notamment l'apparition du contrôle électronique de la vitesse d'avancement des canons. Ce domaine d'activité de recherche est porté par le Cemagref. La réflexion n'est pas que technique. En effet, on voit apparaître des CUMA d'irrigation mutualisant les équipements avec notamment la possibilité de pivots partagés offrant ainsi une meilleure rentabilité du matériel. Des travaux sont menés par le Cemagref (UMR G-EAU - Montpellier) et par le LERNA (INRA – Toulouse) sur le coût de l'irrigation et sur la taxation comme outil de gestion de l'eau agricole. Des études portent également sur le marché de l'eau.

Pour l'approche stratégique en prévision annuelle, on peut différencier des étapes : i) de choix d'assolement (positionner les soles irriguées et les soles en sec, choisir les cultures irriguées ainsi que les variétés), ii) de définition d'un calendrier prévisionnel d'irrigation (positionner dans le temps les opérations culturales concernant l'irrigation en fonction des contraintes climatiques, agronomiques et techniques prévisibles, décider des volumes à apporter par culture et par type de sol) et iii) de disposition et de réglage des matériels (Deumier et al., 2003). Des outils informatiques ont été conçus en partenariat avec l'INRA pour aider les techniciens et indirectement les agriculteurs à optimiser leurs choix d'assolements et leurs stratégies d'irrigation. Ainsi LORA (Jacquin et al., 1993) aide à optimiser l'assolement sur le périmètre irrigable de l'exploitation agricole. Ce logiciel est utilisé dans plusieurs régions (Aquitaine, Midi-Pyrénées, Poitou-Charentes,...) pour étudier avec les irrigants les évolutions

possibles des systèmes irrigués lors de changements importants de contexte (découplage PAC en 2006, Loi sur l'Eau 2006, nouvelle tarification EDF,...). A partir d'un assolement établi, MODERATO (Bergez et al., 2001), qui couple un modèle biophysique à un modèle décisionnel, permet de rechercher les meilleures règles de décision pour l'irrigation du maïs pour différentes contraintes de volume et de débit.



**Figure 4 :** Les principes de MODERATO. Un modèle biophysique et un modèle décisionnel sont couplés via une boucle de fonctionnement journalière. L'utilisateur renseigne les conditions pédoclimatiques et l'état initial, puis décrit les pratiques soit sous forme de règles, soit sous forme de dates et de quantités. L'outil simule alors le fonctionnement du système sol-plante en fonction des contraintes explicitées. En sortie, des fichiers décrivant le fonctionnement du sol, de la plante mais aussi le calendrier des irrigations sont fournis (d'après Deumier et al., 2006).

Cet outil mobilise des algorithmes d'optimisation de stratégies (Bergez et al., 2004). Il est alors possible pour des conditions hydrauliques et de milieu données de définir un jeu de stratégies optimisant des critères prédéfinis (marge brute, rendement, efficacité de l'eau...).

## Piloter l'irrigation

Pendant la campagne d'irrigation, l'agriculteur doit mettre en œuvre son plan d'action concernant l'irrigation et adapter les apports au contexte et au système tel qu'il est au moment d'agir. Différents outils existent également pour mieux maîtriser les apports d'eau. Trois questions principales se posent : quels indicateurs pour représenter les besoins d'irrigation ? Quels seuils pour ces indicateurs ? Comment calculer la dose à apporter ?

Lors d'enquêtes menées en 2001 (Clavé, 2001 ; Rouffaud, 2001), il a été demandé aux agriculteurs enquêtés : « *Comment décidez-vous de démarrer votre campagne d'irrigation ?* ». A cette question, des réponses très diverses ont été apportées : « *Quand le sol devient sec* » ; « *Quand la couleur du sol change* » ; « *Quand la terre soufflée par les taupes devient sèche* » ; « *Quand mon voisin démarre* » ; « *Quand la bêche ne rentre plus dans le sol* » ; « *Quand le conseiller dit de démarrer* » ; « *Quand les tensiomètres indiquent une forte tension* » ; « *Quand la plante montre qu'elle souffre, que les feuilles se recroquevillent* ». Comme on peut le voir, les indicateurs sont très variés et souvent subjectifs. Définir de bons indicateurs, des moyens de les mesurer et des seuils adéquats en fonction des conditions spécifiques de l'irrigant est une des questions les plus importantes pour le pilotage de l'irrigation.

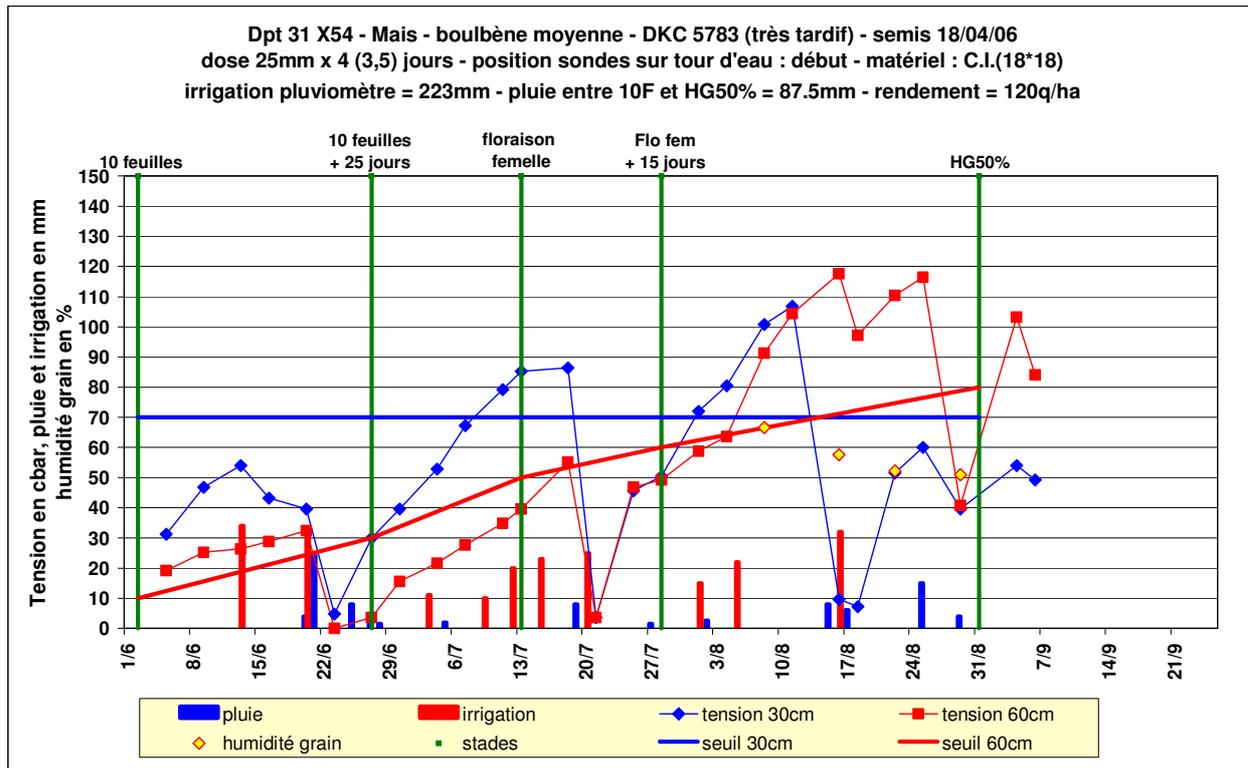
La détermination de la dose apportée par tour d'eau n'est pas non plus un choix trivial. La quantité va dépendre de l'équipement d'irrigation (débit disponible et donc temps nécessaire pour apporter une dose unitaire, contraintes de travail pour les horaires de changement de positions, automatisation, ...), du sol (profond ou superficiel et donc capacité du sol à retenir la dose apportée sans drainage), en fonction des besoins de la plante (phase sensible ou non), en fonction des contraintes anticipées (restriction ou quota), en fonction de choix de l'agriculteur (rationnement de la culture). Une difficulté supplémentaire relève de la mauvaise connaissance de la dose effectivement appliquée ou d'un écart entre dose souhaitée et dose effective. Cet écart peut être dû à une mauvaise connaissance ou à une usure de l'équipement mais également à des variations de pression dans le réseau de distribution ou plus simplement aux conditions climatiques (le vent qui crée de fortes dérives) ou à l'état de surface du sol, certains équipements étant roulants.

L'outil le plus simple et le plus connu est l'avertissement d'irrigation. Il s'agit d'un outil papier (fax, email ou lettre suivant les départements) qui renseigne sur l'état des cultures, les besoins en eau et les prévisions en irrigation pour la semaine à venir. Une étude de 2001 menée à l'initiative de la Chambre Régionale d'Agriculture Midi-Pyrénées (Mircovitch, 2001) a montré qu'en Midi-Pyrénées, seulement 1/3 des exploitants recevant le bulletin l'utilisaient pour leur pratique ! Cet outil est surtout utilisé lors du démarrage de la campagne d'irrigation. Il est important d'analyser l'avertissement comme une ressource informationnelle, c'est-à-dire de mieux en définir le support, l'origine et le contenu (Magne et al., 2007) afin que ces informations soient mieux valorisées par l'exploitant.

Il existe ensuite des outils basés sur le bilan hydrique. C'est le cas du BHYP (Bilan hydrique prévisionnel, développé par la Chambre d'Agriculture de Haute-Garonne) (Deumier et al., 2005). Cet outil est basé sur une représentation dynamique de l'évolution de la réserve en eau du sol prenant en compte l'évapotranspiration de la parcelle, la date et la précocité de la culture, les pluies et la réserve en eau du sol. Chaque jour, l'agriculteur trace sur une feuille millimétrée soit une barre horizontale, s'il n'a pas plu, soit une barre verticale s'il a plu ou s'il a irrigué. Le tracé de l'agriculteur doit alors courir entre deux rails : un rail inférieur qu'il ne faut pas dépasser sous peine de pénaliser le rendement et un rail supérieur qu'il ne faut pas dépasser non plus, sous peine de pertes d'eau. Une analyse de l'utilisation de cet outil par les exploitants a été menée par un anthropologue des techniques (Ph.Geslin, INRA & Univ.Neuchâtel) pour mieux comprendre les intérêts, limites, usages et détournements de cet outil (Munz, 2007). Des variantes informatiques de ce type d'outil existent, c'est notamment le cas d'IRRIBET développé par l'Institut Technique de la Betterave (ITB, 2006) ou les essais de Météo-France avec IRRITEL (1996).

Le bilan hydrique est souvent lié à une observation uniquement climatique. On peut utiliser d'autres indicateurs provenant de mesures plus spécifiques. Ainsi, dans le cas d'IRRINOV®, méthode de pilotage de l'irrigation développée par ARVALIS en collaboration avec les Chambres d'Agriculture et avec la participation de l'INRA (Deumier et al., 2005), on allie climat, eau du sol, stade de développement de la culture et contraintes hydrauliques. Basée sur une approche tensiométrique permettant de représenter la disponibilité en eau du sol et un repérage des stades de la culture, cette méthode permet de moduler les arrosages en fonction des contraintes en eau de l'exploitation, des

stades de la culture et du climat. L'agriculteur contrôle l'évolution des tensions mesurées par deux jeux de tensiomètres (un à 30 cm de profondeur et l'autre à 60 cm de profondeur) et les compare à des valeurs seuils qui évoluent au cours du cycle du maïs selon une stratégie type d'utilisation des réserves en eau du sol. Cette stratégie est définie pour chaque contexte pédoclimatique et prend en compte la durée du tour d'eau. Le déclenchement de l'irrigation et la reprise d'un nouveau tour d'eau n'interviennent que si les tensions observées atteignent les seuils. La méthode est utilisable quand l'irrigant dispose des moyens en débit et volume par hectare suffisants pour couvrir les besoins au moins 8 années sur 10. Dans chaque contexte pédoclimatique, ces valeurs de débit (en mm.jour<sup>-1</sup>) et de volume (en m<sup>3</sup>.ha<sup>-1</sup>) sont indiquées.



**Figure 5 :** Exemple de suivi de la méthode IRRINOV® maïs en 2006. Les tensions mesurées par l'agriculteur à deux profondeurs de référence (♦ 0.30m et ■ 0.60m) sont comparées aux valeurs seuils qui évoluent avec les stades, qui sont adaptées aux conditions pédoclimatiques régionales et qui prennent en compte la durée du tour d'eau. L'irrigation n'est déclenchée que lorsque les tensions mesurées atteignent les seuils

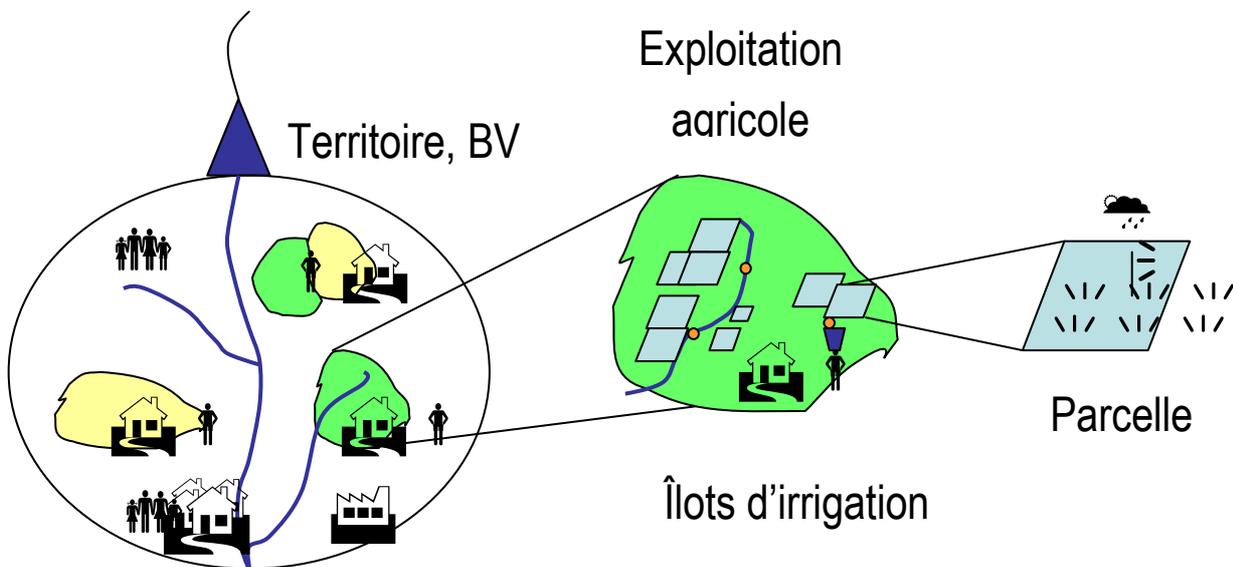
En décrivant la stratégie préconisée par la méthode IRRINOV® dans un simulateur de stratégies de conduite d'irrigation tel que MODERATO (Bergez et al. 2001), il est possible d'améliorer le conseil basé sur de l'expérimentation en utilisant la puissance de la simulation. Ce travail est en cours pour définir des stratégies de conduite de l'irrigation en situations contraignantes en volume d'eau (Hallouin, 2007).

Le bilan hydrique prend essentiellement en compte le climat tandis que la tensiométrie représente l'eau dans le sol. D'autres méthodes peuvent représenter le fonctionnement de la plante et son statut hydrique. La plus connue est le rayonnement infra-rouge. Une plante 'utilise' la transpiration notamment pour se refroidir. S'il n'y a pas suffisamment d'eau pour permettre la transpiration, la plante va s'échauffer. Elle va avoir alors une signature spectrale différente car le rayonnement d'un corps dépend de sa température. Dans les années 1990, des essais ont été menés à l'INRA sur la gestion de l'irrigation par mesure de rayonnement infra-rouge.

L'utilisation d'images satellite de type Spot pour suivre l'évolution de l'indice foliaire ou du taux de couverture du sol par la végétation verte à l'échelle de la parcelle est en cours de développement par Infoterra France et ARVALIS – Institut du végétal dans le cadre du programme Farmstar Mais du projet INFOAGRI. Ces indicateurs pourront être utiles à l'établissement du bilan hydrique et au conseil à l'irrigation.

## Conclusions

La gestion de l'irrigation peut être vue à plusieurs échelles de temps et d'espace (Figure 6). A chacune de ces échelles, des questions sont posées et des acteurs différents sont mobilisés (Tableau 1). Des progrès peuvent être faits pour mieux rationaliser l'utilisation de l'eau d'irrigation en fonction des contraintes locales vis-à-vis de cette ressource.



**Figure 6 :** Différentes échelles emboîtées de gestion quantitative de l'eau (d'après Leenhardt et Trouvat, 2004)

Un certain nombre d'outils et de méthodes ont déjà été développés. Cependant, il est encore nécessaire de décrire, analyser, comprendre et simuler les besoins en eau des cultures certes mais également des exploitations agricoles aux différentes échelles de gestion qui concernent la ressource en eau. Il est important de mieux cerner le cadre des contraintes des agriculteurs pour représenter leur stratégies afin d'intégrer l'irrigation dans la complexité de l'itinéraire technique, du système de culture, de l'assolement, de l'exploitation agricole.

Des progrès sont encore possibles dans la gestion de l'irrigation. Cependant, ceux-ci ne pourront avoir lieu que si l'information transférée pour fournir le conseil est reçue, acceptée et utilisée par l'exploitant. Il ne s'agit donc pas uniquement d'un problème d'agronomie systémique et de modélisation, mais d'une question transversale associant les sciences humaines et sociales aux sciences biotechniques. Par ailleurs, il est important que les acteurs gestionnaires aux différentes échelles concernées puissent échanger de l'information permettant une meilleure appréciation de l'état de la ressource et des besoins en eau. Un projet est en cours pour analyser cette question du transfert de l'information entre usagers et gestionnaires (projet INFOAGRI).

**Tableau 1:** Les différentes problématiques, échelles et acteurs de la gestion quantitative de l'eau

Quels problèmes ?	A quelle échelle d'espace ?	A quelle échelle de temps ?	Pour quels acteurs ?
<b>Irriguer</b> Quand débiter ? Quelle dose apporter et à quelle fréquence ? Que faire en cas de pluie ?	Bloc d'irrigation, exploitation	Mise en œuvre du plan d'action au cours de la campagne d'irrigation	L'agriculteur irrigant
<b>Fournir de l'eau</b> aux irrigants en quantité voulue et à l'endroit voulu	Périmètre irrigué	Gestion annuelle	Le prestataire de service gestionnaire de la ressource (SAR, ASA, ...)
<b>Préserver ou conforter la ressource en eau</b> pour divers usages (eau potable, irrigation, industrie, salubrité)	Région, département, bassin hydrographique	Planification à long terme	L'administration, les collectivités territoriales (Etat, Agence de l'Eau, Conseils Régionaux et Généraux, ...)

Afin de coordonner les forces et d'avancer dans cette problématique, l'INRA et les instituts techniques, ARVALIS - Institut du végétal et Cetiom, ont constitué l'Unité Mixte Technologique (UMT) « Outils et méthodes pour la gestion quantitative de l'eau : du bloc d'irrigation au collectif d'irrigants ». Les objectifs de l'UMT sont de trois ordres : (i) acquérir et diffuser des connaissances sur et pour la gestion quantitative de l'eau à différentes échelles, (ii) favoriser l'interaction entre partenaires et (iii) préparer de nouveaux programmes de recherche et développement. Le programme, engagé sur quatre ans, s'intéresse plus particulièrement aux décisions des irrigants et à leurs structures collectives. Les décisions des autres acteurs de la gestion de l'eau (gestionnaires de la ressource, pouvoirs publics et autres usagers) sont prises en compte comme des éléments du contexte des décisions des irrigants. Il se compose de trois actions : i) L'analyse et la modélisation du fonctionnement du système « sole irrigable » au sein de l'exploitation agricole ; ii) L'élaboration de stratégies de conduite de l'irrigation par culture ; iii) L'analyse et l'aide aux décisions de gestion de l'eau au niveau d'un collectif d'irrigants partageant une ressource en eau commune. Les recherches devraient bénéficier : a) aux irrigants et aux collectifs d'irrigants en les aidant dans leurs décisions sur les systèmes irrigables et en leur apportant des éléments utiles pour leurs relations avec les autres usagers ; b) aux organismes de conseil agricole pour leur métier d'accompagnement et d'études et notamment pour la mise au point d'outils pratiques d'aide à la décision en irrigation ; c) aux autres acteurs de la gestion de l'eau (gestionnaires, pouvoirs publics et autres usagers) en leur apportant une meilleure connaissance de la gestion agricole de l'eau utile pour leurs propres décisions

## Références bibliographiques

- ARVALIS – Institut du végétal, INRA, Chambres d'Agriculture de Midi-Pyrénées, 2005. Utilisation de MODERATO, outil de simulation dans l'aide à la décision pour la stratégie et la conduite de l'irrigation du maïs. Rapport final du projet ACTA – ICTA 2001 - 2003
- Bergez J.-E., Debaeke Ph., Deumier J.-M., Lacroix B., Leenhardt D., Leroy P., Wallach D., 2001. MODERATO: an object-oriented decision model to help on irrigation scheduling for corn crop. *Ecological Modelling*, 137, 43-60.
- Bergez J.-E., Nollet S., 2003. Maize grain yield variability between irrigation stands: a theoretical study. *Agric. Wat. Management* 60, 43-57.
- Bonnemort C., Bouthier A., Deumier J.-M., Specty R., 1996. Conduire l'irrigation avec IRRITEL : Intérêts et limites. *Météorologie* 14, 36-43
- Cemagref, 2002. Données de synthèse sur les coûts des matériels d'irrigation à la parcelle. [www.economie.eaufrance.fr](http://www.economie.eaufrance.fr)
- Clavé J., 2001. Représentation des règles de décision des irrigants de la vallée du Tarn et de l'Agout dans l'outil informatique MODERATO. ENITA-Clermont, 47 p + annexes.
- Darses O., 2007. Etude exploratoire des modifications d'assolement en systèmes de grandes cultures en région Midi-Pyrénées. Rapport d'ingénieur agronome, Production Végétale Durable, SupAgro, 52 p + annexes.
- Debaeke P., Bergez J.E., Leenhardt D., 2007. Perspectives agronomiques et génétiques pour limiter ou réguler la demande en eau d'irrigation In: *Gestion sociale et économique de l'eau: comment agir sur la demande?»*, Colloque de la Société Hydrotechnique de France, Paris, 17-18 Octobre 2007, pp.45-54
- Debaeke P., Mailhol J.C., Bergez J.E., 2006. Adaptations agronomiques au risque de sécheresse : Systèmes de grande culture. In Amigues J.P., P.Debaeke, B.Itier, G.Lemaire, B.Seguín, F.Tardieu, A.Thomas (éditeurs), *Sécheresse et agriculture. Adapter l'agriculture à un risque accru de manque d'eau*. Rapport de l'expertise scientifique collective, INRA (France), pp 259-305.
- Deumier J.M., Boussaguet J., Mailheau M., 2005. Stratégie des agriculteurs, pilotage et ajustement des apports d'eau aux besoins des cultures. Actes du colloque « Eau et agriculture durable », Cemagref, SIMA, Paris, 1er Mars 2005.
- Deumier J.M., Lacroix B., Mangin M., Vallade S., Molle B., Granier J., 2003. IRRIPARC : II - Des réglages de canons enrouleurs adaptés aux conditions de vent. Proc.54th Conf. ICID, Montpellier, 14-19 Sept, 2003.
- Deumier J.M., Leroy P., Jacquín C., Balas B., Bouthier A., Lacroix B., Bergez J.E., 2006. Gestion de l'irrigation au niveau de l'exploitation agricole. In *Traité d'irrigation*, 2<sup>ème</sup> édition AFEID, Ed. Lavoisier 1120-1150.
- Hallouin I., 2007. Caractéristiques d'un collectif d'irrigants de la vallée de l'Arros. Elaboration de stratégies d'irrigation du maïs pour un cas de ressource en eau restrictive avec le modèle MODERATO. M2Pro Gestion de la qualité des productions végétales, Université d'Avignon (FR), 76 p + annexes.
- ITB, 2006. IRRIBET® pour suivre l'évolution climatique et piloter l'irrigation de vos betteraves. La technique betteravière 859, 17-18.
- Jacquín C., Deumier J.M., Leroy P., 1993. LORA et la gestion de l'eau dans l'exploitation agricole. *Perspectives Agricoles* 184, 73-82.
- Lacroix B., 2004. Aides aux décisions d'irrigation en grandes cultures. Quelques outils et méthodes. Rencontre Agrometeo INRA, Avignon 14/10/2004.
- Magne M.A., Ingrand S., Cerf M., 2007. Modelling the farmers' information system to improve decision support systems. Proc. Int. Symp. Farming Systems Design, Catania (Italy), 10-12 Sept. 2007.
- Maton L., 2006. Représentation et simulation des pratiques culturales des agriculteurs à l'échelle régionale pour estimer la demande en eau d'irrigation. PhD Thesis, INP-Toulouse.
- Mircovitch C., 2001. Evaluation des avertissements collectifs à l'irrigation en région Midi-Pyrénées, Etude CRAMP-AEAG, Mémoire de DESS, INP-ENSAT

Munz H., 2007. Rapport final relatif au travail de recherche ethnologique mené autour de la méthode de pilotage de l'irrigation BHYP en vue de sa spécification et de sa transformation. Mémoire Ethnologie des techniques, Univ. Neuchâtel, Suisse.

Rouffaud H., 2001. Contextes, règles de décision et stratégies de conduite de l'irrigation du maïs dans les vallées du Tarn et de l'Agout. ENESAD, ITA Productions végétales, 28 p + annexes.

## **Répondre aux enjeux socio-économiques, de l'exploitation agricole au territoire.**

Delphine Leenhardt<sup>(1)</sup>, Arnaud Reynaud<sup>(2)</sup>

<sup>(1)</sup> INRA, UMR 1248 AGIR, BP52627, 31326 Castanet Tolosan cedex

<sup>(2)</sup> INRA, UMR 1041 LERNA, Université Toulouse 1, 31042 Toulouse cedex

**Mots clés : Territoire, sécheresse, conflit d'usage, gestion spatiale de l'eau, modèles de gestion intégrée, changement d'échelle, politiques publiques.**

### **Résumé**

La question de la sécheresse se pose à des échelles plus larges que la plante ou la parcelle. Pour aborder ces échelles plus vastes et les multiples interactions qui en résultent, l'INRA s'est engagé dans des travaux de développement d'outils nécessitant interdisciplinarité et partenariat.

A l'échelle de l'exploitation, le couplage d'un modèle agronomique et d'un modèle économique a permis de mesurer l'impact économique d'une sécheresse en France, en termes de capacité d'adaptation de l'agriculteur face au risque de sécheresse, et d'évaluer l'impact des politiques publiques de gestion de crise sur l'exploitation agricole.

A l'échelle d'un territoire, où l'agriculture interagit et se trouve en concurrence sur l'usage de l'eau avec d'autres activités, l'INRA développe des outils pour répondre à des préoccupations de court terme et de long terme. Ainsi, le développement d'un modèle d'estimation de la demande en eau d'irrigation puis des recherches en cours sur la conception d'une interface gestionnaire-usagers contribuent à une meilleure gestion stratégique de la ressource en eau. Pour améliorer la planification de la ressource, un modèle calculant l'allocation optimale de l'eau entre usages au sein d'un bassin de rivière est notamment en cours de développement. Il permettra par exemple l'évaluation de nouveaux systèmes de tarification.

### **Abstract**

The problem of drought concerns scales larger than the crop or the field. To tackle such larger scales and the inherent numerous interactions, INRA is embarking on the development of tools involving interdisciplinarity and partnership.

At the farm scale, to evaluate the economical impact of a drought in French conditions, a crop model has been coupled with an economical model. It made it possible to evaluate the capacity of adaptation of farmers to a drought and to measure the effect of drought crisis management policies on farms.

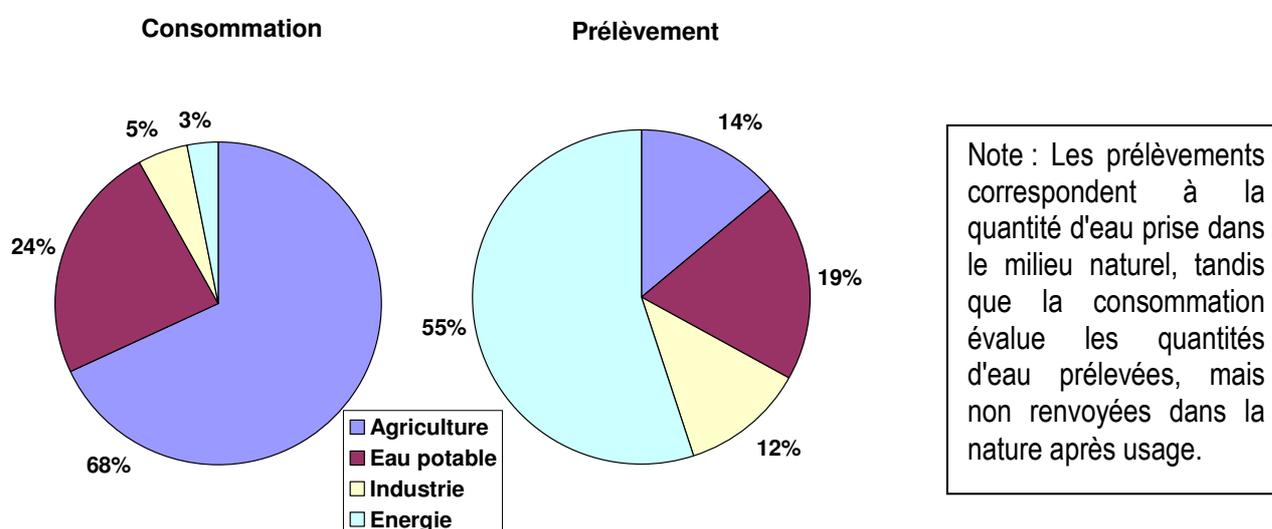
At a regional level, where agriculture interacts and competes for water with other activities, INRA develops tools for short term and long term issues. To improve strategic water management, a model of estimation of the regional irrigation demand has been developed and a current study aims at designing an interface between the water manager and the various water users. To improve water planning, a key work concerns the development of a model for optimal allocation of water between uses within a river catchment. It will allow for example the evaluation of new pricing devices.

## 1. Sécheresse, agriculture et territoire : les enjeux

Dans les interventions précédentes, le problème de la sécheresse pour les productions végétales a été traité à des échelles très locales : organe, culture, parcelle, voire groupes de parcelles. Or, ce problème de sécheresse se pose à des échelles plus grandes, de l'exploitation à des territoires de natures diverses (bassin versant, bassin de collecte, région, etc.). Au sein d'un territoire, au-delà d'une certaine taille, l'agriculture ne représente plus qu'une activité économique parmi d'autres ; de même, elle n'est qu'un usager de la ressource en eau parmi d'autres.

### 1.1 La place de l'agriculture comme usager de la ressource en eau

On a l'habitude d'identifier et de comparer quatre grands usages de l'eau : l'usage agricole (irrigation principalement), l'usage domestique (eau potable), l'usage industriel et énergétique, et l'usage environnemental qui correspond aux besoins en eau pour assurer un débit suffisant aux rivières pour satisfaire les besoins écologiques (vie des écosystèmes aquatiques) et récréatifs (pêche, canoë, etc.). On peut comparer les trois premiers usages en termes de consommation et de prélèvements (Figure 1) ; tandis que l'exigence en termes de débits permet de comparer les quatre usages.



**Figure 1** : Comparaison des usages agricoles, domestiques, industriels et énergétiques en termes de consommation et de prélèvement. (Source : IFEN, 2002)

L'irrigation représente en moyenne 68% des consommations mais avec une forte variabilité dans le temps et dans l'espace : cette part de consommation peut aller jusqu'à 90% durant l'été et dans le sud-ouest. La production d'énergie et l'usage industriel ont une consommation bien plus faible (respectivement 5% et 3% environ), mais des prélèvements très élevés et des rejets pouvant poser des problèmes de qualité. L'usage d'eau potable consomme 24% de la ressource en eau. L'exigence en débit de l'agriculture irriguée peut être très forte (jusqu'à 30 m<sup>3</sup>/s), alors que l'alimentation en eau potable ou le soutien d'étiage ne nécessite pas plus de 5 m<sup>3</sup>/s. On peut également mesurer l'exigence de l'agriculture par rapport à l'exigence de l'environnement en termes de volumes injectés dans un système hydraulique par un gestionnaire. Par exemple, dans le cas du système Neste (coteaux de Gascogne), le gestionnaire (CACG) a injecté 133 millions de mètres cube sur la période estivale (juin à septembre 2006), dont 41% pour satisfaire des besoins agricoles et 54% pour des besoins environnementaux.

## 1.2 L'agriculture, activité inscrite dans un territoire

Dans une perspective de développement durable des territoires, on ne peut ni considérer l'agriculture indépendamment des autres activités, ni juger la performance de l'agriculture et des autres activités sur un seul critère, qu'il soit économique, social ou environnemental. Une approche multi-activité (multi-usage) et multicritère s'impose. En ce qui concerne la gestion de la ressource en eau, la loi sur l'eau de 1992 impose aux Schémas Directeurs d'Aménagement et de Gestion des Eaux (SDAGE) de « fixer pour chaque bassin ou groupement de bassins les orientations fondamentales d'une gestion équilibrée de la ressource en eau ». De même, la Directive Cadre Européenne sur l'Eau (DCE)<sup>1</sup> a des exigences d'atteinte du bon état écologique des masses d'eau. Ces exigences conduisent à la mise en place de nombreuses préconisations portant sur la gestion des espaces : par exemple, préserver les champs d'expansion de crues, lutter contre l'imperméabilisation des sols, protéger les nappes phréatiques en contrôlant l'usage des espaces dont elles dépendent, etc. Pour les gestionnaires de l'eau, vouloir mettre en œuvre des préconisations de ce type, c'est entreprendre d'influencer divers modes d'occupation des sols, c'est chercher à jouer sur la régulation des usages des espaces pour des objectifs de gestion de l'eau et à développer ce que Narcy et Mermet (2003) appellent une « gestion spatiale de l'eau ».

## 1.3 Les enjeux de la gestion spatiale de l'eau

### **Les enjeux socio-économiques**

Le devenir de l'agriculture, des villes, et même de certaines industries, dépend d'abord de la disponibilité de ressources en eau. On sait les difficultés que représente l'allocation de ces ressources entre les usagers, notamment lors des épisodes de sécheresse. Plusieurs évolutions lourdes rendent cette tâche à la fois plus difficile et plus déterminante pour les activités humaines :

- Le changement climatique en cours laisse prévoir des modifications significatives du cycle de l'eau, avec des impacts régionaux importants sur les précipitations ou les températures<sup>2</sup> ainsi qu'une augmentation de la fréquence des phénomènes extrêmes (risques de sécheresses ou bien d'inondations).<sup>3</sup>
- La société française continue à se transformer, bouleversant les équilibres traditionnels entre les villes, les industries et les espaces ruraux ; en particulier, les agglomérations urbaines du sud de la France ont vu leur population augmenter rapidement, et en conséquence, les exigences en termes de besoins en eau potable se sont accrus et concentrés sur ces zones alors que les disponibilités en eau en été y sont faibles.

---

<sup>1</sup> Directive 2000/60/CE du 23 octobre 2000 établissant un cadre pour une politique communautaire dans le domaine de l'eau, transposée en droit français par la loi n°2004-338 du 21 avril 2004.

<sup>2</sup> La température moyenne sur la planète pourrait, d'après les projections du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC), s'élever de l'ordre de 1 à 3 degrés (Celsius) d'ici 2050.

<sup>3</sup> Selon le rapport IPCC (2007), le coût économique de la vague de chaleur de 2003 est estimé à 13 milliards d'euros pour l'Europe. L'agriculture a largement été affectée avec des pertes de rendement en maïs de 36% en Italie et de 30% en France. 650,000 hectares de forêt ont brûlé au cours de cette année, le Portugal ayant perdu 5% de la surface en forêt (coût estimé supérieur à 1 milliard d'euros).

- Les politiques publiques (PAC, lutte contre l'effet de serre) auront des impacts en termes d'occupation des sols (agriculture, forêt, villes) et de pratiques agricoles.
- Les préoccupations environnementales et leur transcription dans les textes réglementaires européens prennent une place de plus en plus importante en France. Par exemple, l'atteinte du *bon état écologique*, tel que défini par la DCE, sur la plus grande partie des masses d'eau du territoire français va supposer, en particulier pour les eaux superficielles, le maintien de débits de transport et de dilution suffisants des pollutions à la mer. Il en résultera des contraintes de prélèvement plus importantes pour l'ensemble des usagers.
- Les changements énergétiques (diminution des énergies fossiles, place à venir des énergies renouvelables telles que les biocarburants, l'hydroélectricité<sup>4</sup>, le nucléaire) vont se traduire par des changements structurels à l'échelle du territoire.

Ces changements globaux ont un impact non seulement sur les ressources disponibles en eau mais ils affectent également directement l'agriculture. Par exemple, Amigues et al. (2006) ont montré que, compte tenu de l'élasticité du revenu agricole à la consommation d'énergie, de lubrifiants et d'engrais, et de ces consommations au prix du pétrole, une hausse du prix du pétrole brut peut avoir des conséquences non négligeables sur le revenu agricole.

### **Les enjeux scientifiques**

#### *Prise en compte de l'échelle « territoire »*

Il convient tout d'abord de relever l'importance qu'a acquise le bassin versant ou, de manière plus générale, le territoire pour la gestion durable de la ressource en eau, comme cela a été récemment souligné par les autorités publiques. Par exemple, la mise en œuvre conjointe en France de la DCE, de « l'acte II » de la Décentralisation et de la Charte de l'environnement renforce considérablement une tendance déjà ancienne à la territorialisation de la politique de l'eau. Le territoire acquiert un nouveau statut, celui de concept opératoire aussi bien dans le domaine de l'aménagement du territoire que dans celui de la gestion de l'eau.

Une gestion efficace de la ressource en eau à l'échelle du territoire nécessite alors la mise en adéquation des différents usages au système d'offre en eau. En matière d'analyse de l'offre, les économistes ont souvent limité leur questionnement à l'étude des coûts de mise à disposition de cette ressource, notamment ceux des services d'eau. Il s'agit d'une étape nécessaire à la compréhension du fonctionnement du système mais insuffisante dans une optique de gestion de la ressource dans laquelle les interactions exercées par différents services d'eau via le système hydrographique doivent être prises en compte. En matière d'usage de l'eau, la plupart des recherches conduites à l'INRA concernent, et c'est bien naturel, l'agriculture. En excluant *de facto* toute possibilité d'arbitrage entre usages, les modèles qui ne représentent que l'usage agricole sur un territoire ne peuvent pas être utilisés dans une optique de gestion durable de la ressource en eau. Rosegrant et al. (2000) relèvent le besoin d'approches intégrées permettant d'éviter le problème de l'absence de coordination des politiques sectorielles de l'eau.

---

<sup>4</sup> Les opérateurs de barrages doivent de plus en plus contracter, avec des autorités publiques, des niveaux de lâchers d'eau en période d'étiage qui ont pour l'opérateur une faible valeur hydro-électrique mais qui ont pour les autorités publiques une valeur sociale élevée. Cela soulève des questions sur les modalités du partage du risque et de la tarification.

L'échelle du territoire est cependant difficile à appréhender car c'est à ce niveau que s'articulent des objectifs de gestion à court terme de la ressource en eau (maintien des débits d'étiage dans les rivières, priorité donnée à certains types d'usage) et des objectifs de planification à plus long terme (développement de nouvelles ressources en eau, modification des comportements individuels, etc.). De plus, le territoire se trouve à l'intersection de plusieurs politiques publiques (aménagement du territoire, protection de l'environnement, développement économique, etc.) qui peuvent avoir chacune leur propre rationalité. Les politiques publiques de l'eau se situent en effet au carrefour des politiques publiques de santé, de l'environnement, de l'aménagement du territoire, de l'agriculture, de l'industrie, et de l'énergie pour l'essentiel. Il est donc difficilement concevable de définir une politique de l'eau dénuée d'articulation organisée avec ces autres enjeux de politique publique. Toutes ces complexités nécessitent de développer de nouveaux outils de modélisation.

#### *Production d'outils intégrés*

Les schémas de partage de la ressource en eau sur un territoire ne pourront émerger que d'une confrontation de l'ensemble des usages au système d'offre en eau, cette confrontation pouvant elle-même engendrer des modifications des usages. Un moyen de réfléchir et d'organiser cette gestion efficace de la ressource en eau sur un territoire est de développer des *modèles de gestion intégrée de la ressource en eau* à l'échelle du bassin versant, modèles multi-usages et multi-sources<sup>5</sup>. Disposer d'outils permettant d'organiser cette mise en adéquation des usages sur un territoire donné est à la fois un enjeu prioritaire pour la puissance publique et une question de recherche importante. Si des travaux scientifiques ont d'ores et déjà été menés sur les différents usages de l'eau comme sur la question de la mise à disposition de la ressource (côté offre), les modèles intégrés de gestion de l'eau sont encore rares, en particulier en France. Le développement d'une approche intégrée multi-usages de la gestion de l'eau sur un territoire constitue donc un enjeu scientifique important<sup>6</sup>.

#### *Production d'outils pour les gestionnaires*

Répondre aux attentes des gestionnaires et des responsables de la politique de l'eau dans le contexte de la mise en place de la DCE 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 l'analyse de dispositifs d'acteurs.

## **2. Des recherches pour répondre à ces enjeux**

Ces enjeux nécessitent de développer des outils de modélisation à des échelles plus importantes que celle de la plante ou même de la culture. Dans ce qui suit, nous détaillons d'abord quelques travaux qui

<sup>5</sup> Voir Cai (2008) pour une revue récente de la littérature sur les modèles de gestion de la ressource en eau à l'échelle du grand bassin de rivière.

<sup>6</sup> Les rapports «Sécheresse et agriculture» de l'INRA (Amigues et al., 2006) et « L'eau : enjeux et perspectives de recherche » de la MSTP – DGER (Cognet et al., 2007) ont mis en évidence des besoins de recherche, de développement et de coordination des compétences sur la thématique de la gestion quantitative de l'eau.

ont cherché à mesurer les capacités d'adaptation à la sécheresse au niveau de l'exploitation agricole. Nous présentons ensuite quelques recherches à des échelles territoriales plus vastes.

### 2.1 *Des outils microéconomiques à l'échelle de l'exploitation*

Au cours de l'expertise scientifique collective sur les relations entre sécheresse et agriculture, pilotée par l'INRA en 2006, les chercheurs ont pointé du doigt l'absence de données quantifiées sur l'impact économique d'une sécheresse en France. En réponse, des économistes de l'INRA ont élaboré un couplage original entre le modèle agronomique STICS développé par l'INRA et un modèle de calcul économique<sup>7</sup>. Cette étude a eu pour but d'estimer le coût des épisodes de sécheresse pour un agriculteur représentatif de la région Midi-Pyrénées et de déterminer si ses décisions de court ou de long terme permettent d'atténuer de manière significative ce coût.

Ce travail de modélisation est complexe en raison de la dynamique en jeu entre les données climatiques, les productions agricoles et les décisions des agriculteurs. Ainsi, dans ce modèle qui prend en compte l'histoire climatique de 1972 à 2005, dont cinq années de sécheresse, le nombre de systèmes de culture utilisés par un même agriculteur est limité à trois représentatifs :

- système A : monoculture de maïs (très consommatrice en eau) ;
- système B : rotation entre blé dur et sorgho (moyennement consommatrice en eau) ;
- système C : rotation entre blé dur et tournesol (très peu consommatrice en eau).

Pour limiter l'impact économique d'une sécheresse, l'agriculteur ne peut modifier à court terme, c'est-à-dire à l'échelle intra-annuelle où les assolements sont déjà déterminés, que des tactiques d'irrigation (combinaisons possibles entre des choix de dates d'irrigation et des quantités d'eau à apporter) associée à un système de culture. A long terme, la réponse de l'agriculteur consiste, en outre, à déterminer quelle proportion de sa surface agricole utile doit être allouée à chacun des trois systèmes de culture de manière à maximiser son profit par hectare.

#### ***Une mesure des capacités d'adaptation de l'agriculteur face au risque de sécheresse***

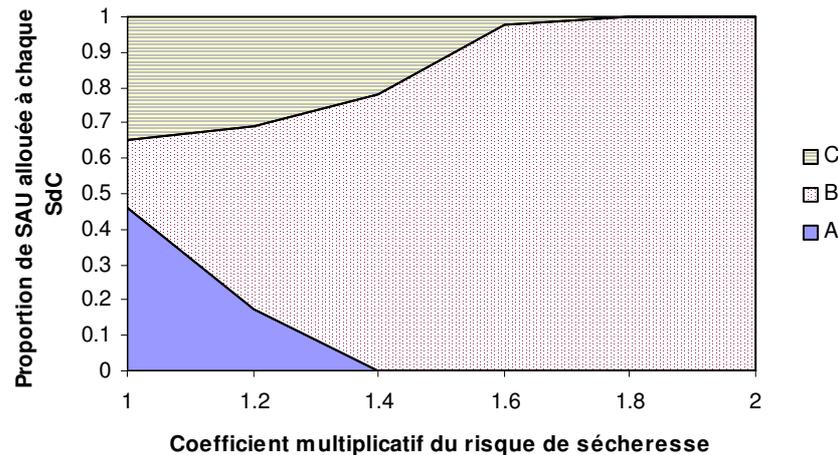
Le couplage du modèle économique de décision de l'agriculteur avec le modèle de culture STICS a permis d'abord de mesurer les capacités d'adaptation de l'agriculteur représentatif en Midi-Pyrénées face au risque de sécheresse.

A court terme, c'est-à-dire à système de culture donné, le coût économique induit par les épisodes de sécheresse peut être élevé pour l'agriculteur. Par exemple, si le risque d'avoir une année sèche est multiplié par deux (10 années de sécheresse sur 33 au lieu de 5 initialement), cela se traduit pour l'agriculteur par une perte de 12 % de son profit.

A long terme, les choix optimaux d'assolement varient de manière très significative avec l'augmentation de l'intensité des sécheresses (Figure 2).

---

<sup>7</sup> Cette étude est référencée en annexe du rapport final de l'expertise « Sécheresse et Agriculture ». Voir également Reynaud (2006) pour une version plus récente de ce travail.



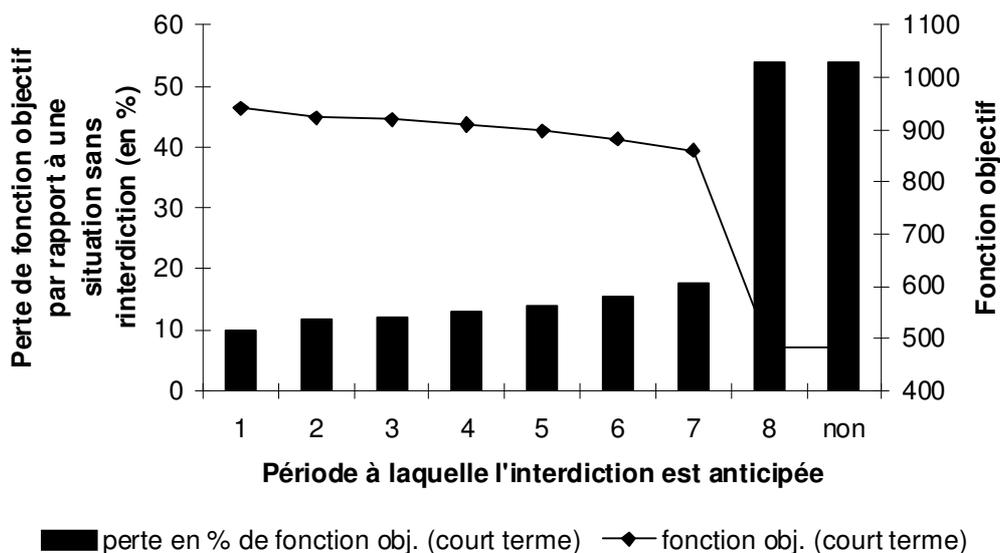
**Figure 2** : Impact d'une augmentation de la fréquence des années de sécheresse sur l'allocation optimale de la SAU aux systèmes de culture (SdC) (choix de long terme)

Alors qu'on s'attend à ce que le choix du système le moins consommateur d'eau l'emporte quand le risque de sécheresse est le plus élevé, c'est le système intermédiaire qui est retenu. Ce résultat ne peut être analysé qu'au regard des attitudes manifestées à l'égard du risque par les agriculteurs. Dans un univers climatique incertain, un agriculteur présentant de l'aversion pour le risque ne cherche pas à maximiser son profit moyen mais une position médiane jugée plus confortable. Pour ne pas voir son gain trop diminuer quand le risque climatique se réalise, l'agriculteur est prêt à opter pour des systèmes de culture qui ne fournissent pas le profit le plus élevé en année climatique « normale ». Ici, le système intermédiaire *blé dur/sorgho* qu'il retient dans le cas d'un risque de sécheresse très élevé présente des coûts de production faibles, ainsi que des rendements relativement faibles. A l'inverse, il est clair qu'un agriculteur qui ne présente pas d'aversion pour le risque acceptera des gains importants en cas de non sécheresse mais aussi des pertes importantes en cas de sécheresse.

#### **Une mesure de l'impact des politiques publiques de gestion de crise sur l'exploitation agricole**

Une des caractéristiques des années récentes de sécheresse a été la mise en place de limitations quantitatives des prélèvements en eau à usage agricole (via des arrêtés préfectoraux notamment). On peut donc anticiper que les phénomènes de sécheresse seront de plus en plus accompagnés par ces mesures, souvent administratives, de restriction des prélèvements agricoles en eau. Il est donc important pour la puissance publique d'évaluer les coûts (en termes de perte de fonction d'objectif de l'agriculteur) induits par ce type de restriction quantitative.

On sait que l'impact du risque de sécheresse sur la fonction d'objectif de l'agriculteur dépend de manière cruciale des possibilités qu'il a d'anticiper, ou non, les éventuelles limitations ou interdictions d'irriguer dans le cas d'un épisode de sécheresse avéré. Le modèle économique permet de déterminer le coût des sécheresses pour l'agriculteur en fonction de la date à partir de laquelle il sait que l'irrigation en période d'étiage sera rationnée ou interdite (une date plus précoce donne à l'agriculteur plus de flexibilité pour modifier ses pratiques). Cela permet à la puissance publique de mesurer les gains privés qui peuvent être associés à la mise en place de systèmes d'alerte précoce des sécheresses.



**Figure 3** : Impact des interdictions d'irriguer sur la fonction objectif de l'agriculteur représentatif de Midi-Pyrénées (choix de court terme) en fonction de la période à laquelle l'interdiction est connue. Les périodes correspondent à des décades à partir du 1<sup>er</sup> juin.

Reynaud (2006) montre tout d'abord que la perte pour l'agriculteur en termes de fonction d'objectif d'une interdiction d'irriguer non anticipée est très importante à court terme. Lorsque l'agriculteur ne peut pas anticiper les interdictions d'irrigation en période d'étiage lors des années sèches, la perte peut atteindre 54 % de son profit. Il apparaît donc important que les pouvoirs publics mettent en place des mécanismes d'alerte précoce des sécheresses. Ensuite, toujours à court terme, une information sur le risque d'interdiction d'irriguer en période d'étiage transmise de manière précoce aux agriculteurs permet de limiter de manière significative la perte de fonction d'objectif (Figure 3). Par contre, les décisions de long terme de l'agriculteur (réallocation des surfaces entre les trois systèmes de culture) permettent d'atténuer de manière très importante le coût des restrictions d'irrigation en période d'étiage : la perte résultant des interdictions d'irriguer est modérée quel que soit leur degré d'anticipation.

En termes de recommandation de politique économique, ces résultats suggèrent qu'il est important pour le décideur public de faciliter les changements de système de culture, via la mise en place de mécanismes incitatifs, d'aide technique, de transmission d'information, par exemple. Ces résultats suggèrent également que des mécanismes d'alerte précoce des sécheresses peuvent générer des gains substantiels pour l'agriculture.

## 2.2 Des outils à l'échelle territoriale

A l'échelle d'un territoire, la diversité des activités présentes génère une diversité d'usages de la ressource en eau. Gérer la ressource en eau nécessite dans ce cas que l'on dispose de modèles pour procéder aux arbitrages que l'on juge soit efficaces, ce qui conduit à affecter la ressource à ceux qui la valorisent le plus, soit équitables, ce qui conduit à en garantir l'accès à tous avec un coût raisonnable.

Les préalables d'une gestion efficace, à l'échelle du territoire, de la ressource en eau sont clairs. L'offre disponible doit être identifiée, dans le temps et dans l'espace, tout comme les fonctions de demande de chacun des usagers potentiels. Les caractéristiques des réseaux hydrographiques souterrains et de surface ainsi que les interactions que ces deux systèmes entretiennent doivent être connues de manière à quantifier la ressource disponible et son coût de mise à disposition. La connaissance des

fonctions de demande des usagers constitue ensuite le deuxième préalable à une gestion raisonnée de la ressource. Dès lors que la ressource est limitante ou aléatoire, la question du partage de l'eau entre différents usages se pose, tant pour le gestionnaire chargé de délivrer l'eau aux usagers en temps et lieux utiles au cours d'une année, que pour les gestionnaires chargés de planifier à plus long terme l'eau et les usages de l'eau. Les activités de recherche de l'INRA concernent ces deux pas de temps.

#### **A court et moyen terme : contribution à la gestion stratégique de l'eau**

La gestion stratégique de l'eau, telle que définie par Trouvat (1997), concerne les décisions saisonnières avec ajustement possible en cours de saison. Il s'agit typiquement, pour un gestionnaire comme la Compagnie d'Aménagement des Coteaux de Gascogne (CACG), de déterminer les quotas d'eau affectés à l'irrigation en début de saison, cette décision étant contrôlée, et si besoin réajustée, une fois par semaine tout au long de la saison d'irrigation. Ce contrôle hebdomadaire vise à vérifier si les conditions de quotas d'eau accordés à l'usage agricole sont compatibles avec les autres usages de l'eau sur le bassin, et vont le rester pour le reste de la campagne d'irrigation. Cette décision participe donc au processus de partage de la ressource entre les différents usages de l'eau présents.

Le modèle ADEAUMIS, développé conjointement par l'INRA, la CACG et d'autres partenaires<sup>8</sup>, est désormais un élément du système décisionnel mis en œuvre chaque année depuis 2003 par la CACG pour sa gestion stratégique. Il permet d'estimer, sur l'ensemble d'un périmètre irrigué, quelle a été la demande en eau d'irrigation jusqu'au jour du contrôle hebdomadaire et, par utilisation de scénarios climatiques, de faire des projections sur la demande en eau d'irrigation à venir. L'apport majeur de l'INRA a consisté à proposer l'intégration, dans le processus d'estimation de la demande en eau d'irrigation, de modèles agronomiques permettant de mieux prendre en compte la réalité des pratiques culturales et leur diversité à l'échelle du périmètre irrigué (cf. encart Leenhardt et Trouvat, 2004). Cette modélisation des pratiques agricoles et de leur diversité n'est en fait qu'un moyen indirect d'accéder à l'information nécessaire au gestionnaire. Un moyen beaucoup plus direct serait que le gestionnaire demande directement cette information aux irrigants et l'agrège pour prendre ses décisions de gestion de la ressource. Une étude<sup>9</sup> combinant agronomie, ergonomie et ethnologie est actuellement en cours pour comprendre pourquoi ce moyen direct d'accès à l'information n'est pas actuellement mobilisé par le gestionnaire. Partant de l'hypothèse que la connaissance de l'état des ressources en eau est un élément stratégique et tactique pour les agriculteurs<sup>10</sup>, cette étude a pour objectif d'analyser si, et comment, un outil de partage des connaissances pourrait être mis en place entre le gestionnaire de la ressource en eau et les irrigants utilisant cette même ressource.

---

<sup>8</sup> Le modèle ADEAUMIS a été développé par 4 partenaires : INRA, CACG, Météo-France et SCOT (dépôt à l'APP en 2004). Sa mise en œuvre opérationnelle a bénéficié des contributions supplémentaires d'ARVALIS Institut du végétal et d'INFOTERRA (anciennement ASTRUM) lors de projets successifs.

<sup>9</sup> Projet INFOAGRI, Lot 250 « interface usagers-gestionnaires » : projet financé par MINEFI et MAP dans le cadre du Pôle de compétitivité « aéronautique, espace et systèmes embarqués ».

<sup>10</sup> La connaissance par les agriculteurs de l'état de la ressource en eau intervient comme élément de choix de leur assolement et de leur stratégie d'irrigation, et, en cours de campagne d'irrigation, elle peut les amener à réviser leurs choix stratégiques par modification des doses et fréquences d'arrosage

### **A plus long terme : recherche et développement d'outils de planification et de gestion de la ressource**

La planification, toujours selon (Trouvat 1997), concerne les décisions prises à l'échelle pluriannuelle et qui impactent sur l'offre et la demande en eau. Il s'agit par exemple de décisions relatives à la création de ressources (construction de barrages), à des choix de tarification ou de toute autre mesure incitative ou réglementaire qui peuvent orienter la demande.

L'outil principal de la planification est la politique publique (PP) qui définit les mesures à appliquer pour atteindre l'objectif souhaité. Les gestionnaires concernés par la planification cherchent (a) à construire des PP adaptées à leur territoire et (b) à évaluer l'impact des PP imposées (PAC par ex.) sur leur territoire en général, et leurs ressources en eau en particulier.

Le processus de construction de PP est itératif et intègre des phases d'évaluation des PP candidates. Un même outil peut donc être utile aux deux cas précédents (a et b). La construction de PP spécifiques à un territoire ou à une situation donnée (vs. PP imposée) concerne par exemple les gestionnaires administratifs qui doivent évaluer la pertinence de la création de nouvelles ressources (construction de barrage par exemple) ou mettre en place des systèmes de tarification favorables à une utilisation optimale des ressources et à la santé économique et sociale de leur territoire, mais aussi des gestionnaires prestataires de service qui cherchent à construire puis évaluer un système efficace pour partager l'eau entre usagers au cours de la campagne (par exemple, évaluer la pertinence d'un système basé sur l'attribution de quotas d'eau avec liste d'attente, etc.). De plus en plus, les décisions relatives à la planification de l'eau et/ou des territoires sont l'aboutissement de processus intégrant la consultation du public, la mobilisation d'instances de concertation, etc. qui mobilisent un grand nombre d'acteurs (qui sont autant de porteurs d'enjeux et représentent toute la gamme des usages de l'eau). Les outils et méthodes à développer pour assister la planification conjointe des ressources en eau et du territoire<sup>11</sup> doivent permettre de répondre aux préoccupations de tous ces acteurs et permettre une évaluation multicritère des PP envisagées ou imposées. Dans ce paragraphe, nous présentons trois chantiers menés par l'INRA dans le cadre du projet APPEAU<sup>12</sup>.

#### *Développement d'un outil régional de construction et d'évaluation de PP sur un périmètre irrigué : le modèle MOGIRE<sup>13</sup>*

MOGIRE est un modèle générique de gestion intégrée de la ressource eau à l'échelle du grand<sup>14</sup> bassin de rivière permettant d'optimiser l'allocation de l'eau entre différents usages concurrentiels mais aussi de simuler des scénarios et d'analyser leur impact (analyse de politiques publiques).

Le modèle de gestion intégrée représente la quantité d'eau demandée par les différents usages (alimentation en eau potable, industrie, agriculture, environnement) et le profit généré par chacun de

---

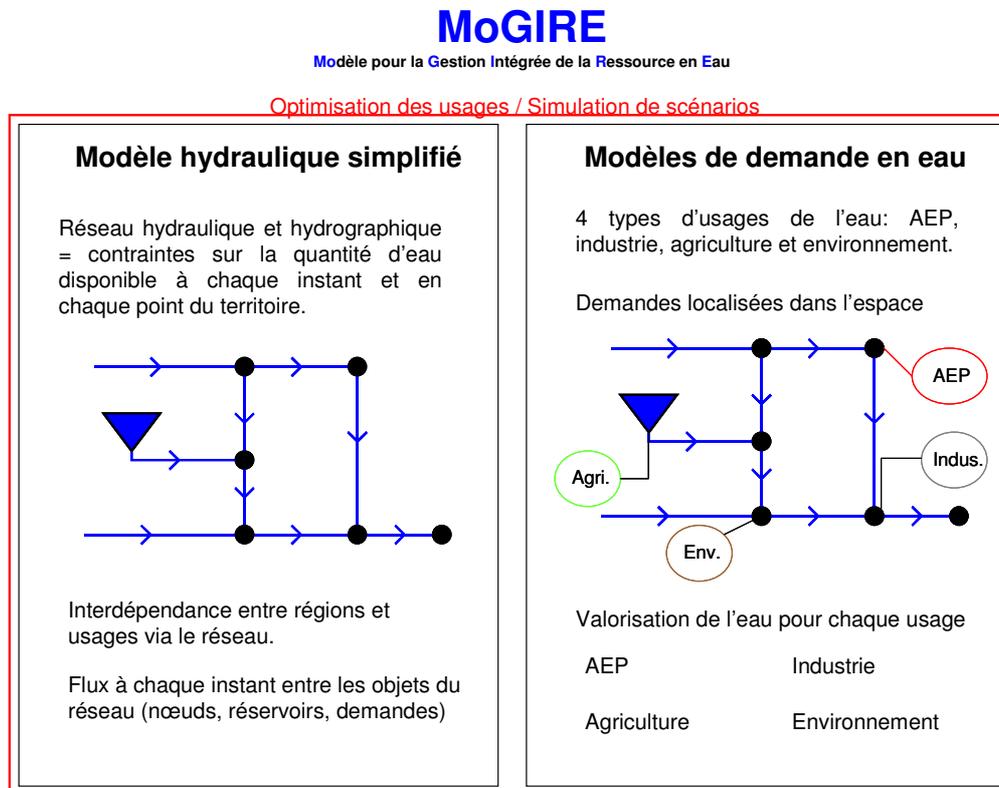
<sup>11</sup> Par définition, la gestion spatiale de l'eau considère conjointement la ressource en eau et le territoire impacté par et impactant cette ressource.

<sup>12</sup> Projet financé par l'ANR dans le cadre du programme « Agriculture et développement Durable ».

<sup>13</sup> Voir Reynaud et Leenhardt (2008) pour une présentation de MOGIRE.

<sup>14</sup> C'est à-dire un bassin de rivière d'une taille telle qu'il existe une forte variabilité spatiale en termes agro-pédo-climatiques laquelle génère des demandes en eau diversifiées d'un point à l'autre du bassin.

ces usages. Un modèle hydraulique arc-nœud permet de quantifier l'offre en eau en tous points du système considéré et au pas de temps choisi (Figure 4).



**Figure 4** : Architecture générale du modèle MOGIRE

Des modèles de demande, discrétisés sur le même pas de temps, sont développés pour chaque usage. Les usages non-agricoles (alimentation en eau potable (AEP) et industrie) sont modélisés via des approches économétriques. L'usage environnemental est représenté par l'introduction de contraintes de débits en certains points du système : les « débits objectifs d'étiage (DOE) » à respecter sur chaque rivière. En ce qui concerne l'usage agricole, on passe par une approche mécaniste : un modèle biophysique permet de simuler le processus de croissance des cultures pour différents itinéraires techniques, notamment différents vecteurs d'apports en eau tout au long de la campagne d'irrigation, ce qui permet de générer une fonction de production qui est alors utilisée par le modèle économique pour modéliser les choix de systèmes de cultures et d'itinéraires techniques par les agriculteurs, choix qui conditionnent ensuite les demandes en eau.

MOGIRE est actuellement en cours de développement. Il permettra à terme de :

- caractériser l'allocation optimale de l'eau au sein du système considéré et entre usages en conditions de changements de contexte économique, climatique, agronomique ou réglementaire ;
- définir et tester des politiques publiques de gestion de la ressource en eau à l'échelle du territoire. Il s'agit en fait de proposer des instruments économiques de régulation des demandes permettant d'atteindre (ou tout au moins de se rapprocher) de l'allocation optimale. Ces instruments incluent le recours potentiel à des outils réglementaires (par exemple, des quotas d'eau d'irrigation ou la mise en place d'un marché de droits d'irrigation) ou/et tarifaires (augmentation du prix de l'eau).

Ce modèle est en cours d'application au système Neste, vaste réseau hydraulique du sud-ouest de la France (15 000 km<sup>2</sup>) constitué par l'ensemble des rivières de Gascogne réalimentées par le canal de la Neste.

*Conception et test d'un système de tarification durable de l'eau dans MOGIRE*

L'action publique, lorsqu'elle vise à organiser au mieux l'utilisation de la ressource en eau dans des contextes de rareté, peut être envisagée selon 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.

Les politiques publiques peuvent également s'appréhender en fonction de leur horizon temporel. A court terme, il n'existe que deux façons de résoudre les conflits d'usage créés par la rareté de la ressource en eau; c'est-à-dire qu'il n'existe que deux façons de mettre en adéquation les demandes, expressions des besoins, avec l'offre, expression des disponibilités : *faire payer* et *rationner*. Si la mise en place de systèmes de taxation conduit, *in fine*, à rationner les usagers, il est cependant clair que les effets de redistribution de ces deux approches sont différents. Chaque méthode admet des variantes plus ou moins sophistiquées. Les tarifs peuvent être modulés selon divers paramètres : tarification par type d'usager et tarification de pointe, tout comme les méthodes de rationnement, avec interdiction de certains usages et limitation des prélèvements à certains moments. D'autre part, le recours à l'un des modes n'exclut pas nécessairement l'utilisation de l'autre. Un exemple fréquent de combinaison des deux modes de répartition de la ressource entre ses différents usagers potentiels consiste à faire payer en temps dit '*normal*' et à rationner dans certaines situations qualifiées d'*exceptionnelles*. A long terme, la demande et l'offre peuvent être significativement modifiées, de sorte que les conditions de leur mise en adéquation, au jour le jour, seront elles aussi transformées. Les différents utilisateurs peuvent changer leurs équipements, adopter des pratiques plus économes de la ressource, et, pour les producteurs, agriculteurs, industriels et fournisseurs de services, modifier leurs processus de production. L'offre peut être augmentée en investissant dans des équipements plus performants qui réduisent les pertes de distribution dans les réseaux ou en mettant en exploitation d'autres approvisionnements généralement plus coûteux.

Dans le cadre du projet APPEAU, un travail est en cours sur le développement de nouvelles méthodes de tarification adaptative de l'eau à usage agricole.<sup>15</sup> Dans cette étude, les auteurs montrent qu'il est possible de concevoir des systèmes de tarification qui permettent d'anticiper les conflits d'usage en cas de ressource rare tout en assurant un équilibre budgétaire du service de l'eau et une valorisation agricole de l'eau efficace.

---

<sup>15</sup> Voir Terraux et Tidball (2008).

Naturellement, l'évaluation (à la fois ex-ante et ex-post) de ces politiques publiques nécessite des approches multicritères qui, outre des considérations économiques, incluent des aspects sociaux et environnementaux. Cette évaluation passe par des outils originaux de modélisation à l'échelle du territoire.

*Développement d'une méthode de traduction de discours d'acteurs sur les systèmes de culture d'un territoire pour en évaluer l'impact sur les ressources en eau*

Par la surface qu'elle occupe et son impact économique et environnemental sur le territoire, l'agriculture concerne de nombreux acteurs porteurs d'enjeux variés. Lors des consultations du public sur l'eau (instances de concertation, débats publics, etc.), ces acteurs peuvent avoir l'occasion de proposer leur vision de l'aménagement du territoire, notamment en termes de changement sur la distribution des systèmes de culture, pour répondre aux enjeux qui se posent sur l'eau. Cela a par exemple été le cas lors du débat public sur la construction du barrage de Charlas où tout un collectif d'acteurs a proposé de réduire les surfaces de maïs irrigué pour résoudre les problèmes de débit de la Garonne en période d'étiage et éviter la construction du barrage. Ces propositions d'acteurs peuvent être des options à prendre en considération dans les activités de planification des ressources en eau et des activités du territoire. Cependant, une difficulté réside dans le fait que ces propositions sont le plus souvent exprimées sous forme d'un discours très qualitatif. Or, les modèles qui pourraient permettre d'évaluer ces discours (en calculant un panel d'indicateurs pertinents pour juger de leur impact sur l'eau, mais aussi de leur impact économique et social) nécessitent des données quantitatives et des localisations spatiales relativement précises.

Un travail de recherche en cours (thèse de L. Clavel<sup>16</sup>) vise donc à développer une méthode qui permette à un gestionnaire (par exemple l'Agence de l'Eau) de traduire un discours portant sur la distribution des systèmes de culture d'un territoire en données d'entrée d'un modèle de simulation. Le défi à relever est que cette méthode soit adaptée pour traduire un maximum de discours émanant de l'ensemble des acteurs susceptibles d'être concernés par les relations entre activité agricole et ressource en eau.

Le cas d'étude correspond à la combinaison d'un territoire (système Neste) avec un enjeu sur l'eau (pénurie de la ressource en période d'étiage, due en partie à une irrigation importante) et d'un choix d'indicateurs d'évaluation simulables par modèle. Nous avons retenu (*a priori* et dans un premier temps) deux types d'indicateurs, la demande en eau d'irrigation et le rendement économique des cultures, qui sont calculables par le modèle bio-décisionnel MOuSTICS<sup>17</sup> si on applique celui-ci sur l'ensemble du territoire d'étude. Une division élémentaire du territoire et une approche matricielle ont été retenues pour traduire le discours et appliquer MOuSTICS sur l'ensemble du territoire.

L'unité élémentaire de division du territoire a été choisie de manière à avoir un sens non seulement du point de vue de la gestion de l'eau, mais également du point de vue de la gestion du territoire. Il s'agissait en effet d'avoir une division du territoire adaptée aux enjeux des différents acteurs concernés.

---

<sup>16</sup> Bourse cofinancée INRA – Conseil Régional Midi-Pyrénées

<sup>17</sup> MOuSTICS correspond au couplage du modèle multi-cultures STICS (Brisson et al. 2003) avec la partie décisionnelle de MODERATO ((Bergez et al. 2001) - cf. exposé de Bergez et Lacroix)

Les variables d'entrée de MOuSTICS permettent de spécifier la culture et son itinéraire technique, le type de sol et ses propriétés et les séries climatiques à utiliser pour les simulations en un site donné. Compte tenu de la taille de ces unités élémentaires et de la nature des sources d'information utilisées pour déterminer les données d'entrée de MOuSTICS, chaque unité élémentaire est caractérisée par une distribution de modalités de variables d'entrée. MOuSTICS doit donc être lancé sur chaque unité élémentaire autant de fois qu'il y a de combinaisons. Sur chaque unité élémentaire, une matrice permet de spécifier la part de l'unité correspondant à une combinaison donnée. Modifier les valeurs des cellules des matrices revient à modifier les caractéristiques agro-pédo-climatiques du territoire d'étude. Les discours des acteurs qui nous intéressent (portant sur la distribution spatiale des systèmes de culture) visent à modifier les caractéristiques du territoire. Pour pouvoir transformer ces discours en cartographie de données d'entrée de MOuSTICS, nous voulons donc explicitement intégrer comme axes des matrices les facteurs pouvant être mobilisés par les acteurs pour modifier la localisation ou l'extension de tel ou tel système de culture. En plus des variables d'entrée du modèle (culture, sol et climat), nous n'avons, à ce stade, considéré comme facteur et intégré aux matrices que le type d'exploitation. Ces facteurs permettent la traduction de scénarios « tests ». La mise à l'épreuve de cette méthode à différents discours, de complexité et d'origine variées, devrait permettre, par la suite, l'identification de nouveaux facteurs. Selon la nature de ceux-ci, les choix faits, relatifs à la division du territoire ou à la nature des axes des matrices, pourraient être remis en cause ou confortés. La méthode ainsi consolidée devrait pouvoir à terme être directement utilisable par un gestionnaire. Pour faciliter la conception puis le transfert de la méthode, ce travail est suivi par l'Agence de l'eau Adour-Garonne.

### **3. Conclusion : un changement d'échelle générateur d'interdisciplinarité**

Les enjeux socio-économiques actuels, fortement liés aux changements globaux multiples - environnementaux, sociaux, économiques et politiques - nécessitent de considérer l'agriculteur (et l'agriculture) :

- comme une cible de ces changements complexes, et c'est à ce titre que nous avons développé les travaux de recherche permettant d'analyser la réaction des exploitations au niveau micro-économique ;
- comme un usager de la ressource en eau et un acteur économique parmi d'autres au sein des territoires, et c'est à ce titre que l'INRA développe de plus en plus de travaux à ces échelles territoriales.

Pour l'agronomie, dont le domaine d'étude et d'observation a longtemps été limité à la parcelle agricole, s'intéresser aux territoires que sont le bassin versant, le bassin de collecte, ou la région administrative, procède d'un véritable changement d'échelle. De même, pour l'économie, habituée aux approches micro-économiques (à l'échelle de l'exploitation) ou aux approches macro-économiques (à l'échelle d'un pays par exemple), s'intéresser aux échelles intermédiaires est une véritable révolution.

Ce changement d'échelle, somme toute récent à l'INRA, n'est pas une simple possibilité offerte au chercheur mais une réelle nécessité imposée par la réalité des changements globaux et par la demande de la société d'en évaluer les conséquences et de proposer des réponses adaptées dans une perspective de développement durable. Il est générateur de pluridisciplinarité (différentes disciplines sont concernées), d'interdisciplinarité (les disciplines sont désormais amenées à travailler ensemble) et même de transdisciplinarité (la recherche doit travailler avec les partenaires du monde socio-économique pour apporter des réponses adaptées). En effet, l'appréhension d'entités spatiales plus étendues amène à considérer des activités sociales et économiques plus nombreuses, en interaction entre elles et avec des processus biophysiques, et la préoccupation de développement durable incite à ne pas négliger ces interactions. Il est donc nécessaire que les disciplines dialoguent, ce qui suppose de surmonter des différences de langages et de concepts, ce qui peut être parfois très long. Pour que les interactions évoquées puissent être prises en compte, il faut qu'il y ait une réelle mise en commun (intégration) des connaissances relatives à ces activités et processus. Or, si certaines disciplines ont une approche quantitative qui conduit à une modélisation mathématique qui facilite l'intégration,

d'autres disciplines ont une approche beaucoup plus qualitative et descriptive des processus en jeu. Si la complémentarité entre ces deux types d'approche n'est pas à démontrer (de nombreux travaux en attestent<sup>18</sup>), l'intégration de connaissances qualitatives dans des modèles mathématiques reste un véritable défi à relever.

---

<sup>18</sup> Cf. dans cet article les travaux réalisés dans le cadre du projet INFOAGRI entre agronomie, ergonomie et ethnologie.

Encart 1

La CACG est une Société d'Aménagement Régional avec comme mission principale la "maîtrise de l'eau dans la Région Midi-Pyrénées", impliquant la mobilisation des ressources en eau pour faire face aux besoins (irrigation, salubrité). Pratiquement, la CACG est gestionnaire du Système Neste, vaste réseau hydrographique (15 000 km<sup>2</sup>) regroupant 17 rivières réalimentées par des réservoirs et canaux, et répondant aux besoins en eau de 50 000 ha irrigués et 200 000 habitants environ. Prestataire de service, elle vend l'eau à ses clients (agriculteurs – individuels ou constitués en associations, industriels et collectivités locales) selon un contrat qui spécifie que le client s'engage à respecter un quota en volume et un débit souscrit et que la CACG s'engage à mettre l'eau à la disposition de ses clients en temps et lieux utiles. Contrairement à certaines situations (en Espagne par exemple) où le client passe commande de l'eau nécessaire 48h à l'avance, la CACG ne demande pas d'information supplémentaire à ses clients en dehors du débit souscrit. Aussi, une de ses tâches est de prévoir à quels moments et où auront lieu les prochains prélèvements d'eau des rivières.

La prise de décision des lâchers d'eau en cours de saison par le gestionnaire s'appuie sur un système très sophistiqué et instrumenté de suivi de débits des rivières et sur une estimation, jusqu'à peu très simplifiée, des prélèvements passés et futurs. A deux dates clé, mais également de manière hebdomadaire, le gestionnaire cherche ainsi à situer la campagne d'irrigation en cours par rapport à un standard, de manière à répondre aux questions suivantes: « Comment aborder la fin de la campagne ? Faut-il revoir les quotas ? Peut-on mettre plus d'eau dans les rivières pour soutenir les débits d'étiage ? ».

En 1998, la conjonction d'un tarissement précoce des rivières, d'un semis tardif des cultures et d'une période froide en juin a mis en défaillance ce système de gestion de la CACG. Ensemble, l'INRA et la CACG se sont posés la question suivante : « comment intégrer au mieux les informations et outils agronomiques disponibles pour améliorer le système de gestion de la CACG, tout en lui gardant son caractère opérationnel ? »

L'analyse du système de gestion nous a permis de préciser le cahier des charges du modèle ADEAUMIS visant à améliorer l'estimation de la demande en eau d'irrigation sur le Système Neste. Ainsi, pour mieux estimer les prélèvements passés, nous avons proposé d'utiliser l'information climatique la plus récente (remplacer l'utilisation de chroniques historiques par les données de l'année en cours), d'utiliser un modèle rendant compte de l'impact des spécificités climatiques de l'année en cours sur le développement des cultures et d'introduire des informations sur les pratiques réelles des irrigants dans le modèle (simuler les pratiques d'irrigation) ou en entrée du modèle (préciser les dates de semis de l'année en cours). Le modèle ADEAUMIS a été appliqué et validé sur les années 1998 et 2000. Au cours de l'été 2003, il a été testé en temps réel par le service de gestion stratégique de la CACG: avec les conditions atypiques de cette saison (printemps sec avec semis précoces, chaleur estivale précoce et caniculaire, sécheresse estivale). Il a ainsi mis en évidence ses capacités à prévoir l'avance du calendrier d'irrigation, les volumes prélevés et l'arrêt des irrigations. Dans ces conditions extrêmes il a également mis en évidence les limites du système de gestion antérieur basé sur des séries climatiques passées.

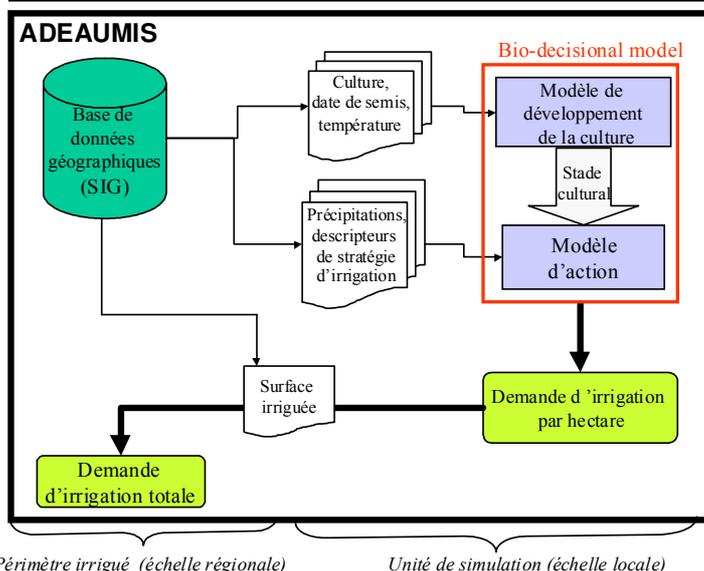


Figure 5 : ADEAUMIS est un outil d'estimation de la demande en eau régionale, basé sur un modèle bio décisionnel et une base de donnée géographique

## Références bibliographiques

- Amigues J.P., Debaeke P., Itier B., Lemaire G., Seguin B., Tardieu F., Thomas A. (éditeurs), 2006. Sécheresse et agriculture. Réduire la vulnérabilité de l'agriculture à un risque accru de manque d'eau. Expertise scientifique collective, Rapport, INRA (France), 380 p + annexes.
- Bergez, J.-E., Debaeke P., Deumier J.-M., Lacroix B., Leenhardt D., Leroy P., Wallach D., 2001. MODERATO: an object-oriented decision tool for designing maize irrigation schedules. *Ecological Modelling* 137, 43-60.
- Brisson N., Gary C., Justes E., Roche R., Mary B., Ripoche D., Zimmer D., Sierra J., Bertuzzi P., Burger P., Bussi re F., Cabidoche Y.M., Cellier P., Debaeke P., Gaudillère J.P., H nault C., Maraux F., Seguin B., Sinoquet H., 2003. An overview of the crop model STICS. *European Journal of Agronomy* 18, 309-332.
- Cai X., 2008. Implementation of holistic water resources-economic optimization models for river basin management - reflective experiences. *Environ. Model. Softw.* 23, 2-18.
- Cognet, G ( diteur), 2007. L'eau. Enjeux et perspectives de recherches. Rapport de la mission scientifique, technique et pédagogique du Ministère délégué à l'enseignement supérieur et à la recherche, 107 p.
- IPCC, 2007. Summary for policymakers. Land use, land-use change, and forestry. A special report of the IPCC, International Panel on Climate Change.
- Leenhardt D., Trouvat J.L., 2004. ADEAUMIS, un outil pour estimer la demande en eau d'irrigation à l'échelle régionale. Exemple d'utilisation en temps de crise. *Ingénieries* 40, 37-50.
- Narcy J.B., Mermet L., 2003. Nouvelles justifications pour une gestion spatiale de l'eau: New justifications for a spatial management of water. *Nature Sciences Sociétés* 11, 135-145.
- Reynaud A., 2006. Adaptation à court et à long terme de l'agriculture face au risque de sécheresse : Une approche par couplage de modèles biophysiques et économiques. En révision aux Cahiers d'économie et de Sociologie Rurales.
- Reynaud A., Leenhardt D., 2008. MoGIRE: A Model for Integrated Water Management. Article accepté pour présentation au congrès iEMSs 2008 (International Congress on Environmental Modelling and Software).
- Rosegrant M.W., Ringler C., McKinney D.C., Cai X, Keller A., Donoso G., 2000. Integrated economic-hydrologic water modeling at the basin scale: the Maipo river basin. *Agricultural Economics* 24, 33-46.
- Terraux J-P, Tidball M., 2008. Water sharing among competitive farmers in temperate climate: A study of different pricing mechanisms. Article accepté pour présentation lors du 13eme congrès mondial sur l'eau (IWRA 2008), Montpellier.
- Trouvat J.L. 1997. Concepts de base de la gestion quantitative de la ressource en eau. In F.Lacroix, editor, Irrigation, outil de qualité et de régularité de la production agricole pour les marchés et les industries d'aval. La gestion de l'eau à l'échelle d'un bassin versant: l'exemple du Sud-Ouest AFEID-AGPM. Antony. (October 1997), pp 121-136.

## La mise en œuvre de pratiques innovantes en vue de mieux valoriser la ressource en eau chez les agriculteurs

Jean-Marc Deumier<sup>(1)</sup>, Claude Jacquin<sup>(1)</sup>, Marc Berrodier<sup>(1)</sup>, Bernard Lacroix<sup>(1)</sup>, Alain Bouthier<sup>(2)</sup>

<sup>(1)</sup> ARVALIS - Institut du végétal, 6 Chemin de la Côte Vieille, 31450 Baziège

<sup>(2)</sup> ARVALIS - Institut du végétal, Domaine Expérimental du Magneraud, 17700 Saint-Pierre d'Amilly

### Résumé

L'irrigation est une technique aux coûts fixes élevés et structurante pour les exploitations agricoles. Le chantier d'irrigation des grandes cultures présente une forte inertie. Aussi, les décisions stratégiques prises avant la campagne d'irrigation, choix d'assolement et plan prévisionnel d'irrigation, influent beaucoup sur les décisions tactiques prises pendant la période d'arrosage, en particulier le pilotage des irrigations. Les innovations, pour qu'elles puissent être acceptées, doivent prendre en compte ces contraintes. Les actions d'analyse des systèmes irrigués associant les irrigants, les organismes de développement et les organismes de recherche sont à développer afin d'enrichir les réflexions individuelles et collectives.

### Abstract

Irrigation is a technique with high fixed costs and structuring for farms. The crop irrigation site has a strong inertia. As a consequence, strategic decisions taken before the irrigation season, such as choice of cropping plan and irrigation forecasting programme, have a significant effect on the tactical decisions taken during the irrigation season, especially on irrigation scheduling. To be accepted, innovations must take into account these constraints. The shares of irrigation systems analysis involving farmers, farm advice agencies and research organizations should be developed to enrich the individual and collective thoughts.

## 1. Les spécificités de l'irrigation

Parmi les techniques culturales (semis, fertilisation, traitements phytosanitaires, ...), l'irrigation présente des caractéristiques particulières. Celles-ci sont bien perçues par les agriculteurs pour qui faire partie du groupe des « irrigants » ou des « non irrigants » a une certaine signification.

### 1.1. Une technique structurante avec des coûts fixes élevés

L'accès à la ressource en eau et sa distribution dans les parcelles représentent des coûts élevés. Une enquête récente réalisée en Midi-Pyrénées en 2005 montre que les coûts d'irrigation sont très variables d'une exploitation à l'autre (Figure 1). La moyenne des coûts des exploitations enquêtées est de 360 € par hectare irrigué avec 275 € pour les coûts fixes et 85 € pour les coûts variables (proportionnels au volume d'eau consommée) (Figure 2), soit au total un équivalent moyen de 20 à 25 q/ha de maïs. Ces coûts représentent environ 20 à 25 % des coûts totaux nécessaires pour cultiver du maïs.

L'irrigation est donc une technique chère avec des durées d'amortissement technique des installations qui varient de 9 à 21 ans selon le type de matériel ou d'installation.

Choisir d'irriguer engage donc l'avenir pour 15-20 ans pour une installation individuelle et évidemment plus pour une installation collective.

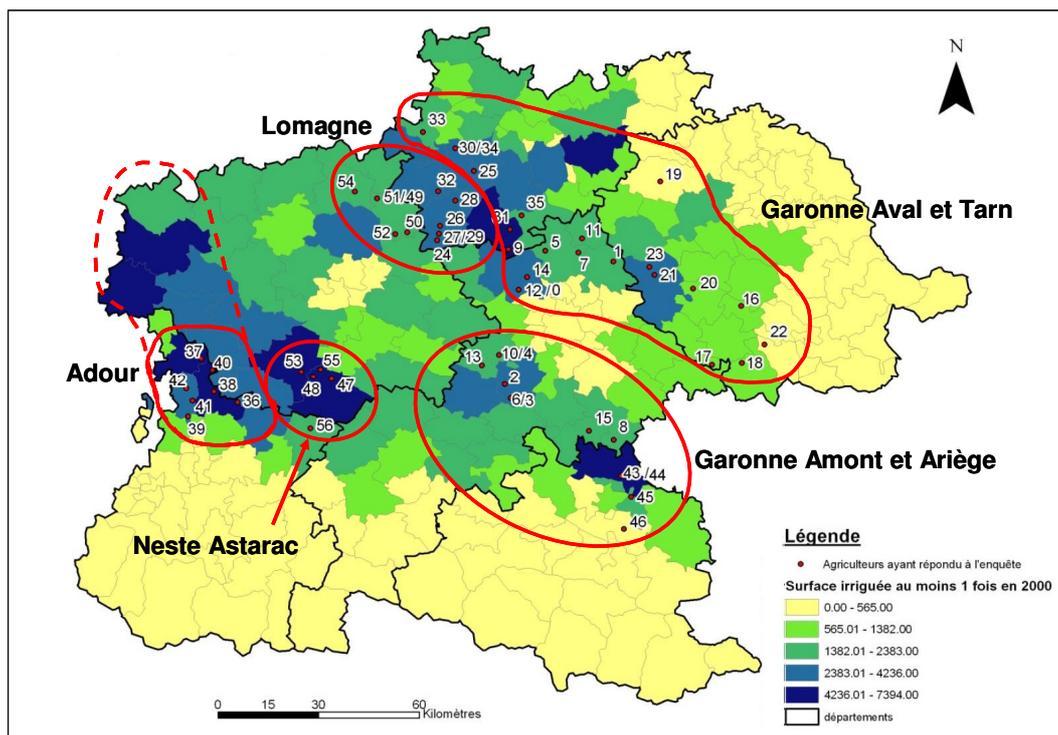
### 1.2. Un chantier avec une forte inertie

La durée du tour d'eau, temps nécessaire pour effectuer un apport d'eau sur toutes les parcelles, varie de 3 à 15 jours en aspersion avec le plus souvent une durée de 7 à 8 jours. Cette durée relativement longue du tour d'eau a pour conséquence pratique une anticipation fréquente des apports d'irrigation par rapport à la date prévue de début du stress hydrique.

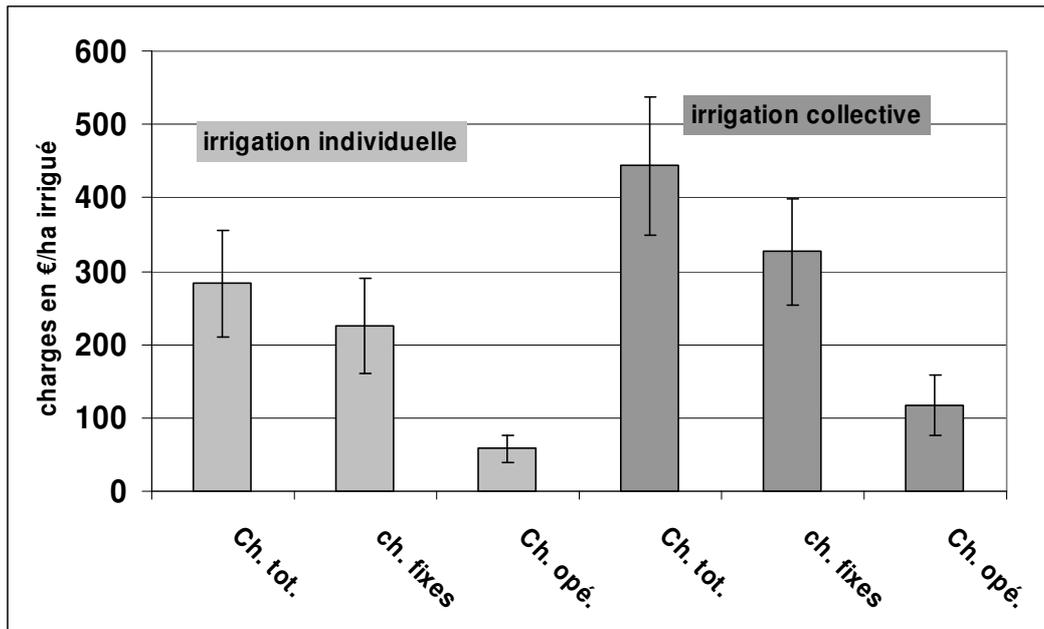
Par ailleurs, les installations d'irrigation sont souvent sous-dimensionnées par rapport aux besoins de pointe. La composante « débit » de la capacité d'irrigation (Deumier et al, 2005) est souvent plus faible que la demande climatique de pointe. Par exemple, en Midi-Pyrénées les installations d'irrigation sont calculées pour apporter 4,3 mm/jour en sol de boulbènes moyennes (30 mm tous les 7 jours par exemple), alors que les besoins de pointe moyens décennaires pour un maïs (kc ETP) se situent à 5,5 mm/jour en juillet au moment de la floraison, période de grande sensibilité au stress hydrique.

**Figure 1 :** Coûts de l'irrigation en Midi-Pyrénées

Etude réalisée auprès de 57 irrigants de Midi-Pyrénées (cf. localisation) par ARVALIS – Institut du végétal en collaboration avec les Chambres d'Agriculture de Midi-Pyrénées et le CETIOM.



Localisation des exploitations enquêtées



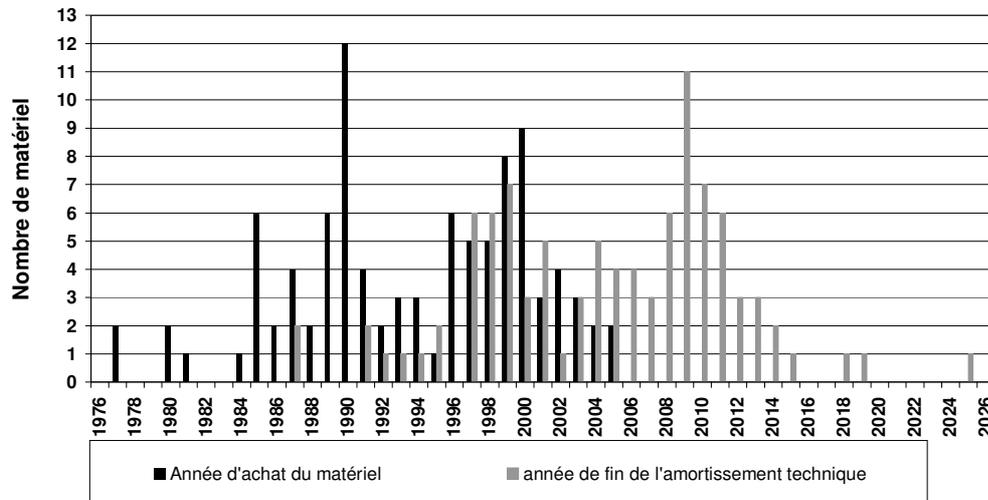
**Figure 2 :** Charges totales d'irrigation dont charges fixes et opérationnelles en irrigation individuelle et collective (enquête Midi-Pyrénées 2005). Les charges fixes comprennent les charges d'accès à la ressource en eau (ressource en eau, canalisation, pompes). Les charges opérationnelles comprennent le coût de la mise en pression de l'eau, souvent une partie du transport de l'eau pour les réseaux et la redevance perçue par l'Agence de l'Eau.

Aussi, les irrigants ont-ils tendance à maintenir élevé le rythme des apports durant la période avant la floraison du maïs de manière à éviter de se trouver en difficulté pendant la période à fort besoin en eau.

Cette pratique est aussi parfois liée aux déclenchements tardifs des arrosages consécutifs à des mises en place retardées des installations d'irrigation par le dernier apport d'azote sur maïs ou par des problèmes d'organisation. Ceci est particulièrement vrai pour la couverture intégrale de sprinklers.

### 1.3. Un matériel ancien qui attend d'être renouvelé

C'est probablement une caractéristique des équipements du Sud-Ouest plus que celle de régions où cette technique est plus récente. Le matériel d'irrigation des 57 exploitations de Midi-Pyrénées étudiées en 2005 était âgé en moyenne de 11 ans, cette moyenne cachant une très forte variabilité (Figure 3).



**Figure 3 :** Age du matériel d'irrigation: année d'achat et de fin d'amortissement technique (enquête Midi-Pyrénées 2005)

50 % de ce matériel avait atteint l'amortissement technique et seulement 8% des agriculteurs envisageaient un renouvellement dans les 5 ans à venir. Le taux de renouvellement était alors très faible de l'ordre de 2 % dans le département de la Haute-Garonne (Deumier et al, 2005).

#### 1.4. Une main d'œuvre qualifiée

L'irrigation nécessite une main d'œuvre qualifiée et responsable. C'est le chef d'exploitation qui le plus souvent met en place l'installation, déplace les enrouleurs et surveille le bon fonctionnement pendant la campagne. Quand on doit faire appel à la main d'œuvre salariée, les coûts sont élevés compte tenu de la qualification demandée.

Ceci est d'autant plus vrai que le travail reste pénible malgré les améliorations réelles apportées depuis 20 ans : surveillance jour-nuit indispensable, interventions en conditions humides et par fortes chaleurs.

C'est aussi un travail centré sur l'été alors que la grande majorité des actifs est en vacances !

## 2. Les décisions stratégiques sont dominantes par rapport aux décisions tactiques

La problématique de la maîtrise de l'irrigation dans les systèmes de grandes cultures est fortement déterminée par le coût élevé de l'irrigation relativement aux produits dégagés par ces cultures. Ce coût élevé induit une forte inertie de ces systèmes tant pour la gestion pluriannuelle que pour la gestion annuelle.

Dans ce contexte, les questions des irrigants de grandes cultures dépassent largement le thème souvent abordé et réducteur de la conduite des irrigations. Elles concernent la maîtrise globale de leurs systèmes irrigués par la recherche d'une utilisation optimale des moyens d'arrosage : ressource en eau, main d'oeuvre et matériel.

On ne reviendra pas ici sur les décisions hautement stratégiques de se lancer ou pas dans l'irrigation, moins d'actualité depuis quelques années. On s'intéressera aux décisions annuelles de gestion du système irrigué.

Le premier choix est celui de l'assolement de la sole irrigable.

Il est réalisé en tenant compte des contraintes de ressource en eau, de matériel et de main d'oeuvre, du contexte économique et réglementaire (prix des produits, montant des aides compensatoires et limites sur les surfaces aidées, coût des intrants et notamment de l'eau,...) : quelles cultures et parmi elles quelles cultures irriguer ? Pour chaque culture, quel objectif de production viser et quel objectif de marge espérer ?

En même temps, la ressource en eau (volume et débit) est répartie *a priori* afin d'atteindre les objectifs de production :

- par espèce en fonction des objectifs de rendement et des priorités entre espèces,
- dans le temps, en tenant compte de l'objectif de niveau d'alimentation hydrique et des contraintes d'organisation du chantier d'irrigation, éventuellement du rationnement des espèces.

Ce choix se fait en deux temps :

- à l'automne avant d'implanter les cultures d'hiver en tenant compte d'information sur la disponibilité de la ressource en eau encore très incertaine (excepté le cas des nappes à gestion pluriannuelle),
- au printemps où l'information sur la ressource en eau est plus nette, mais où la marge de manœuvre est déjà fortement réduite.

Cette répartition *a priori* de la ressource structure fortement la campagne d'irrigation.

Le plan prévisionnel d'irrigation et particulièrement le plan d'utilisation du matériel d'irrigation dépendent évidemment du choix d'assolement. Quand l'agriculteur décide son assolement, il connaît le plus souvent son organisation générale pour la campagne d'irrigation : plans des positions d'arrosage des matériels, enchaînement des positions d'arrosage du tour d'eau, priorité entre cultures....

Aussi, les décisions de conduite de l'irrigation se limitent généralement à l'adaptation d'un plan prévisionnel d'arrosage en tenant compte des événements climatiques et cultureux en cours de campagne.

### 3. Maîtrise des systèmes irrigués et accompagnement des irrigants : conseil de masse, de groupe, individuel et outils d'aide à la décision

L'accompagnement des irrigants se doit d'aborder plusieurs thématiques : accès à la ressource en eau (« petite » et « grande » hydraulique), aspects juridiques et réglementaires, installation et matériel d'irrigation, aspects économiques, agronomiques, socio-économiques...

Il prend la forme de conseils et d'outils d'aide à la décision (Tableau 1).

**Tableau 1 : Maîtrise des systèmes irrigués et accompagnement des irrigants**

CHOIX STRATEGIQUES					CHOIX TACTIQUES		
Pour plusieurs années	Décision annuelle : à chaque évolution du contexte économique, hydraulique, réglementaire				Chaque semaine		
					Adaptation des stratégies aux événements climatiques, « cultureux » et hydrauliques (ressource en eau)		
- Accès à la ressource - Aspect réglementaire et juridique - Dimension et choix des	Ajustement de l'assolement de la sole irrigable aux contraintes	Stratégie d'irrigation par espèce	Stratégie d'irrigation inter espèces	Plan d'utilisation du matériel d'irrigation - réglage <i>a priori</i>	Pilotage des irrigations en ressource en eau suffisante	Pilotage des irrigations en ressource en eau restrictive	Réglage du matériel d'irrigation en temps réel

équipements - Main d'œuvre - Assolement de la sole irrigable - Financement							
OUTILS, METHODES ET UTILISATEURS							
En veille depuis quelques années : probable regain d'activité à l'avenir	- études régionales lors d'évolution du contexte économique ou réglementaire : utilisation de LORA (INRA ARVALIS 1989) - assolement "collectif" : cas de gestion collective de ressource en eau déficiente - Chambres d'Agriculture	- IRMA (pluri- espèces - INRA ARVALIS 1992) MODERATO (maïs - INRA ARVALIS 2001) - Utilisés par ARVALIS et Cemagref dans des études régionales comme outil d'analyse ou pour bâti des interfaces "agriculteurs" - COGITO (Agro- Transfert Poitou Charentes, INRA) : utilisation pour évaluer les besoins en eau du maïs et sorgho (STICS)	Références expérimentales : peu ou pas de méthodes et d'outils	IRRIPARC Cemagref ARVALIS 1998 - Utilisé dans des études régionales pour bâtir des fiches régionales d'utilisation du matériel	<b>Conseil de masse</b> (très pratiqué) : avertissement irrigation à partir de parcelles de références - Chambres d'Agriculture <b>Conseil de groupe</b> : à partir de parcelles de références - Chambres d'Agriculture Organismes économiques NB : utilisation de COGITO temps réel pour améliorer l'expertise <b>Conseil individuel</b> : organismes économiques, chambres d'agriculture <b>Outils d'aide à la décision</b> : IRRINOV@ ARVALIS et partenaires Chambres d'Agriculture Organismes économiques, BHYP (CA31), GIRRIG (CA28), autres bilans hydriques..+ bilan hydrique sur internet IRRIBET (ITB), CA45,.....	<b>Conseil de groupe</b> : gestion des tours d'eau (cas de gestion collective d'une ressource déficiente) - Chambres d'Agriculture <b>Recommandations par espèces</b> : maïs, sorgho, pomme de terre cf. www.arvalinstitutduveg etal.fr rubrique irrigation	Diagnostic d'utilisation des matériels d'irrigation - Chambres d'Agriculture et Cemagref

#### 4. Discussion sur l'utilisation des modèles et outils d'aide à la décision

Tous les modèles construits pour aider aux choix stratégiques (assolement, stratégie d'irrigation par espèce, inter espèces, réglages *a priori* du matériel d'irrigation) ont été et sont utilisés par les instituts techniques et les organismes de recherche, peu ou pas par les organismes de conseil, très rarement par les agriculteurs.

##### 4.1. Décision d'assolement

Les assolements irrigués évoluent peu ou lentement. LORA que nous avons conçu à la fin des années 80 pour les conseillers et les agriculteurs a été et est utilisé par ses concepteurs lors des grandes évolutions de contexte économique et parfois réglementaire : PAC 1992, réflexions sur la gestion collective de la nappe de Beauce (Jacquin et al, 1995), études en Poitou-Charentes, Midi-Pyrénées et Aquitaine sur le devenir des systèmes irrigués avec la PAC 2006 (Moynier, 2006 ; Berrurier, 2007), simulations actuelles et prévues à l'occasion du « bilan à mi-parcours » PAC 2009 et de la PAC 2013. Le logiciel et les simulations sont utilisés pour structurer et alimenter la réflexion de groupes de travail réunissant des responsables professionnels agricoles, des techniciens de Chambres d'Agriculture et d'organismes économiques, des instituts techniques.

##### 4.2. Organisation de l'irrigation avant la campagne

IRMA, MODERATO, IRRIPARC sont aussi utilisés par les concepteurs pour alimenter des réflexions et construire des interfaces utilisateurs : outils d'aide à la décision pour piloter les irrigations, fiches de

réglages. Ces thématiques ont fait l'objet d'études en 2007 dans le cadre de mémoires « bac + 5 » : rapport d'Isabelle HALLOUIN sur les stratégies d'irrigation du maïs en volume limité dans la vallée de l'Arros (65), de Cédric JAFFRY sur les stratégies d'irrigation des pommes de terre en volume limité dans la région du Santerre (80 et 02) et d'Adeline SEGUIN sur les stratégies d'esquive en Poitou-Charentes.

#### 4.3. Pilotage de l'irrigation

IRRINOV® est une méthode de pilotage de l'irrigation à destination des agriculteurs proposé par plusieurs partenaires (ARVALIS, Chambres d'Agriculture organismes économiques). Elle permet de gérer l'irrigation d'un bloc d'irrigation et non d'une parcelle (Bouthier et al, 2003). Elle est paramétrée sur plusieurs espèces : maïs grain, maïs semence, blé dur, blé tendre, orge de printemps, pois protéagineux, pomme de terre et trèfle violet porte-graine.

Elle repose sur 4 grands principes :

- la détermination aux champs de stades repères de l'espèce concernée permettant de délimiter la période d'irrigation et d'appliquer les règles de conduites : pour le maïs stades « 10 feuilles visibles », « floraison femelle » et « humidité du grain 50 % »,
- la proposition d'un rythme « dose-fréquence » de base par milieu (sol, climat) qui permet de couvrir les besoins en eau 8 ans sur 10 ; exemple : 26 mm tous les 6 jours pour les sols de boulbènes dans le Nord de la Haute-Garonne ; la méthode propose de moduler ce rythme en fonction de la tension mesurée dans le sol qui est l'indicateur de la consommation des plantes et de la fourniture en eau du sol,
- la proposition de seuils tensiométriques pour décider le déclenchement des irrigations, pour moduler le rythme « dose fréquence » de base en cours de campagne et pour faciliter la décision de reprise après les pluies,
- un ensemble de règles précises pour utiliser la tensiométrie.

Le dernier bilan des ventes des guides régionaux de la méthode IRRINOV® (2004) avant le transfert sur [arvalisinstitutduvegetal.fr](http://arvalisinstitutduvegetal.fr) (2005 : accès quasi-gratuit) faisait état de 690 guides vendus et de 400 guides diffusés auprès des responsables professionnels et des institutionnels.

Depuis les guides sont consultés et téléchargés par les organismes de conseil et économiques à raison d'environ 150 à 200 consultations par an.

Un bilan global de la méthode IRRINOV® peut être dressé à ce jour : une méthode de pilotage élaborée en partenariat et qui fait référence, souvent utilisée par les organismes de conseil pour suivre les parcelles de références et utilisée par quelques agriculteurs.

L'apprentissage de la méthode par les agriculteurs serait à développer. Par exemple, la règle de décision de fin d'irrigation du maïs proposée par la méthode qui combine l'évaluation d'un stade de la culture, l'évaluation de l'état hydrique du sol et les prévisions météorologiques est plus ou moins bien mise en œuvre par les irrigants ; la mise en œuvre passe par une adhésion aux termes de la règle pour les différents contextes pédoclimatiques, ce qui n'est pas acquis entre autres par l'insuffisance de consensus (même entre techniciens) et le nombre limité de démonstrations chez les agriculteurs (dû en particulier à la lourdeur des essais irrigation). La mise en œuvre passe aussi par le repérage au champ du stade « humidité du grain 50% ». Les avertissements irrigation ont bien assimilé cette idée par une diffusion systématique des stades observés sur les parcelles de référence auxquelles les irrigants peuvent comparer leurs propres parcelles. La diffusion et la mise en œuvre de la méthode d'observation morphologique des grains par les irrigants pour déterminer ce stade sont probablement très insuffisantes. Voilà donc une innovation qui reste en partie dans les guides faute d'apprentissage.

D'autres outils, utilisant le bilan hydrique comme indicateur de l'état hydrique du sol, sont diffusés : BHYP (CA 31), GIRRIG (CA28),... Plus récemment certains outils sont utilisables via internet (IRRIBET (ITB), site CA 45,...).

Force est de constater que tous ces outils sont utilisés par les agriculteurs s'il existe un accompagnement technique rapproché par les techniciens : suivi en cours de campagne et bilan en fin de campagne. Ils sont d'autant plus utilisés qu'ils sont non seulement pertinents mais aussi simples d'utilisation.

Ne faut-il pas limiter leur objectif à renseigner l'agriculteur sur l'état calculé ou mesuré du sol (état hydrique) et de la plante (stade, état de croissance) et sur l'état probable les jours suivants en utilisant les prévisions météorologiques ou le climat historique ?

L'utilisation de ces outils par des groupes d'irrigants est aussi l'occasion pour les techniciens de connaître et d'analyser les pratiques. Nous écrivions en 2005 (Deumier et al, 2005) : «...les informations des suivis individuels BHYP et IRRINOV® sont synthétisées afin de réaliser des bilans de campagne et de les présenter aux irrigants.

On constate en 2000, année humide (tableau 2), que 70 % des îlots gérés avec un outil de pilotage individuel sont bien irrigués. Moins de 30 % des îlots reçoivent une irrigation excédentaire. En 2003, année très sèche, seulement 34 % des îlots sont bien arrosés. Dans 56 % des cas, la capacité d'irrigation des installations n'a pas été suffisante pour couvrir les besoins en eau du maïs.

Ces chiffres illustrent bien que la qualité des pratiques dépend beaucoup du climat de l'année. En année sèche, il y a peu de pratiques excédentaires. En année plus humide (qu'on ne peut qualifier d'humide qu'a posteriori !), il y a plus de pratiques excédentaires compte tenu de la nécessaire anticipation des irrigations par rapport aux besoins due à l'inertie des chantiers d'irrigation. Ainsi, les volumes apportés ne sont pas directement proportionnels aux déficits climatiques observés et c'est en année à déficit modéré (7 à 8 années sur 10) que les outils de pilotage peuvent être les plus efficaces.»

**Tableau 2** : Bilan des pratiques en 2000 et 2003 pour les îlots d'irrigation gérés avec un outil de pilotage individuel (Chambre d'Agriculture Départementale de la Haute-Garonne)

	2000	2003
déficit hydrique climatique	médian	très élevé
nombre total d'îlots irrigués analysés	81	172
% des îlots où la dose d'irrigation est inférieure à 90 % de la dose optimale	4	56
% des îlots où la dose d'irrigation est comprise entre 90 % et 110 % de la dose optimale	69	34
% des îlots où la dose d'irrigation est supérieure à 110 % de la dose optimale	27	10

Cette analyse montre les limites et le cadre d'utilisation des outils de pilotage.

Qu'en sera-t-il à l'avenir ? Le développement de nouveaux capteurs de mesure de l'état hydrique du sol et l'interrogation à distance des données permettront-ils un développement plus important de ces outils par les agriculteurs ? Attention toutefois aux dangers des utilisations « presse-bouton » avec pour conséquence immédiate des rejets brutaux et durables par les utilisateurs suite à des échecs inévitables avec ce type d'utilisation ! Ou plus probablement, ces capteurs et les nouvelles technologies de l'information ne vont-elles pas aider au développement du conseil individuel ou du conseil de groupe à partir de parcelles de références ?

#### 4.5. Connaissance des pratiques et analyse prospective avec les irrigants

Les pratiques d'irrigation sont assez mal connues et nos réflexions sur cette thématique sont à préciser. Par ailleurs, les irrigants ne comprennent pas toujours très bien les conclusions des analyses conduites sur l'irrigation. Elles leur paraissent en effet souvent décalées par rapport à leurs préoccupations. Aussi gagnerait-on probablement en efficacité en développant des travaux associant étroitement les irrigants.

A ce titre, le programme de l'UMT « Outils et méthodes pour la gestion quantitative de l'eau : du bloc d'irrigation au collectif d'irrigants » (ARVALIS, INRA, CETIOM) devrait y contribuer, en particulier le travail engagé avec trois collectifs d'irrigants de Midi-Pyrénées dans le cadre du projet CasDar « Connaissance, adaptation et amélioration de la gestion quantitative de l'eau avec des collectifs d'irrigants de Midi-Pyrénées par le développement et l'utilisation de méthodes et d'outils adaptés » (Chambre Régionale d'Agriculture de Midi-Pyrénées, Chambres Départementales d'Agriculture du Gers, de la Haute-Garonne et des Hautes-Pyrénées, Compagnie d'Aménagement des Coteaux de Gascogne, ARVALIS – Institut du végétal, CETIOM, INRA, Cemagref).

#### Références bibliographiques

Bergez J.E., Debaeke P., Deumier J.M., Lacroix B., Leenhardt D., Leroy P., Wallach D., 2001. MODERATO : an object-oriented decision tool for designing maize irrigation schedules. *Ecological Modelling* 137, 43-60.

Bergez J.E., Deumier J.M., Lacroix B., Leroy P., Wallach D., 2002. Improving irrigation schedules by using a biophysical and decisional model. *European Journal Agronomy* 16, 123-135.

Bergez J.E., Nollet S., 2003. Maize grain yield variability between irrigation stands: a theoretical study. *Agricultural Water Management* 60, 43-57.

Berrodier M., 2007. Evolution des systèmes de grandes cultures irriguées en Midi-Pyrénées. Rapport d'étude, 18p.

Bouthier A., Deumier J.M., Lacroix B., 2003. IRRINOV®, une méthode au service des producteurs pour piloter l'irrigation du maïs consommation, des céréales à pailles et du pois de printemps, ICID 54th meeting workshop « Technologies et méthodes modernes d'irrigation : recherche, développement et essais », 18-19 septembre 2003 – Montpellier

Deumier J.M., Boussaguet J., Mailheau M., 2005. Stratégie des agriculteurs, pilotage et ajustement des apports d'eau aux besoins en eau des cultures. Actes du colloque « Eau et agriculture durable » SIMA 1<sup>er</sup> mars 2005 - Cemagref

Deumier J.M., Jacquin C., Leroy P., 1995. Simulateur de conduite des irrigations. Rapport de l'étude réalisée avec le concours du Ministère de l'Agriculture et de la Pêche et de l'Alimentation. ITCF-INRA, Paris.

Deumier J.M., Leroy P., Jacquin C., Balas B., Bouthier A., Lacroix B., Bergez J.E., 2006. « Gestion de l'irrigation au niveau de l'exploitation agricole », dans *Traité de l'irrigation* 2<sup>ème</sup> édition, édition Lavoisier, p. 1120 - 1137.

Guiberteau M., 1999. Etat des lieux des actions de conseil et d'appui technique en irrigation, document de synthèse IRRI-MIEUX, 64 p.

Hallouin I., 2007. Caractéristiques d'un collectif d'irrigants de la vallée de l'Arros : élaboration de stratégies d'irrigation du maïs pour un cas de ressource en eau restrictive avec le modèle MODERATO. Mémoire de fin d'étude de Master professionnel, Université d'Avignon. 50 p.

Jacquin C., Bonnefoy M., 1995. Sensibilité de l'exploitation agricole à l'irrigation : exemple d'un secteur de Beauce. Rapport d'étude, 50 p.

Jaffry C., 2007. Elaboration de stratégies d'irrigation de la pomme de terre en volume limité à l'aide du modèle décisionnel IRMA et du modèle biophysique MAPP, Université d'Angers et Institut National d'Horticulture. 45p.

Lacroix B., Bergez J.E, Deumier J.M., Bouthier A., 2003. MODERATO : simulateur de stratégies de conduite d'irrigation du maïs, ICID 54th meeting workshop « Technologies et méthodes modernes d'irrigation : recherche, développement et essais », 18-19 septembre 2003 – Montpellier

Leroy P., Balas B., Deumier J.M., Jacquin C., 1996. Water management at farm level. Chapitre 4 du rapport de synthèse de contrat CEE. N°8001-CT91-0109 Gestion des ressources limitées en eau : conséquences agro-économiques, 60 p.

Leroy P., Deumier J.M., Jacquin C., 1996. Water management at farm level - Method and tool to support strategic decisions, Management of Limited Water Ressources, rapport final du contrat de l'Union Européenne, n°8001 – CT BALAS 91-0109

Leroy P., Jacquin C., 1994. Un logiciel pour le choix de l'assolement sur le périmètre irrigable d'une exploitation. 17<sup>ème</sup> conférence régionale européenne sur les irrigations et le drainage ICID/CIID. Varna, Bulgarie, 16-22 mai 1994. Vol 2 : 61-72.

Meillon D., 2001. Economies d'eau en irrigation : évaluation de l'impact du programme d'appui technique aux irrigants de la région Aquitaine, revue Agence de l'Eau Adour Garonne, p. 16 - 20.

Moynier J.L., 2006. Devenir des exploitations irriguées de Poitou-Charentes. Rapport d'étude, 27 p.

Seguin A., 2007. Maïs irrigué : évaluation de la stratégie d'esquive aux contextes du Poitou-Charentes. Mémoire de fin d'études, ESA d'Angers. 89 p.

Wallach D., Goffinet B., Bergez J.E., Debaeke P., Leenhardt D., Aubertot J.N., 2001. Parameter estimation for crop models: a new approach and application to a corn model. *Agronomy Journal* 93, 757-766.

## Vers une gestion durable des ressources en eau – Projet Cas-Dar

Nelly Le Corre-Gabens<sup>(1)</sup>, Carole Hernandez-Zakine<sup>(2)</sup>

(1) Ingénieur, Responsable du Service Agronomie-Environnement de l'APCA, APCA - 9 avenue George V - 75008 Paris

(2) Docteur en Droit, en charge du dossier Eau à l'APCA, APCA - 9 avenue George V - 75008 Paris

L'eau fait partie du patrimoine commun de la Nation. Le Code de l'Environnement précise que sa gestion équilibrée doit permettre en priorité de satisfaire les exigences de la santé, de la salubrité publique, de la sécurité civile et de l'alimentation en eau potable de la population. Elle doit également permettre de satisfaire ou concilier, lors des différents usages, l'activité ou travaux, les exigences de la vie biologique du milieu récepteur, de la protection contre les inondations et des activités économiques, dont l'agriculture.

Cette définition de la gestion équilibrée montre combien l'eau est au cœur de nombreux enjeux, touchant, au quotidien, à l'histoire des Hommes.

L'eau conditionne les productions alimentaires. L'excès d'eau comme le manque d'eau influence fortement les rendements, ce qui a conduit, de longue date, à la réalisation d'aménagements hydrauliques.

Aujourd'hui, trois enjeux majeurs sont à relever par l'ensemble de la société en lien avec la gestion durable des ressources en eau. D'une part, l'enjeu de la sécurité alimentaire, comme rappelé récemment par les émeutes dans les pays en développement. D'autre part, l'enjeu du changement climatique, avec la nécessaire réflexion sur l'adaptation de l'agriculture. Enfin, l'enjeu du développement durable, conciliant économie, emploi, territoire et environnement en appliquant le principe n°1 de la « Déclaration de Rio » sur l'environnement et le développement « *Les êtres humains sont au centre des préoccupations relatives au développement durable* ».

L'objet de cet article est de présenter la nouvelle donne socio-économique de la production agricole, d'insister sur les avancées en terme réglementaire pour développer la gestion durable des ressources en eau, puis de détailler comment les agriculteurs cherchent à concilier le développement de leur activité éco-nourricière avec le respect de la vie et le respect du droit à l'eau et à la santé. Enfin, seront précisés le projet CAS-Dar actuel sur « Expertises collectives et gestion durable des ressources en eau » et les premières questions pour allier productions agricoles et sécheresse.

### 1. Une nouvelle donne socio-économique

L'agriculture doit désormais mener de front performance économique, gestion des territoires et préservation des ressources naturelles.

#### a. Des attentes sociétales multiples

Selon les résultats d'un récent sondage conduit par l'Institut OpinionWay (baromètre AgriWay®, octobre 2007), l'attente prioritaire des français vis-à-vis de l'agriculture reste de « proposer des produits à des prix accessibles au plus grand nombre » (77 %). En quatrième priorité, nous trouvons « produire en quantité suffisante pour répondre aux besoins » (53 %) et en cinquième « préserver le tissu économique et social des campagnes » (31 %). La fonction économique et sociale de l'agriculture n'est

donc pas remise en cause par les français. Et les hausses récentes du coût des matières n'ont fait que conforter cette sensibilité des Français et très probablement l'accroître.

Parallèlement, la préservation de la santé et de l'environnement constitue deux autres enjeux majeurs auxquels l'agriculture doit contribuer. Ainsi, toujours selon ce sondage, la deuxième attente des français est d' « assurer la qualité des produits alimentaires sur les plans du goût et de la santé » (71 %) et la troisième de « produire avec respect de l'environnement » (55 %). « Assurer l'entretien des territoires et des paysages » (14 %) arrive juste derrière « apporter de nouvelles réponses aux besoins énergétiques » (21 %).

Mme Gramont de BVA, dans la revue « Chambres d'agriculture » de février 2008 soulignait que les thématiques environnement et cadre de vie sont apparues très clairement dans les enquêtes d'opinion à partir des années 1998 avec, pour déclencheur, la crise de l'ESB.

Le Grenelle de l'environnement, lancé en mai 2007, a été l'occasion de rappeler avec force ces enjeux.

### *b. Les 3 enjeux majeurs pour l'agriculture selon les Chambres d'agriculture (motion votée en juillet 2007)*

L'agriculture européenne est une entreprise qui fournit aujourd'hui plus de 9 millions d'emplois en Europe, dont 821 000 en France. Avec l'agroalimentaire, elle fait de l'Union européenne le deuxième exportateur du monde avec près de 62 milliards d'euros et le 3<sup>ème</sup> employeur européen (plus de 16 millions d'emplois). Mais, ce n'est pas une activité économique comme les autres dont les produits répondent aux seules lois du marché. Elle doit s'inscrire dans la logique de développement durable avec un double objectif de sécurité alimentaire et de préservation des équilibres écologiques de la planète.

Ainsi, pour les Chambres d'agriculture, réunies en Session en juillet 2007, l'avenir de l'agriculture, compte-tenu de la nature de son activité, est indissolublement lié à sa capacité à prendre en compte les enjeux auxquels devront répondre les sociétés des pays industrialisés et des pays en développement. Dans ce cadre, les Chambres d'agriculture ont identifié, pour l'agriculture européenne, les trois enjeux majeurs suivants (reprise de la motion votée lors de la Session de l'APCA de juillet 2007).

#### 1. L'enjeu de la sécurité alimentaire

La libéralisation totale des échanges préconisée par les instances internationales ne permettra pas de répondre aux besoins des 9 milliards d'habitants que comptera la planète en 2050, soit un tiers de plus qu'en 2000. Une telle croissance exigera un doublement de la production agricole avec une réorientation sur les produits carnés, compte-tenu des modifications des régimes alimentaires, augmentant ainsi la pression sur l'utilisation des terres.

Pour les Chambres d'agriculture, la production régulière de biens alimentaires est un enjeu stratégique pour assurer l'indépendance alimentaire de l'Europe et pour éviter une confiscation de l'arme alimentaire par quelques pays ou firmes. Elle repose sur la performance de l'agriculture, ce qui suppose d'agir sur les coûts de production.

Dans ces conditions, il est nécessaire :

- de créer les conditions de l'émergence d'une agriculture dans les pays les plus pauvres par le biais de politiques agricoles adaptées,
- de garantir aux consommateurs européens, de plus en plus préoccupés par les liens entre santé et alimentation, un approvisionnement accessible en quantité et prix, sûr, de qualité.

## 2. L'enjeu du développement durable

L'agriculture est un levier essentiel de la croissance et elle crée de l'emploi localisé. Elle constitue également un acteur majeur, avec la forêt, de la gestion des ressources naturelles. Dans le même temps, la poursuite des modèles de développement dans les pays industrialisés fondés sur l'utilisation des énergies fossiles conduit inéluctablement à une impasse avec une augmentation des gaz à effet de serre et un épuisement annoncé à terme des ressources. Par ailleurs, de nombreux territoires ruraux qui regroupent 60 % de la population de l'Union et produisent 45 % de la valeur ajoutée communautaire connaîtraient de très grandes difficultés économiques, sociales et environnementales sans la PAC.

Pour les Chambres d'agriculture :

- la production de biens agricoles non alimentaires par l'agriculture est un enjeu stratégique pour lutter contre le réchauffement climatique en participant à l'indépendance énergétique de l'Union Européenne. Les biocarburants sont actuellement la seule voie pour réduire les émissions de gaz à effet de serre dans les transports. Ils constituent une étape indispensable pour préparer le développement des carburants renouvelables de seconde génération et pour ouvrir le champ de la chimie verte ;
- la production de services écologiques agricoles revêt un caractère stratégique pour intégrer les enjeux du développement durable. Or, les perspectives sur les prix agricoles pour les prochaines années risquent d'orienter l'agriculture vers la réponse aux seuls signaux des marchés. Dans ce contexte, l'agriculture devra poursuivre dans la voie de l'amélioration de ses pratiques ;
- la production de cohésion territoriale devient un enjeu stratégique dans une société de plus en plus urbanisée. L'espace est en proie à des tensions d'usage et à un gaspillage de la ressource. Dans ce contexte, la gestion de l'espace devient essentielle. Elle repose sur une nouvelle gouvernance avec les collectivités territoriales permettant l'exercice d'une activité agricole durable et la prise en compte de l'évolution des modes de vie.

## 3. L'enjeu de l'efficacité des politiques publiques

Le coût de la PAC, même s'il ne représente plus que 33 % du budget européen doit être lisible et accepté par les citoyens européens. Pour les Chambres d'agriculture, le débat sur la pertinence et la viabilité de la PAC dans un contexte marqué par une situation difficile des finances publiques et par une volonté d'affecter les moyens sur les priorités des économies modernes, au rang desquelles l'agriculture n'apparaît pas spontanément, est inéluctable. Il renvoie inmanquablement à l'adéquation entre le niveau et l'utilisation du soutien à l'agriculture et les objectifs retenus, ainsi qu'à la viabilité économique des entreprises agricoles fortement dépendantes des aides.

## **2. Un cadre réglementaire en évolution pour une meilleure gestion quantitative des ressources en eau**

Le régime des eaux douces en France est caractérisé par les deux principes suivants :

- celui du droit de propriété privé qui trouve à s'appliquer aux eaux closes : mares, étangs, lacs,
- celui du droit à l'usage de l'eau pour les cours d'eau, canaux et eaux souterraines.

Sous l'influence du droit communautaire et des évolutions sociétales, la réglementation française restreint de plus en plus le droit de propriété en faveur du droit d'usage.

### a. Le cadre européen

L'Europe constitue le principal moteur des évolutions réglementaires, avec trois lignes de force :

- le décloisonnement de l'appréciation de l'impact environnemental par une démarche globalisante concernant les enjeux majeurs que sont notamment le changement climatique, l'eau, l'air, les sols, la biodiversité et la santé publique,
- la diversification des facteurs polluants pris en considération : nitrates, phosphore, phytosanitaires, gaz à effet de serre, prélèvements d'eau, métaux lourds,...
- une hiérarchisation des solutions à apporter : prévenir, réduire, recycler et, en dernier lieu, traiter.

En matière de gestion quantitative des ressources en eau, nous retiendrons quatre textes majeurs.

La Directive Cadre sur l'Eau de 2000 repose sur quatre principes : la gestion par bassin versant, la planification et la programmation des actions, la récupération des coûts et la participation du public. Son calendrier de mise en oeuvre, globalement respecté par la France pour l'instant, est le suivant :

- 2004 : réalisation de l'état des lieux des masses d'eau et identification des questions importantes,
- 2009 : élaboration du plan de gestion et du programme de mesures,
- 2010 : transparence sur la récupération des coûts par grands secteurs : domestique, industriel et agricole,
- 2015 : bons états des eaux respectés par masse d'eau, sauf reports et dérogations pour causes techniques, économiques ou naturelles.

La Communication sur la sécheresse et le changement climatique (juillet 2007) a pour objet de présenter des options stratégiques visant à développer une culture des économies d'eau et à faire de l'agriculture une activité utilisant l'eau de façon économe et durable.

La directive « Inondations » (directive 2007/60 du Parlement européen et du Conseil adoptée le 23 octobre 2007), publiée le 6 novembre 2007 au Journal Officiel des communautés européennes, a pour objet d'instaurer un cadre pour l'évaluation et la gestion des risques d'inondation. Cette directive s'explique par la nécessité pour l'Europe d'atténuer les effets du changement climatique et de compléter la directive cadre sur l'eau sur ce point. Ces deux textes sont cependant étroitement liés puisque la directive « Inondations » appelle à une coordination. Ainsi, le cadre géographique d'intervention de la directive « Inondations » correspond aux districts et bassins hydrographiques de la directive cadre sur l'eau et les plans de gestion des risques d'inondation et les plans de gestion de la directive cadre sur l'eau doivent être élaborés en synergie. Ces plans pourront traiter des modes durables d'occupation des sols, de l'amélioration de la rétention de l'eau ainsi que de l'inondation contrôlée de certaines zones en cas d'épisodes de crue. La volonté de l'Europe étant d'évaluer, puis de gérer les risques d'inondation afin de réduire les conséquences négatives pour la santé humaine, l'environnement, le patrimoine culturel et l'activité économique, cette directive exige :

- une évaluation préliminaire des risques d'inondation au plus tard le 22 décembre 2011 ;
- l'achèvement des cartes des zones inondables et des cartes des risques d'inondation pour le 22 décembre 2013 au plus tard ;
- une adoption et une publication de plans de gestion des risques d'inondation pour le 22 décembre 2015 au plus tard.

Le projet de règlement sur le bilan de santé de la PAC (mai 2008) introduit un nouveau considérant sur la protection et la gestion de l'eau. Il indique qu'il importe de renforcer la conditionnalité, sur le volet des bonnes conditions agronomiques et environnementales (BCAE). Et il introduit la gestion de l'eau dans les thématiques obligatoires des BCAE, avec deux mesures possibles :

- des zones tampons le long des cours d'eau,
- le respect des procédures d'autorisation pour les irrigants.

### *b. Rapide historique du cadre réglementaire français en matière d'appropriation et d'utilisation des ressources en eau*

Dès l'Antiquité, des textes régissent le domaine de l'eau. Les romains distinguent ainsi d'un côté l'eau courante, la mer et l'air classés parmi les *res communis* et de l'autre les fleuves rangés parmi les *res publica*. Sous le droit féodal, les rivières sont sous contrôle des comtes et des seigneurs : ils ont le pouvoir sur l'eau. Du XIII<sup>ème</sup> au XVI<sup>ème</sup> siècle, on repart dans la classification romaine. Pour lutter contre le seigneur et son pouvoir sur l'eau, des communautés d'habitants, des paysans ont obtenu certains droits : creuser des puits, avoir un moulin. On reprend l'idée romaine « des propriétaires », propriétaires des eaux stagnantes, des sources, des pluies. La législation royale retient toutefois les fleuves dans un même temps dans le domaine du roi.

Avec la révolution et le Code Civil, les rivières navigables relèvent à nouveau de la souveraineté nationale. En ce qui concerne les rivières non navigables, les juristes ne savaient plus et il existait de nombreux conflits devant les tribunaux. En revanche, les eaux pluviales appartenaient bien aux propriétaires.

La loi du 8 avril 1898 est le texte juridique de base du régime juridique de l'eau en France. Elle ne remet pas en cause la propriété de l'eau par le propriétaire du fonds en ce qui concerne les eaux stagnantes, les eaux de pluie et de sources. Parallèlement, elle prévoit, sur les rivières navigables et flottables, devenues depuis domaniales, que ne peuvent s'exercer que les usages soumis à autorisation. Pour les rivières non navigables, la loi de 1898 dissocie le lit des rivières de l'eau : le lit des rivières non navigables appartient au riverain comme prolongement de la propriété du sol tandis que l'eau n'appartient à personne. Peuvent alors s'appliquer des droits d'usage.

Au lendemain de la Seconde Guerre Mondiale, la législation n'est plus adaptée aux besoins de la population française : l'urbanisation galopante, l'industrialisation progressive, l'usage croissant de l'eau par l'agriculture. La loi du 16 décembre 1964 relative au régime et à la répartition des eaux et à la lutte contre la pollution cherche à organiser la lutte contre la pollution. Elle met en place les Comités et Agences de Bassin, toujours d'actualité aujourd'hui, et instaure une réglementation des rejets polluants. Elle permet également un encadrement plus strict des prélèvements d'eau souterraine et donne des possibilités d'intervention à l'Etat et aux collectivités pour gérer des situations de crise ou de pénuries.

Des compléments pour une meilleure protection des milieux aquatiques sont apportés par la loi de 1984 relative à la pêche en eau douce et à la gestion des ressources piscicoles, avec l'obligation de laisser dans le lit des cours d'eau un débit minimal garantissant la vie et la reproduction du poisson. Les résultats en ce qui concerne les situations de crise et de gestion par bassin n'étant pas atteints, une nouvelle loi sur l'eau est votée le 3 janvier 1992. Elle introduit, dans la législation française, trois nouveaux principes très importants. Ainsi, elle affirme l'unité de la ressource en eau, patrimoine commun de la nation. Elle déclare d'intérêt général la protection, la mise en valeur et le développement des milieux aquatiques d'intérêt général. Enfin, elle oblige à une gestion équilibrée entre les différents usages de l'eau.

Par conséquent, elle renforce la légitimité d'intervention de l'Etat dans l'intérêt général et unifie les régimes de la police de l'eau. Ainsi, est introduit un régime nouveau de déclaration ou d'autorisation préalable, applicable notamment aux prélèvements d'eau, la possibilité d'affecter des débits à différents usages et des dispositions pour régler des situations de crise et de pénurie.

Par ailleurs, elle instaure deux nouveaux outils : les Schémas Directeurs d'Aménagement et de Gestion des Eaux et les Schémas d'Aménagement et de Gestion des Eaux.

Ces différents dispositifs permettent des restrictions réglementaires de l'irrigation.

Cette loi est complétée par la loi sur les risques du 31 juillet 2003 qui concerne la prévention des inondations et des risques naturels et par la loi du 21 avril 2004 de transposition de la directive cadre sur l'eau de 2000.

*c. Les apports de la loi sur l'eau et les milieux aquatiques de décembre 2006 en matière de gestion quantitative des ressources en eau*

La loi sur l'eau et les milieux aquatiques, promulguée le 30 décembre dernier, a pour ambition première de permettre d'atteindre les objectifs de la directive cadre européenne sur l'eau d'octobre 2000, en particulier le bon état des eaux d'ici 2015. En deuxième lieu, elle veut améliorer les conditions d'accès à l'eau de tous et apporter plus de transparence au fonctionnement du service public de l'eau. Enfin, elle s'attache à rénover l'organisation institutionnelle de la gestion de l'eau en France et l'organisation de la pêche en eau douce.

Elle comporte de très nombreuses mesures relatives à l'agriculture. Toutes les activités sont concernées : l'irrigation, l'élevage et l'utilisation de produits phytosanitaires. En outre, la loi renforce fortement la possibilité d'imposer, au niveau local, des modifications des pratiques agricoles.

Sont détaillées ci-après les principales novations qui concernent la gestion quantitative des ressources en eau.

En matière de gestion globale des ressources en eau et d'irrigation, la loi sur l'eau et les milieux aquatiques de décembre 2006 introduit des évolutions majeures classées ici par ordre des articles de la loi :

- la modification des autorisations des installations hydrauliques au plus tard en 2014 si leur fonctionnement ne permet pas la préservation des poissons migrateurs. Dans le même délai, ces ouvrages doivent, sauf exception, respecter un débit réservé de 10 % du débit moyen (2,5 % aujourd'hui) (articles 4 et 6) ;
- la possibilité de réserver des tranches d'eau dans les ouvrages dédiés à d'autres usages, notamment hydroélectriques, pour le maintien des équilibres écologiques et la satisfaction des usages prioritaires (eau potable, etc.) (article 5) ;
- des obligations de respect de la continuité écologique pour les ouvrages sur certains cours d'eau pouvant aller jusqu'à l'interdiction d'implanter des ouvrages (article 6) ;
- la prise en compte de l'adaptation au changement climatique dans la gestion des ressources en eau (article 20) ;
- la mobilisation et la création de la ressource en eau comme moyen de parvenir à la gestion équilibrée (article 20) ;
- une priorité des usages de l'eau à la santé, à la salubrité publique, à la sécurité civile et à l'alimentation en eau potable de la population (article 20) ;
- la possibilité d'obliger à modifier certaines pratiques agricoles dans des zones de sauvegardes quantitatives, en amont des captages d'eau potable (article 21) ;
- la définition de la gestion collective en permettant aux préfets de délimiter des périmètres à l'intérieur desquels les autorisations de prélèvement d'eau pour l'irrigation sont délivrées à un organisme unique pour le compte de l'ensemble des préleveurs irrigants et en autorisant, en zone de répartition des eaux, la constitution d'office de cet organisme (article 21) (cf point e) ;
- la possibilité de créer des associations syndicales de propriétaires pour des actions d'intérêt commun, sans travaux et diverses modifications de l'ordonnance de 2004 relative aux associations syndicales de propriétaires (article 25) ;

- le recours systématique à un compteur d'eau lorsque le prélèvement est réalisé par pompage (article 30) ;
- l'obligation de faire une déclaration auprès du maire de la commune concernée pour tout prélèvement, puits ou forage réalisé à des fins d'usage domestique (article 54) ;
- dans le cadre des orientations pour les 9èmes programmes des agences de l'eau, la possibilité d'aider à la mobilisation de ressources nouvelles dans la mesure où l'impact global au regard des intérêts mentionnés à l'article L.211-1 du code de l'environnement est positif à l'échelle du bassin versant et rajout du stockage de l'eau, comme outil pour prévenir les crues (article 83) ;
- en matière de redevance pour prélèvement sur la ressource en eau :
  - une assiette assise sur le volume d'eau prélevé au cours de l'année,
  - des taux plafonds fixés à 2 cts €/m<sup>3</sup> hors zone de répartition des eaux et à 3 cts € en zone de répartition des eaux (respectivement 0,10 et 0,15 cts/m<sup>3</sup> pour l'irrigation gravitaire, avec une assiette forfaitaire de 10 000 m<sup>3</sup> d'eau par hectare irrigué),
  - pas de plancher pour la redevance (marge de manœuvre des bassins),
  - un plafond du seuil de perception à 10 000 m<sup>3</sup> hors zone de répartition des eaux et à 7 000 m<sup>3</sup> en zone de répartition,
  - une exonération pour les prélèvements liés à la lutte antigel pour les cultures pérennes,
  - l'application du taux plafonds « hors zone de répartition des eaux » aux prélèvements effectués dans des retenues collinaires ou lorsqu'ils sont effectués de manière collective en zone de répartition des eaux,
  - la fixation par l'agence, dans la limite des taux plafonds, de taux par unité géographique cohérente, tenant compte des objectifs des SDAGE et des SAGE et des conditions hydrologiques (article 84),
- deux autres types de redevance pouvant concerner l'irrigation : la redevance pour stockage en période d'étiage et la redevance pour obstacle sur les cours d'eau (article 84).

Concernant le Schéma d'Aménagement et de Gestion des Eaux, la loi de 2006 prévoit :

- l'élaboration d'un plan d'aménagement et de gestion durable de la ressource en eau et des milieux aquatiques, définissant les conditions de réalisation des objectifs,
- l'élaboration d'un règlement directement opposable aux tiers, également obligatoire sous 5 ans pour les SAGE déjà adoptés (article 77) (cf partie 2-d).

Elle modifie légèrement la composition de la Commission Locale de l'Eau. Désormais, les représentants de la catégorie « collectivités » doit détenir au moins la moitié du nombre total des sièges, et ceux de la catégorie des usagers au moins le quart.

Par ailleurs, la loi renouvelle l'organisation institutionnelle, notamment les agences de l'eau et le conseil supérieur de la pêche (article 73 et suivants). Au niveau national, elle étend les missions du Comité National de l'Eau à l'examen des projets de décret concernant les peuplements piscicoles (article 87). Elle crée un Office National de l'Eau et des Milieux Aquatiques, qui se substitue au Conseil Supérieur de la Pêche. Il a pour mission de mener et de soutenir des actions destinées à favoriser une gestion globale, durable et équilibrée de la ressource en eau, des écosystèmes aquatiques, de la pêche et du patrimoine piscicole. Il apportera un appui technique aux services centraux et déconcentrés de l'Etat ainsi qu'aux agences de l'eau et assurera en cas de besoin les solidarités inter-bassins, notamment l'Outre-Mer (article 88).

La loi donne au Parlement le pouvoir de définir les orientations prioritaires des programmes pluri-annuels d'intervention des agences de l'eau et de fixer les règles concernant l'assiette, les taux plafonds, les modalités de recouvrement, ainsi que les critères de modulation des redevances (articles 82 à 84).

Au niveau des bassins, la loi conforte et légitime les comités de bassin qui seront désormais chargés d'approuver les programmes d'intervention des agences et les taux de redevance. Elle maintient l'équilibre dans leur composition : 40 % de représentants de collectivité, 40 % de représentants des usagers et 20 % de représentants de l'Etat. Elle précise les missions des Agences de l'eau (article 82).

Point essentiel de la rénovation de l'organisation institutionnelle, la loi réforme les redevances des agences de l'eau, dans le sens d'une mise en conformité avec la Constitution, d'une déconcentration encadrée par le Parlement et d'une simplification (article 84).

Enfin, concernant les milieux aquatiques, la loi modifie les obligations d'entretien régulier des cours d'eau, en systématisant le recours aux techniques douces et en permettant aux collectivités de se substituer aux propriétaires par le biais d'opération groupée par tronçons de cours d'eau (article 8). Elle qualifie la destruction de frayères ou des zones de croissance ou d'alimentation de la faune sauvage de délit sauf si elle résulte d'une autorisation ou d'une déclaration dont les prescriptions ont été respectées. Et elle prévoit de préciser par décret les critères de définition des frayères, les modalités de leur identification et de leur actualisation (articles 13 et 14).

#### *d. Les SDAGE et les SAGE*

Instruments de transposition de la DCE, les SDAGE ont été approuvés une première fois en 1996 et doivent être mis à jour au plus tard le 22 décembre 2009. Ce sont des documents de planification de la politique de l'eau dans chaque bassin. Ils détermineront les objectifs de qualité et de quantité des eaux ainsi que les aménagements et dispositions nécessaires pour obtenir le bon état des eaux.

Les SAGE, instaurés sur des unités hydrographiques cohérentes correspondant à un sous bassin ou un groupement de sous bassins, fixent des objectifs généraux et des dispositions permettant de satisfaire aux principes énoncés au titre de la protection de la ressource en eau et des milieux aquatiques et au titre de la protection du patrimoine piscicole. Les SAGE s'inscrivent dans la démarche des Schémas Directeur d'Aménagement et de Gestion des Eaux puisqu'ils doivent être compatibles ou rendus compatibles avec ces derniers. Ils sont élaborés par les Commissions Locales de l'Eau. Deux éléments les composent : un plan d'aménagement et de gestion durable de la ressource en eau et des milieux aquatiques et un règlement. Par le règlement, il est notamment possible :

- de définir les priorités d'usage de la ressource en eau ainsi que la répartition de volumes globaux de prélèvement par usage,
- d'édicter des règles particulières d'utilisation de la ressource en eau applicable aux opérations entraînant des impacts cumulés significatifs en termes de prélèvements et de rejets dans le sous bassin ou groupement de sous bassin concerné.

Lorsque le schéma a été approuvé et publié, les décisions applicables dans le périmètre défini par le schéma prises dans le domaine de l'eau par les autorités administratives doivent être compatibles ou rendues compatibles avec le plan d'aménagement et de gestion durable de la ressource dans les conditions et les délais qu'il précise. En outre, le règlement et ses documents cartographiques sont opposables à toute personne publique ou privée pour l'exécution de toute installation, ouvrage, travaux ou activité mentionnés à l'article L. 214-2 du code de l'environnement.

#### *e. L'organisme unique*

Suite à la loi sur l'eau et les milieux, l'organisation de la gestion collective de l'eau va être profondément modifiée, notamment en zones de répartition des eaux. Le décret relatif à l'organisme unique, chargé de la gestion collective des prélèvements d'eau par l'irrigation, paru le 26 septembre 2007 au Journal Officiel, autorise en effet l'Etat à instaurer des périmètres à l'intérieur desquels une autorisation unique

et pluriannuelle de prélèvement pour l'irrigation à des fins agricoles sera délivrée à un organisme unique pour le compte de ses adhérents. Dans ces périmètres, les irrigants ne seront plus habilités à demander et à obtenir des autorisations individuelles de prélèvement. Ils garderont en revanche la charge d'obtenir les autorisations d'ouvrages et donc de leur entretien.

L'organisme unique, dans le périmètre dans lequel il est désigné, est chargé au minimum de :

- déposer la demande d'autorisation unique pluriannuelle des prélèvements pour l'irrigation,
- arrêter chaque année un plan de répartition entre les irrigants du volume d'eau autorisé,
- arrêter les règles pour adapter la répartition en cas de limitation ou de suspension provisoire des usages de l'eau,
- donner un avis au préfet sur tout ou projet de création d'un ouvrage de prélèvement dans le périmètre,
- faire un rapport annuel en deux exemplaires et le transmettre au préfet avant le 31 janvier comprenant :
  - les délibérations de l'organisme unique de l'année écoulée,
  - le règlement intérieur ou ses modifications,
  - un comparatif pour chaque irrigant entre les besoins de prélèvement exprimés, le volume alloué et le volume prélevé à chaque point de prélèvement,
  - les contestations contre les décisions de l'organisme unique,
  - les incidents ayant pu porter atteinte à la ressource en eau et les mesures mises en œuvre pour y remédier.

L'organisme a en outre la possibilité, pour le compte des irrigants de son périmètre, de souscrire la déclaration relative à la redevance, de collecter cette redevance et de reverser les produits à l'agence de l'eau.

Avant même d'accorder à l'organisme unique l'autorisation unique pluriannuelle de prélèvement d'eau pour l'irrigation agricole (autorisation d'une durée maximale de 15 ans), l'administration se doit de connaître le volume général prélevable afin de valider les éléments contenus dans le document d'incidences présenté par l'organisme unique. La réglementation spécifique à l'organisme unique ne prévoit pas de dispositions particulières pour cette phase de diagnostic. Un travail avec tous les acteurs de l'eau est envisagé, avec l'appui des agences de l'eau. Quand le SAGE existe, il lui reviendra de définir les priorités d'usage de la ressource en eau ainsi que les modalités de répartition des volumes globaux de prélèvement par usage.

Pour la répartition annuelle d'eau entre les irrigants, ces derniers devront faire connaître tous les ans leurs besoins auprès de leur organisme unique afin de permettre à celui-ci d'arrêter un plan de répartition, en respectant ses règles internes de fonctionnement et l'état de la ressource en eau. Le plan est ensuite soumis au préfet qui le transmet pour avis au CODERST. Le préfet a trois mois pour l'homologuer.

#### *f. Les probables conséquences du Grenelle de l'environnement en matière de gestion quantitative des ressources en eau*

Lors de l'élaboration des propositions du Grenelle de l'environnement, en 2007, aucun groupe spécifique à l'eau n'a été mis en place : nous sortions de près de 10 ans de travaux sur l'eau et la loi sur l'eau et les milieux aquatiques venait d'être votée. Toutefois, des propositions majeures ont été formulées dans ce domaine.

Tout d'abord, est affichée la volonté de l'Etat français d'atteindre le bon état ou le bon potentiel des masses d'eau pour au moins les deux tiers d'entre elles en 2015. Cet objectif est très ambitieux quand on sait que les travaux des Comités de bassin, actuellement soumis à la consultation du public, avait

conduit à viser autour de 50 % en bon état ou bon potentiel en 2015 pour les masses d'eau et qu'actuellement, seules 30 % d'entre elles seraient en bon état ou en bon potentiel.

Il a également été retenu de rechercher une adaptation des prélèvements aux ressources, en respectant l'écologie des hydrosystèmes et les priorités d'usage soit en diminuant les prélèvements pendant les périodes de faibles eaux (gestion collective de quotas) soit en construisant des stockages.

Pour la mise en œuvre de ces orientations, un Comité Opérationnel Eau (COMOP Eau), piloté par le Député André Flajolet, a été mis en place. Il a retenu différentes propositions, pas toujours avec l'aval de la profession agricole. Pour faciliter la mise en place des organismes uniques, le Comité a proposé que les agences de l'eau engagent sur les 2 à 3 années à venir la définition des volumes disponibles en zones de répartition des eaux, en donnant la priorité à l'étude des masses d'eau souterraines. Il a identifié des compléments législatifs pour faciliter le fonctionnement des associations syndicales autorisées constituées en organisme unique gérant l'ensemble des prélèvements. En l'absence de cette gestion locale, les Chambres d'agriculture pourraient alors intervenir. Par ailleurs, il a préconisé que l'organisme unique doit également être constitué en cas de construction de stockages, les projets devant s'inscrire dans une gestion globale du bassin versant, à l'issue d'une étude des impacts de la dérivation des eaux sur l'alimentation de la nappe, sur le cours d'eau en aval et les milieux naturels, y compris s'il y a lieu sur la zone estuarienne, s'appuyant sur l'examen des productions et des itinéraires agronomiques et des alternatives possibles. Il a proposé que des opérations pilotes alliant la maîtrise des consommations, le renforcement de la ressource par stockage et les bonnes pratiques soient initiées pour diffuser les méthodes et le savoir faire.

Enfin, le Comité a souligné la nécessité de définir des priorités géographiques pour les actions de promotion de la récupération des eaux pluviales sur la base de la disponibilité de la ressource utilisée par les services de distribution d'eau afin que ces récupérations puissent effectivement contribuer à limiter des travaux lourds de renforcement des ressources en eau et, par là même, à la maîtrise de l'évolution du prix de l'eau. Dans ces secteurs prioritaires, les agences de l'eau pourraient mettre en œuvre des partenariats avec les collectivités locales et les distributeurs de matériels de récupération des eaux pluviales pour les usages extérieurs au logement.

### **3. Un engagement déjà ancien de la profession agricole en faveur de la gestion concertée des ressources en eau**

#### *a. Différentes actions déjà mises en œuvre par les agriculteurs*

L'aménagement des ressources en eau pour permettre une sécurisation de la production n'est pas nouveau. Ainsi, l'Administration des Wateringues, dans le Nord-Pas-de-Calais, date de 1169 et les communautés d'arrosants du Roussillon remontent à la législation des Wisigoths. Les associations syndicales, groupements de propriétaires qui entreprennent des actions d'intérêt collectif, ont été créées par une loi de 1865. Elles ont permis la réalisation de nombreux travaux, notamment dans le domaine de l'hydraulique agricole : curage et nettoyage de cours d'eau, assèchement de marais, assainissement de terres, irrigation. Autres exemples anciens d'organisation de la gestion des ressources en eau : la loi de 1907 sur la réglementation des eaux de la Durance et la création des Sociétés d'Aménagement Régional au début des années 60.

Aujourd'hui, les irrigants, conscients de leur rôle dans la préservation des ressources naturelles, ont adoptées différentes mesures afin de répondre aux attentes sociétales.

#### La transparence

Les taux d'équipement en compteurs d'eau sont de plus de 98 % chez les agriculteurs irrigants.

### La connaissance de la ressource

Les agriculteurs contribuent aux études hydrogéographiques par bassin réalisées sur les rivières et les nappes.

### La gestion concertée

Les irrigants, avec l'appui des Chambres d'agriculture, en liaison avec les collectivités territoriales, les Administration et les agences de l'eau ont mis en œuvre, là où c'était nécessaire, des tours d'eau ou le partage concertée des volumes.

### Recherche et développement

Les agriculteurs ont souhaité que des travaux soient conduits pour :

- rechercher des variétés résistant mieux à la sécheresse,
- améliorer les matériels d'aspersion,
- améliorer le pilotage de l'irrigation,
- définir les conditions de gestion durable des ressources en eau.

### Financement

Les irrigants versent une contribution annuelle de l'ordre de 10 à 12 millions d'euros aux agences de l'eau. Par ailleurs, le poste irrigation représente plus de 10 000 € en moyenne par an par agriculteur (mobilisation de la ressource, équipement en matériel, énergie, redevance pour prélèvement...).

Plus précisément, les travaux conduits par l'Institut d'étude OpinionWay montre que les agriculteurs entendent les nouvelles attentes de la société et reconnaissent qu'ils doivent adapter leurs pratiques culturales en conséquence. Ils revendiquent d'ailleurs s'être déjà engagés de façon concrète. Ainsi, 47 % affirment avoir réduit leur consommation d'eau et 24 % envisagent de le faire (Revue Chambre d'agriculture de février 2008).

#### *b. Un accompagnement professionnel déjà ancien*

Prenant la suite des « Secteurs de références d'irrigation », l'opération Irri-Mieux a été l'occasion, dans la fin des années 90, de faire un état des connaissances sur les différentes actions conduites en faveur de la gestion quantitative des ressources en eau.

La synthèse sur les actions de conseil et d'appui technique en irrigation (janvier 1999) concluait sur l'existence d'actions de conseil en nombre et variées, qui concernaient déjà toutes les régions où l'irrigation était développée. Trois thèmes étaient alors abordés en priorité :

- la mobilisation de la ressource en eau,
- l'acquisition et l'utilisation de l'équipement et du matériel d'irrigation,
- le pilotage de l'irrigation.

Les conseils apportés étaient soit de masse, de groupe ou individuel. Ils étaient portés essentiellement par les Chambres d'agriculture et parfois, selon les secteurs, par les Compagnies d'aménagement et les organismes économiques.

Cette synthèse sur les actions de conseil et d'appui techniques a été complétée par une analyse des prestations de conseils économiques aux agriculteurs irrigants en janvier 2000.

En outre, deux autres études ont été conduites dans le cadre d'Irri-Mieux pour favoriser la gestion durable des ressources en eau :

- une analyse sur les conditions dans laquelle une gestion collective de la ressource en eau peut être mise en œuvre, intitulée « Gestion collective d'une ressource commune, des droits à l'eau à la gestion collective de l'eau » (mai 1999), s'appuyant sur une étude de 12 cas,
- une synthèse de repères et d'outils méthodologiques favorisant la construction et la mise en œuvre de démarches partenariales dans le cadre de projets de gestion de l'eau : « Le partenariat, guide pour un projet local » (septembre 2001).

Il en est ressorti les propositions concrètes suivantes, qui restent d'actualité :

- choisir un périmètre de travail reflétant à la fois une unité physique et une volonté d'actions collectives,
- engager l'action dès que possible,
- mettre en place une concertation locale, en veillant à la représentation de tous les intérêts et à une réelle participation de tous,
- mobiliser les connaissances et les savoirs,
- bâtir un programme d'actions sur la concertation, le mettre en œuvre et l'évaluer,
- instaurer une gestion prévisionnelle et contrôlée de la ressource en eau,
- veiller à ce qu'une fonction d'information et d'animation soit assurée.

Le projet complémentaire Cas-Dar «Expertises collectives et gestion durable des ressources en eau » permettra d'actualiser l'état des lieux des actions conduites par les Chambres d'agriculture et les Instituts techniques et d'analyser l'appropriation ou non des propositions issues de l'opération Irri-Mieux en vue de la gestion durable des ressources en eau (cf. partie 3).

### *c. Des résultats tangibles*

Sur les 170 milliards de m<sup>3</sup> de pluie efficace sur la France, l'agriculture prélève autour de 4,7 milliards de m<sup>3</sup>, soit un peu moins de 3 %. Ce chiffre semble se stabiliser actuellement. Selon le rapport de l'IFEN («L'environnement en France », édition 2006), « la conduite de l'irrigation s'affine » en France.

Les 100 000 irrigants cultivent 1,9 million d'hectares irrigués sur un total de 28 millions d'hectares cultivés, ce qui représente 6,9 % de la SAU. Ce chiffre serait également stable, et ce depuis 1992 (Source Agreste Enquête Structure 2003).

L'exemple de l'Isère est illustratif des progrès accomplis. Dans ce département, l'irrigation est une réalité importante avec plus de 1 600 points de prélèvements, 730 préleveurs individuels et 54 réseaux collectifs. En 2007, 20 770 000 m<sup>3</sup> ont été consommés sur environ 25 000 ha (10 % de SAU).

Depuis maintenant une dizaine d'années, une procédure mandataire a été engagée entre la DDAF, la Chambre d'Agriculture, le Conseil Général et l'Agence de l'eau. Cette démarche globale de gestion quantitative concertée de la ressource en eau sur le département visait à réduire l'impact des prélèvements sur le milieu afin de préserver la ressource et garantir une irrigation de qualité. Elle s'est appuyée sur un recensement des prélèvements agricoles et non-agricoles, des études d'incidence des prélèvements sur la ressource, avec identification des bassins versants sensibles et une généralisation des dispositifs de comptage de l'eau.

Chaque année est réalisée une collecte de toutes les demandes des irrigants par la Chambre départementale d'agriculture, une actualisation des études d'impact par bassin versant ou entités hydrogéologiques cohérentes, une mise en évidence des secteurs en déséquilibre, des propositions de gestion sur certains secteurs et une préparation des restrictions d'eau par bassin versant.

Sur les sites sensibles sont mises en œuvre des solutions de « court terme » (révision des assolements, calendrier de pompage, alternance de remplissage de réserves, pilotage de l'irrigation,

avertissements agricoles) et des solutions de « moyen terme » (substitution des prélèvements impactant sur le milieu et souvent soumis à restriction, par le choix d'autres ressources plus abondantes et la création de ressources, le tout en privilégiant l'organisation collective).

La procédure mandataire a ainsi permis en Isère, depuis 2000, de pouvoir apprécier les impacts du cumul des prélèvements par bassin versant, de gérer les prélèvements selon la disponibilité de la ressource, d'anticiper les mesures de restriction estivale (QMNA5) et de prévenir les conflits.

*d. Des propositions pour amplifier l'engagement pour une gestion durable des ressources en eau*

Pour une gestion durable des ressources en eau, les agriculteurs sont favorables à un renforcement de la concertation sur les territoires avec les différents acteurs : Etat, Collectivités locales, Agences de l'eau, ensemble des usagers, pour déterminer les volumes prélevables ainsi que les volumes attribués à chaque usage dans le cadre du développement durable.

Ils proposent également une forte implication des structures agricoles dans la gestion du volume alloué à l'agriculture, en intensifiant le conseil aux économies d'eau et en appuyant le développement de filières adaptées aux territoires.

Ils demandent par ailleurs un programme stratégique et un volontarisme de stockage de la ressource hivernale et de développement de ressources non conventionnelles, inscrit dans la durée. Et ce, d'autant plus que les études sur le changement climatique montrent que les sécheresses estivales seront demain plus fréquentes.

Cette création de ressources nouvelles doit chercher à limiter l'impact sur le milieu naturel afin d'être écologiquement acceptable et, parallèlement, être économiquement viable. Le développement de retenues multi-usages peut également être privilégié : eau potable, activité économique (industrielle, agricole, pêche, tourisme), soutien d'étiage.

Enfin, les agriculteurs souhaitent, à côté de la participation des agriculteurs, un accompagnement financier des pouvoirs publics tant pour les économies d'eau, le développement de nouvelles filières et la création de ressources.

#### **4. Le projet Cas-Dar : pour une gestion durable des ressources en eau**

Le projet complémentaire Cas-Dar intitulé « Expertises collectives et gestion durable des ressources en eau » vise une mise en réseau et une adaptation des démarches de gestion qualitative et quantitative des ressources en eau portées par les organismes de développement, en confrontant les expertises collectives pesticides et sécheresse de l'INRA et du Cemagref avec les opérations territoriales menées par le groupe Chambres d'agriculture et des résultats des travaux des Instituts techniques.

Plus largement, ce projet a pour objectif de contribuer à l'adaptation de l'agriculture aux objectifs imposés par les différentes directives européennes concernant la préservation des ressources en eau et l'utilisation durable des phytosanitaires en conciliant les enjeux économiques, environnementaux, territoriaux et sociétaux. Son caractère innovant est constitué par le croisement d'approches qualitatives et quantitatives de la gestion de l'eau afin d'aboutir à des actions transversales sur cette problématique.

En effet, sur le terrain, de nombreuses Chambres d'agriculture animent des opérations bassins versants sur des enjeux qualitatifs et quantitatifs qui font apparaître une interaction entre la gestion quantitative de l'eau, l'utilisation des produits phytosanitaires et la fertilisation. Par ailleurs, les Instituts techniques proposent des innovations concernant la gestion de l'eau dans les différentes filières de production.

L'approche croisée se situe dans la lignée de la Directive Cadre sur l'Eau. Elle permettra également, en les confrontant, de valoriser des outils de gestion de la ressource en eau qui sont habituellement utilisés soit dans le cadre de la gestion qualitative, soit de la gestion quantitative.

L'objectif de cette approche transversale étant à terme de disposer de conseils et d'outils reconnus pour accompagner les agriculteurs dans leurs efforts en faveur de la préservation de la ressource en eau, dans un contexte marqué par le changement climatique.

Les principaux travaux, qui viennent d'être lancés en mars dernier, conduiront à :

- analyser les propositions issues des expertises scientifiques collectives pesticides et sécheresse et de leurs suites en les confrontant aux projets portés par les Chambres et les Instituts ;
- identifier les outils techniques, les actions et projets territoriaux menés, les méthodes d'animation de démarche de bassin disponibles et les compétences mobilisées, ainsi que les manques de références et d'outils ;
- identifier des leviers liés aux références, outils, et méthodes d'animation et compétences pour aider au changement des pratiques des agriculteurs ;
- organiser la diffusion des références, des outils et des méthodes d'animation repérés avec leur évaluation ;
- recenser des questions à la recherche, aux Instituts techniques et aux organismes de développement ;
- faire des recommandations sur les démarches de développement adaptées et les indicateurs à utiliser.

L'orientation du projet est assurée par un comité de pilotage, présidé par le Co-Président de la Commission Environnement de l'APCA en charge du dossier Eau, M. Joseph Ménard. Il est composé de représentants de l'ACTA, du Ministère de l'Agriculture, du Ministère de l'Ecologie, des collectivités territoriales, de l'INRA, du CEMAGREF, des Agences de l'Eau, du CORPEN, de Coop de France et de France Nature Environnement.

Un groupe d'experts, piloté par l'APCA et co-animé par l'ACTA, est chargé de mener le projet. Il est composé d'une vingtaine de membres issus des Chambres d'agriculture, des Instituts techniques et de l'INRA.

Lors de ses premières réunions, le groupe d'experts a décidé de travailler à trois échelles -le territoire, l'exploitation avec ses différents ateliers et la parcelle- et de se focaliser sur les thématiques suivantes :

- les approches globales,
- la gestion quantitative sous deux angles : eau en quantité limitée (irrigation, lutte anti-gel ; élevage, bouillies...) et eau en excès (zones humides),
- la gestion qualitative, avec trois entrées : les produits phytosanitaires, les nitrates et le phosphore et enfin les autres problématiques (MO, MS, produits vétérinaires, bactéries, etc.).

Il a retenu d'interroger l'ensemble des Chambres Départementales d'Agriculture et des Instituts techniques afin :

- d'identifier les territoires à enjeux sur lesquels existent une animation visant soit une gestion quantitative des ressources en eau, soit une gestion qualitative, soit les deux,
- de préciser les différents outils utilisés comme outils de diagnostic, outils de communication / sensibilisation, outils d'aide à la décision, outils d'évaluation et outils de formations,
- de recenser les besoins complémentaires en références et en outils.

Le projet devrait s'achever fin 2009, début 2010 par une restitution des travaux lors d'un colloque.

## 5. De nombreuses questions ouvertes à la recherche pour allier productions et sécheresse

Le projet complémentaire Cas-Dar permettra d'affiner les questions à la recherche pour favoriser le développement d'une agriculture productive et durable, dans un contexte marqué par le changement climatique.

Mais d'ores et déjà, des questionnements sont posés.

En matière d'innovation agronomique, les attentes sont nombreuses. Il s'agit tout d'abord de mieux caractériser et de diffuser les caractéristiques écophysiologiques des principales variétés de plantes d'intérêt agronomiques utilisées actuellement, mais aussi des nouvelles espèces aujourd'hui promues en vue de la production de bioénergie ou de biomatériaux. Il s'agit ensuite de développer un matériel végétal adapté aux évolutions climatiques, préservant voire augmentant la production végétale actuelle et répondant à d'autres enjeux, comme la réduction de l'utilisation de produits phytosanitaires.

Les travaux sur les systèmes de culture adaptés, avec un développement des approches spatio-temporelles, au delà de la parcelle, sont également attendus. Ils devront être conduits sous l'angle de la durabilité, c'est à dire rechercher la pérennité économique des exploitations, une production suffisante pour sécuriser la production alimentaire, le maintien de l'emploi et de l'entretien des territoires et la préservation des ressources naturelles. Les recherches pluridisciplinaires seront à privilégier. Les réponses apportées pourront venir nourrir les démarches conduites au niveau de bassins versants ou de bassins de production. Ils impliqueront des tests en grandeur nature.

Un approfondissement doit être conduit sur les productions animales.

En terme de prévisions météorologiques, il est souhaité une amélioration des prévisions :

- sur le long terme afin d'optimiser annuellement la part respective des assolements en cultures d'hiver et d'été, ainsi que le choix des variétés,
- sur le moyen terme afin d'optimiser les apports d'eau et le partage de la ressource en eau disponible,
- sur la localisation des précipitations.

En ce qui concerne le développement d'analyses socio-économiques, les priorités des travaux à conduire pourraient être :

- une estimation des impacts économiques (revenus et rendements des productions végétales et animales) des sécheresses, en s'appuyant sur la veille agro-climatique animée par l'INRA,
- des analyses économiques comparées entre un dispositif assurantiel et un dispositif préventif fondé sur le stockage de l'eau,
- les apports de l'irrigation sur la réduction de la taille des exploitations, la création d'emplois et le développement des territoires,
- les conséquences de mise en œuvre de la directive cadre sur l'eau sur les prélèvements d'eau pour l'irrigation,
- les impacts du changement climatique sur les productions liées aux terroirs, comme les AOC, et les adaptations possibles,
- les freins et les leviers à l'adaptation des agriculteurs aux risques climatiques, économiques et sanitaires croissants.

Par ailleurs, en matière de gestion de la ressource en eau, des approfondissements sont nécessaires notamment sur :

- l'analyse des intérêts et limites tant économiques, qu'environnementaux et sociaux de la création de ressources nouvelles pour s'adapter au changement climatique, notamment aux étés plus secs, aux échelles filières et bassins versants,
- les modalités de définition des volumes prélevables et des niveaux et débits objectifs,
- les conditions optimales de recharge hivernale des nappes, cohérentes avec les autres enjeux environnementaux,
- les conditions de mobilisation de ressources en eau non conventionnelles.

Les acteurs du développement que sont les Chambres d'agriculture ont également besoin :

- de méthodes d'évaluation des actions de gestion durable des ressources en eau déjà conduites, de même que des conseils aux irrigants,
- de méthodes, de logiciels et d'outils techniques et d'animation pour le conseil permettant de croiser les approches exploitations et ressources en eau au niveau du bassin versant.

Enfin, la recherche sur le matériel agricole et les techniques d'arrosage doit être poursuivie pour favoriser une utilisation économe de l'eau, une réduction de la consommation énergétique et une limitation du temps de travail.

Pour les Chambres d'agriculture, les travaux doivent être conduits dans le cadre d'un partenariat renforcé entre la recherche, le développement et les agriculteurs pour contribuer à une adaptation rapide au regard du nouveau contexte socio-économique et environnemental.

## Sécheresse et production fourragère

Gilles Lemaire\*

UR P3F, INRA, 86600 Lusignan, France

### Introduction

La sécheresse de 1976 avait été vécue comme un évènement exceptionnel, par sa durée et son étendue géographique, ne devant intervenir qu'une ou deux fois par siècle. Depuis, d'autres sécheresses de même ampleur ont eu lieu à plusieurs reprises, s'établissant à des périodes différentes de l'année, printemps-été (1989-1990-2003), été (1995-1996) ou automne (1978, 2007), voire parfois en hiver (2005-2006), et affectant des zones géographiques différentes. Ainsi, d'évènements considérés comme exceptionnels en France en dehors des régions méditerranéennes, les sécheresses deviennent des contraintes relativement fréquentes affectant donc directement la production fourragère et les élevages. Dans certaines régions, l'irrigation qui permettait une régularisation de la production est elle-même restreinte du fait des tensions induites sur la ressource en eau. Aucune région française n'est épargnée, l'Europe du Nord étant elle-même soumise à des contraintes de manque d'eau parfois sévères. Les évolutions prévisibles du climat du fait du réchauffement de la planète semblent indiquer une légère tendance à l'augmentation de la pluviométrie hivernale, mais une diminution notable de la pluviométrie estivale et automnale se traduisant par une augmentation probable de la fréquence des sécheresses.

Il semble donc bien établi, que les sécheresses plus ou moins prononcées sont déjà et vont devenir de plus en plus des phénomènes climatiques récurrents auxquels la production fourragère et les systèmes d'élevage devront s'adapter. Il ne s'agira plus comme en 1976 de mettre en œuvre des mesures de sauvegarde exceptionnelle, mais bien de mettre en place une politique de gestion du risque en concevant des systèmes fourragers aptes à assurer une continuité de l'alimentation des troupeaux à partir d'une ressource fourragère soumise à l'aléa climatique. Nous analyserons dans un premier temps la réponse des espèces fourragères à la sécheresse. Nous verrons comment les systèmes d'élevage ont par le passé réagi aux deux sécheresses de 1976 et 2003 qui ont été les plus sévères. Enfin, nous essayerons de dégager quelques pistes permettant de concevoir des systèmes fourragers mieux adaptés à la sécheresse.

### Réponse des plantes fourragères à la sécheresse

Par rapport aux systèmes de culture annuelles pour lesquelles on peut considérer que les aléas d'années sèches défavorables peuvent être compensées par les bonnes années et pour qui la production « moyenne » peut avoir économiquement un sens, les systèmes d'élevage qui doivent assurer à tout moment de l'année une adéquation entre l'offre en fourrage et la demande alimentaire du troupeau doivent mettre en œuvre des stratégies d'adaptation beaucoup plus coûteuses pour faire face à ces mêmes aléas. Ceci n'est d'ailleurs pas propre à la sécheresse. La croissance de l'herbe est un phénomène saisonnier, très irrégulier entre années même en absence de forte sécheresse, ce qui implique la constitution de stocks fourragers et de reports intra-annuels. Les aléas de sécheresses, par nature imprévisibles, amplifie cette distorsion entre offre et demande instantanée de fourrages. Dans les cas les plus extrêmes, cela peut même nécessiter des reports de stocks de fourrages d'une année

---

\* correspondance : Gilles.Lemaire@lusignan.inra.fr

sur l'autre, très coûteux, voire des pénuries fourragères nécessitant l'importation de fourrages grossiers ou de paille.

Les systèmes fourragers sont en règle général composés de deux types de ressources fourragères associées en proportions variées dans les calendriers fourragers des troupeaux : (i) la production d'herbe des prairies permanentes ou temporaires qu'elle soit directement pâturée ou fauchée sous forme d'ensilage ou de foin, (ii) les cultures fourragères annuelles telles que le maïs ensilage, les céréales immatures ou certaines cultures dérobées. On trouve donc selon les régions des systèmes fourragers purement herbagers, des systèmes mixtes et des systèmes entièrement à base de maïs. Les différentes plantes n'ont pas exactement les mêmes capacités d'adaptation au manque d'eau, et il est important de rappeler ici quelques notions de base essentielles.

La consommation d'eau par un couvert végétal est le résultat de deux phénomènes conjoints : l'évaporation de l'eau directe du sol et la transpiration des plantes qui forment l'évapotranspiration. En réalité, il s'agit d'un seul et même phénomène physique, la transpiration des plantes n'étant en fait qu'une évaporation d'eau plus ou moins contrôlée par la plante à travers l'ouverture et la fermeture de ses stomates. Il s'agit donc d'une transformation de l'eau liquide en vapeur d'eau déterminée par l'apport d'énergie qui arrive au niveau des feuilles et du sol. Cette quantité d'eau qui peut ainsi s'évaporer à partir d'un couvert végétal bien développé et bien alimenté en eau est donc déterminée par le micro-climat local par les apports énergétiques nécessaires à cette évaporation. C'est ce qui est communément appelé Evapo-Transpiration Potentielle ou ETP. L'ETP est donc déterminée par les composantes du climat : rayonnement solaire, température, déficit de saturation de l'air et vitesse du vent.

La transpiration est le moyen par lequel la plante régule sa température et évite de voir ses tissus s'échauffer au-delà des limites compatibles avec la vie des cellules. Les pertes en eau d'une plante sont donc le prix à payer pour sa survie. En situation de bonne alimentation hydrique, les pertes d'eau par transpiration foliaire sont remplacées de manière quasiment continue par les prélèvements d'eau par les racines. Lorsque le sol se dessèche, les prélèvements d'eau par les racines diminuent et ne permettent plus de compenser les pertes par transpiration. Afin de maintenir la turgescence de ses tissus, la plante freine alors sa transpiration par une fermeture progressive de ses stomates. Or, cette fermeture des stomates a deux conséquences inévitables pour la plante : (i) une élévation de sa température, et (ii) une diminution de l'assimilation du CO<sub>2</sub>. En fait, la plante 'anticipe' cette régulation en commençant à diminuer sa croissance foliaire bien avant de diminuer sa transpiration afin de réduire ses pertes en eau par la réduction des surfaces transpirantes. Mais, là aussi, cette réduction de croissance foliaire se traduit par une diminution de la captation de lumière et donc de photosynthèse et donc de la capacité de croissance de la plante.

En résumé, la seule réaction possible des plantes au manque d'eau se traduit inévitablement par une diminution de leur croissance. Il existe donc un lien direct entre la restriction de l'alimentation hydrique des plantes et leur diminution de croissance. Ce phénomène est général pour toutes les plantes supérieures. Lorsque le manque d'eau s'accroît, les plantes mettent en jeu des stratégies de survie. Celles-ci consistent en la sénescence accélérée de leurs feuilles, réduisant ainsi les pertes en eau, et l'accélération de la mise en réserve dans des organes de survie : stolons, rhizomes et base des tiges pour les graminées pérennes, graines pour les espèces annuelles. Ces stratégies de survie des espèces sont plus ou moins efficaces, permettant une reprise de végétation plus ou moins complète et rapide au retour des pluies, mais elles se traduisent toutes par un fort ralentissement voire un arrêt total de la croissance. L'adaptation à la sécheresse des plantes est ainsi antinomique de leur capacité à maintenir leur croissance en situation de manque d'eau.

Il ressort de ce bref rappel d'écophysiologie que la seule possibilité d'adaptation à la sécheresse des plantes est non pas la « résistance » à la sécheresse mais son « évitement ». Pour ceci, les plantes ont développé au cours de l'évolution différentes stratégies :

- (i) la saisonnalité de croissance qui permet aux plantes d'effectuer l'essentiel de leur croissance en période à faible probabilité de sécheresse et de passer la saison sèche en situation de dormance. C'est le cas des espèces ayant évolué en climat méditerranéen qui ont une forte croissance hivernale à faible température et une dormance estivale ;
- (ii) la profondeur d'enracinement qui permet à des espèces comme la luzerne d'avoir accès à des ressources en eau qui retardent la période de manque d'eau.

En jouant sur ces deux facteurs, on peut choisir des espèces fourragères plus ou moins adaptées à certains scénarios de sécheresse. Mais la gamme de variation est très étroite et il n'existe pas de plantes miraculeusement aptes à continuer leur croissance en situation de manque d'eau et rien ne permet d'annoncer qu'il sera possible d'en fabriquer, OGM ou pas...

Un autre point souvent discuté a trait à l'efficacité de l'eau. L'efficacité de l'eau mesure en réalité le rapport entre la production de matière sèche d'un peuplement végétal et la quantité d'eau qu'il a consommée. La plupart des plantes prairiales pérennes des régions tempérées ont une efficacité de l'eau assez similaire, autour de 25 kg/ha de matière sèche par mm d'eau consommée. Les graminées d'origine tropicale comme le maïs ou le sorgho ont une efficacité instantanée supérieure, soit autour de 40 kg MS/ha/mm d'eau. Pour un même volume d'eau disponible un maïs est donc plus efficace qu'une prairie ou une luzerne. Mais ceci n'a rien à voir avec l'adaptation à la sécheresse. On peut même dire qu'en valeur absolue une restriction d'eau sur maïs aura plus de conséquences (-40 kg de MS par mm d'eau) que sur la luzerne (-25 kg de MS par mm d'eau). De plus, l'efficacité de l'eau n'est pas le seul facteur à prendre en compte. Une eau moins efficace consommée en début de printemps par une luzerne à une période de relative abondance de la ressource peut s'avérer économiquement plus efficace qu'une eau plus efficace consommée en période d'étiage en été par un maïs. Il faut donc se méfier de ces comparaisons purement biologiques qui ne prennent pas en compte la réelle disponibilité de la ressource.

### **Impacts des sécheresses passées sur les systèmes fourragers. Exemples de 1976 et 2003.**

**En 1976**, en simplifiant, on peut dire que le déficit fourrager national avait été d'un tiers de la production sur les deux tiers du pays, soit un manque d'environ 15 à 20 millions de tonnes de matière sèche (Marion *et al.*, 1972 ; Pflimlin *et al.*, 1997). Pour certaines régions, seules les premières coupes de ray-grass d'Italie avaient permis de faire un peu de stock. Les ensilages plus tardifs ou les foin avaient été fortement pénalisés ou inexistantes. Les maïs n'avaient pas levé ou très irrégulièrement, et n'avaient pas fait d'épi ou de grain par la suite. Aussi, dès début juin, l'ensilage des céréales a été fortement recommandé et ce d'autant plus que l'échaudage prenait de l'ampleur. Bien évidemment, l'herbe ne repoussant plus et grillant sur place, les animaux ont dû être rentrés à l'étable un à deux mois plus tôt que lors d'une année moyenne, souvent pour être alimentés à la paille et aux concentrés, faute d'autres aliments.

Des essais ou observations en fermes expérimentales ou chez des éleveurs ont d'ailleurs montré que ces rations à base de paille et de concentrés, bien ré-équilibrées en azote, minéraux et vitamines, permettaient de nourrir des vaches produisant une vingtaine de litres de lait, moyennant quelques précautions (Pflimlin, 1987). Après le retour des pluies, en septembre, les prairies y compris celles de ray-grass anglais (encore peu développé) avaient redémarré rapidement et permis des pâturages d'automne jusqu'en décembre, en complément de régimes à base de pailles et céréales. Les cultures dérobées avaient aussi apporté un complément substantiel, parfois trop riche en azote notamment pour les colzas, provoquant la mort de plusieurs centaines de vaches par intoxication par les nitrates non métabolisés par les plantes.

Finalement, en l'absence d'enquêtes à grande échelle et de statistiques, il a été estimé à partir de différents recoupements (Pflimlin *et al.*, 1997) qu'environ un quart du déficit fourrager avait été couvert par la paille (y compris les fanes de pois et cannes de maïs), un quart par l'ensilage des céréales ou de maïs grain, les dérobées et le pâturage prolongé, et un quart par les céréales et concentrés supplémentaires achetés, le dernier quart étant attribué à la décapitalisation, au tarissement précoce et prolongé des vaches ou à une restriction alimentaire plus sévère. Ainsi, sans pour autant handicaper les performances pour les années suivantes.

**La sécheresse de 2003** n'a pas fait non plus l'objet d'un bilan précis, quant au déficit fourrager. Cependant, malgré la canicule et le déficit pluviométrique très important de juin à août, globalement les pertes de rendement ont été nettement plus faibles qu'en 1976. Une première estimation début septembre chiffrait le déficit fourrager à 20% (Institut de l'Élevage, 2003) d'après les experts régionaux et les observations en fermes, confortés par les estimations SCEES. De même, le Centre Commun de Recherche de la Commission Européenne annonçait, dès la mi-août 2003, une baisse globale de la production de blé et de maïs de l'ordre de 10%, les pays du sud étant les plus touchés, l'irrigation étant restreinte. Pour les prairies, l'estimation des pertes était nettement supérieure et se situait à plus de 30% pour la moitié sud de l'Europe, 10 à 20% pour la moitié nord (à l'exception de la Scandinavie), la France étant coupée en deux dans le sens nord-sud (CE 2003). Ces estimations étaient assez proches de celles faites par le SCEES avec ISOP mais avec une division de la France selon une diagonale sud-ouest – nord-est et non pas nord - sud.

Cependant, *a posteriori*, l'analyse des résultats des suivis technico-économiques des réseaux d'élevage et du RICA montrent que le déficit fourrager réel a été sensiblement plus faible. D'après la publication des résultats du RICA pour l'année 2003 (RICA, 2003), les stocks fourragers ont été réduits de 20% en moyenne sur l'ensemble des élevages d'herbivores. Les stocks ne représentant qu'une partie de la consommation de fourrage, nous en déduisons une perte de rendement moyen de l'ordre de 10% à 15% au niveau national avec une grande diversité. Toujours selon le RICA, les éleveurs de bovins viande ont acheté des fourrages et de la paille pour environ 1 000 € et du concentré pour 1 200 € supplémentaires pour une exploitation moyenne de 80 ha et 94 UGB, sans compter le manque à gagner sur le supplément de céréales autoconsommées. Ces dépenses moyennes supplémentaires ont été compensées par une aide publique de 3 200 € pour ce même groupe d'éleveurs de bovins viande car intégrant de fait une partie des pertes de croissance et les problèmes de reproduction des animaux et de moindre recette sur les cultures. Cette minoration du déficit fourrager apparent est également confirmée par une analyse plus détaillée sur la zone charolaise (Veysset *et al.*, 2007).

D'après le rapport de synthèse pour l'année 2003 des Réseaux d'élevages laitiers (Institut de l'Élevage, 2005), la sécheresse 2003 a particulièrement frappé l'Auvergne, la région Rhône-Alpes, Midi-Pyrénées, le Centre et la Bourgogne. Les élevages les plus affectés ont été les systèmes herbagers et herbagers-maïs de piémont, où les rendements en première coupe d'herbe ont été réduits d'environ 50% et les secondes coupes inexistantes. Les maïs ont été globalement moins pénalisés, sauf dans les piémonts du Massif central où les rendements ont chuté de plus de 50% avec une absence quasi totale de grain. Comme en 1976, la plupart des prairies ont fait preuve d'une remarquable faculté de récupération. Transformées en « paillason » pendant 3 à 4 mois, elles ont « redémarré » activement après le retour des pluies, du moins dans les zones inférieures à 700-800 m car, en montagne, la repousse a été arrêtée par le froid ayant brutalement succédé à la sécheresse.

Pour faire face au déficit fourrager, les solutions ont été adaptées selon les disponibilités régionales. En plaine, les déficits ont principalement été compensés par le recours à l'ensilage de maïs, initialement destiné au grain, ou par l'achat de paille et le stockage de céréales. En zone de piémont, les éleveurs ont acheté du maïs sur pied, souvent irrigué, aux céréaliers des plaines voisines avec des coûts de transport élevés. En piémont plus éloigné et en montagne herbagère, les éleveurs ont acheté de « l'énergie » sous forme relativement concentrée (pulpes, luzerne déshydratée, et divers co-produits), les

apports d'aliments grossiers étant assurés par de la paille et parfois du foin pour ceux qui en avaient acheté tôt. Dans le sud du Massif Central, on a eu recours aux rations dites « espagnoles » ou rations sèches.

A l'automne 2003, de nombreux éleveurs des zones de plaine et piémont ont fait pâturer les vaches en début de lactation, avec des productions de lait très correctes et des taux exceptionnels. Mais, en fin d'automne et en hiver, la production a décroché assez nettement avec des démarrages en lactation faibles et une persistance en dessous de la moyenne. Malgré un recours important aux aliments concentrés, les performances journalières des vaches pendant l'hiver 2003/2004 ont été, de 1 à 2 litres en dessous de la normale du fait de la moindre qualité de fourrages, notamment du maïs ensilage, particulièrement pauvre en grain.

En zone de montagne, en revanche, le froid ayant très rapidement succédé à la sécheresse, l'alimentation hivernale a été assurée par des fourrages achetés, plus riches en énergie que les régimes habituels à base de foin et d'ensilage, et les performances laitières se sont bien maintenues. La pénurie fourragère s'est surtout répercutée sur l'alimentation des génisses dont la croissance a été parfois affectée.

Mais c'est surtout au printemps 2004 que l'on a assisté à une baisse généralisée de collecte laitière, baisse d'intensité plus ou moins forte selon les régions : de -2 ou -3% en Auvergne et Rhône-Alpes à -7 ou -9% en région Centre, Poitou-Charentes ou Sud-Ouest. Les explications sont de différents ordres, certains éleveurs ayant fait le choix de réformer davantage, d'autres ayant été confrontés aux problèmes de reproduction (vaches trop maigres...), ou encore à des lactations prolongées. Ainsi, malgré la volonté des éleveurs laitiers de bien nourrir leurs vaches, les effets de la sécheresse 2003 se sont répercutés sur les performances du troupeau sur toute l'année 2004, voire au-delà, dans les régions les plus touchées.

### **Des systèmes fourragers mieux adaptés à la sécheresse.**

Face au risque de sécheresse, les éleveurs doivent assurer une ressource alimentaire constante à leurs troupeaux, malgré les pénuries fourragères de plus ou moins longue durée. Ceci implique

(i) une **adaptation stratégique** des systèmes fourragers et du système d'élevage en fonction d'une certaine appréhension du risque sécheresse en terme de fréquence, et

(ii) une flexibilité du système fourrager et du système d'élevage qui est du domaine de **l'adaptation tactique**.

L'adaptation stratégique concerne donc les choix de systèmes d'élevage : date de vêlage ou d'agnelage, niveau de production laitière, type de production animale (gras ou maigre; broutards, bouvillons ou bœufs, ...), et de systèmes fourragers (niveau de chargement en fonction de la STH ou de la SFP, niveau d'utilisation des concentrés, part de l'herbe et du maïs ensilage, pâturage ou foin et ensilage d'herbe...). L'adaptation tactique concerne quant à elle la gestion annuelle et saisonnière du système fourrager en fonction de l'évolution climatique subie ou prévue (date de mise à l'herbe, gestion des stocks, utilisation des cultures à double fin : maïs ensilage vs. grain, céréales immatures, utilisation des pailles).

#### *1- Le maïs ensilage une ressource fourragère essentielle...*

En France, dans la plupart des systèmes d'élevage de ruminants, la culture du maïs, lorsqu'elle est possible, est devenue un élément essentiel des systèmes fourragers. En effet, son utilisation sous forme d'ensilage permet de sécuriser la constitution de stocks fourragers de très bonne valeur alimentaire sachant que ces stocks sont nécessaires pour l'alimentation hivernale des troupeaux (4 à 6

mois selon les régions) et qu'ils peuvent permettre de palier l'absence de croissance d'herbe pendant les mois d'été (2 à 3 mois selon les régions et les années) (Chénais et al. 1997). Certains systèmes d'élevage laitier intensifs ont fait de cette culture la ration unique de leur troupeau tout au long de l'année (Bretagne, Pays de Loire, Sud-Ouest). L'ajustement tactique de ce système vis-à-vis des aléas de sécheresse consiste en une double valorisation de la sole semée en maïs. La part du maïs récolté en grain à l'automne s'ajuste en fonction du niveau de rendement permis par le climat de l'été.

## 2- ...mais parfois remise en cause.

Dans un certain nombre de situations, le recours à l'irrigation, notamment dans les régions à risque de sécheresse plus important (Poitou-Charentes), permet d'assurer une très grande régularité de la production d'ensilage et d'avoir un système extrêmement sécurisé. Ce système, malgré sa simplicité et sa sécurité, se heurte cependant à un certain nombre de contraintes de divers ordres :

- (i) restrictions locales de la ressource en eau plus ou moins fortes liées aux pressions sociétales comme en Poitou-Charentes, ce qui limite les volumes d'eau disponibles et les périodes d'irrigation.
- (ii) problèmes environnementaux liés à la trop grande importance du maïs dans les rotations, à la difficulté à assurer une couverture du sol en hiver pour éviter la lixiviation du nitrate, à l'utilisation trop systématique d'herbicides, et aux difficultés de gestion des effluents d'élevage dans ces systèmes trop intensifs (Le Gall *et al.*, 1997).
- (iii) problèmes économiques liés au coût de l'unité fourragère produite (Grasset, 1997)).
- (iv) interdiction de l'ensilage pour certaines filières fromagères.
- (v) dépendance vis-à-vis des filières d'approvisionnement en complément azoté et minéral.

En absence d'irrigation, la production de maïs ensilage peut varier dans de très grandes proportions, notamment dans les sols à faibles réserves hydriques. En Poitou-Charentes, même dans un sol à réserve utile d'environ 150 mm (Sol Rouge à Châtaignier, INRA de Lusignan) la production de maïs ensilage peut varier de 9 tonnes de matière sèche à l'hectare en année très sèche (1976, 1991, 2003) à 18-20 tonnes en années humides. Une telle variabilité peut devenir très difficile à gérer. En régions à sol à moindre réserve utile, il devient simplement impossible de baser un système d'élevage sur la seule ressource fourragère du maïs non irrigué.

## 3- Le sorgho grain ensilé, une alternative possible au maïs en région sèche avec des atouts environnementaux

L'ensilage de sorgho grain pour l'utilisation par les bovins s'est développé localement dans certaines régions du Sud-Ouest comme alternative au maïs en situations de sécheresse (Legarto, 2000). L'analyse de cette solution alternative doit se faire à deux niveaux :

- (i) adaptation de la culture du sorgho vis-à-vis de la sécheresse comparativement au maïs, et
- (ii) valeur et efficacité alimentaire de l'ensilage de sorgho pour différents types d'animaux.

Des études agronomiques ont été réalisées à l'INRA de Lusignan permettant de comparer la production de matière sèche du sorgho et du maïs en conditions sèche et sous irrigation. Le tableau 1 permet de synthétiser ces résultats (Lemaire et al. 1996).

**Tableau 1** : Comparaison de la production de matière sèche, de la consommation totale d'eau (irrigation, pluie, réserve du sol), de l'efficacité de l'eau et des prélèvements d'azote, entre une culture

de maïs, cv. Furio, et une culture de sorgho cv. DK18, récoltées en ensilage à l'INRA de Lusignan. (D'après Lemaire *et al.*, 1996).

	Irrigué		Sec	
	Maïs	Sorgho	Maïs	Sorgho
Production de Matière Sèche (tonnes/hectare)	24	18	9	13
Consommation d'eau (mm)	615	480	300	310
Efficience de l'eau (kg MS/ha/mm H <sub>2</sub> O)	39	37	30	42
Prélèvement d'azote (kgN/ha)	288	290	135	240
Prélèvement d'azote (kg N/ha/mm H <sub>2</sub> O)	0.47	0.60	0.33	0.74

En condition non limitante d'alimentation en eau, le maïs ensilage a un potentiel de production nettement plus élevé que le sorgho. Ceci est dû à une croissance foliaire plus rapide du maïs qui intercepte ainsi une plus grande quantité de rayonnement. On retrouve là l'exigence thermique plus importante du sorgho par rapport au maïs. Ceci montre qu'en absence de sécheresse ou en conditions d'irrigation le maïs reste la culture la plus intéressante en terme de rendement par hectare. Cependant, cette forte production du maïs ne peut être obtenue qu'avec une consommation d'eau globale très importante de 615 mm. Sur ces 615 mm d'eau consommée, un total de 350 mm a été apporté par irrigation, ce qui représente une pression sur la ressource de 3 500 m<sup>3</sup> par hectare. Le sorgho, du fait de son potentiel de production plus faible n'a consommé que 480 mm d'eau au total, et a nécessité une irrigation de 160 mm seulement, soit un prélèvement sur la ressource de 1 600 m<sup>3</sup> par hectare. On pourrait alors en déduire qu'en cas de ressource en eau quantitativement limitée, il serait préférable d'irriguer du sorgho que du maïs. L'efficience de l'eau du maïs et du sorgho en situation irriguée étant identique (39 vs. 37 kgMS/ha/mm H<sub>2</sub>O), on peut penser qu'il aurait été possible d'obtenir sur le maïs une production de 18 tonnes de MS par hectare, équivalente au sorgho en utilisant la même quantité d'eau d'irrigation de 160 mm. Cependant, on s'aperçoit que l'efficience de l'eau du maïs diminue de 40 à 30 kg de MS par mm d'eau consommée lorsqu'il passe d'une condition non limitante d'alimentation hydrique à une condition très restreinte, alors que l'efficience du sorgho augmente de 37 à 42. Cette différence entre maïs et sorgho avait déjà été signalée et quantifiée par Marty et Puech (1971). Ainsi, en conditions de restriction du volume d'eau disponible, une plus grande efficience de l'eau sera obtenue par l'irrigation du sorgho que par l'irrigation restrictive du maïs. En conditions de sécheresse prononcée le maïs et le sorgho consomment une même quantité d'eau de 300 mm environ correspondant à l'extraction de l'eau du sol (180 mm environ) et à l'apport des pluies. Cependant, le maïs ne produit que 9 tonnes de MS par hectare alors que le sorgho en produit 13 du fait de sa meilleure efficience pour l'eau dans ces conditions. Il y a donc une inversion du potentiel de production entre le sorgho et le maïs lorsque l'on passe d'une condition non limitante d'alimentation en eau à une condition de sécheresse importante. Ces résultats sont confirmés par les observations faites par Straeber et Le Gall (1998) qui indiquent en effet à partir de résultats obtenus dans la région Aquitaine qu'en situation de sécheresse importante le sorgho maintient une production plus élevée que le maïs.

Il doit donc exister un point d'équi-potentialité entre les deux cultures qui doit permettre de déterminer les situations où la culture du maïs reste favorable et celles où la culture du sorgho devient plus intéressante. Ce point d'équi-potentialité est difficile à établir expérimentalement dans chaque cas car il est fonction des types de sol et du climat.

L'introduction du sorgho dans les systèmes fourragers en substitution au maïs ensilage, quels que soient ses avantages agronomiques et environnementaux, implique qu'il puisse fournir des stocks

fourragers de qualité comparable à celle du maïs ensilage ou du moins pas trop pénalisante au regard des exigences alimentaires des animaux. Différentes études ont été menées sur la valorisation des ensilages de sorgho par des vaches laitières (Legarto, 1991, 2000 ; Nascimento *et al.*, 2005). Le tableau 2 résume une étude menée à l'INRA de Lusignan comparant directement un ensilage de sorgho grain conduit en sec avec un ensilage de maïs conduit la même année en irrigué.

**Tableau 2** : Performances comparées d'ensilage de maïs et d'ensilage de sorgho. (D'après Emile *et al.* INRA Lusignan, données non publiées).

	Culture			Ensilage		
	Pluie	Irrigation	Rendement en MS	MAT (% MS)	NDF (% MS)	Amidon (% MS)
Maïs	190	152	20,1 t/ha	8,2	39	30,4
Sorgho	162	0	14,3 t/ha	10,4	40	27,7

	Performances animales				
	Quantités Ingérées (kg)	Lait (kg)	Taux butyreux (%)	Taux protéique (%)	Poids vif (kg)
Maïs	17,0	29,9	4,01	3,21	+ 20
Sorgho	19,9	30,3	4,26	3,21	+ 29

Ces résultats encore préliminaires et en cours de confirmation indiquent que l'ensilage de sorgho grain effectué dans de bonnes conditions (teneur en MS de 33% par rapport à 35% pour le maïs) a une valeur alimentaire comparable à celle du maïs. On peut noter cependant que le sorgho présente deux points de MAT de plus que le maïs, ce qui est confirmé par Legarto (2000). L'ensilage de sorgho est davantage consommé que l'ensilage de maïs. Cet avantage ne se retrouve pas dans la production laitière mais seulement dans l'état corporel des animaux. Ces résultats impliquent donc que la substitution du maïs irrigué par du sorgho s'accompagnerait d'une affectation accrue de surface par vache (i) pour compenser l'écart de production de 6 tonnes de MS par ha, soit une augmentation de 30% et (ii) pour compenser le différentiel de consommation qui est de 17%, soit au total une augmentation de la surface par vache à production laitière constante de près de 50%. Cependant, en toute rigueur, la comparaison entre maïs et sorgho aurait dû s'effectuer dans les mêmes conditions de non irrigation. Compte tenu de l'intensité assez faible de la sécheresse en cette année 2004, le volume d'eau d'irrigation n'a été que de 150 mm. Si l'on prend comme hypothèse une efficacité de l'eau de 40 kg de MS par mm d'eau, le même maïs en sec aurait eu un déficit de production de 6 tonnes de MS, soit une production équivalente à celle du sorgho cette année-là. Dans ces conditions d'équi-production des deux cultures, la substitution du maïs par le sorgho se heurte à la moindre valorisation du sorgho ensilé en terme de lait produit. Toutefois, on peut estimer que dans toutes les situations à sécheresse plus forte entraînant une production du maïs inférieure de plus de 20% à celle du sorgho, la substitution du premier par le deuxième sera économiquement avantageuse. Seule une étude fréquentielle à l'aide d'un simulateur de culture tel que STICS, prenant en compte, le type de sol et la variabilité climatique permettra de déterminer dans chaque situation s'il y a un avantage stratégique à substituer le sorgho au maïs. Ce type d'étude est en cours à l'INRA de Lusignan dans le cadre du projet PRAITERRE (Agriculture et Développement Durable). Elle sera couplée avec une analyse économique. Comme signalé par Straeber et Le Gall (1998) et indiqué dans le tableau 2, il est important de tenir compte du fait qu'en condition de déficit hydrique prononcé, la teneur en grain du maïs est fortement diminuée alors que celle du sorgho est maintenue à au moins 50%. Ceci se traduit par une détérioration importante de la qualité du maïs ensilage en situation de déficit hydrique et une baisse importante des performances animales permises.

Des recherches complémentaires sont indispensables afin de voir comment mieux optimiser l'utilisation du sorgho grain ensilé dans les rations pour l'élevage des ruminants. La plus faible efficacité alimentaire du sorgho par rapport au maïs mérite d'être plus précisément analysée afin d'en déterminer les causes : moins bonne digestibilité de la partie « tige » ou moindre efficacité du type d'amidon. Des études sur d'autres types d'animaux seraient également nécessaires notamment pour l'engraissement. Au niveau du matériel génétique végétal, une grande variabilité de types de sorgho est disponible avec des rapports tiges/grains très variables et des précocités très différentes. L'utilisation des sorghos dit « sucriers » (Soudais, 1998) qui accumulent des sucres solubles dans leur tige permettraient d'accroître les potentialités de production par rapport aux sorghos grain classiques de 10 à 40%. Cependant, les taux de grain de ces types de sorgho sont très variables et ne permettent pas toujours d'atteindre une teneur en MS de 35% pour la récolte, ce qui handicape la qualité de l'ensilage et réduit fortement les quantités ingérées. Il existe donc un certain nombre de voies à explorer afin de permettre une meilleure utilisation de cette espèce.

En conclusion, on peut dire que, dès à présent, le sorgho grain ensilé peut devenir une alternative au maïs ensilage dans les régions sèches du Sud-Est, du Sud-Ouest et du Centre-Ouest dans des situations où l'irrigation n'est pas possible ou trop sujette à restrictions. Cette culture n'apparaît cependant possible qu'au Sud de la Loire avec le matériel génétique actuel. Elle doit cependant être réservée à des sols suffisamment profonds permettant d'atteindre des niveaux de rendements suffisants sans recours à l'irrigation. Afin de limiter les fluctuations de rendements les années les plus sèches, des irrigations de complément en quantité limitée pourraient être envisagées, du fait de la bonne efficacité de cette culture en conditions de limitation d'alimentation hydrique. Cependant, ceci se heurte souvent à la nécessité d'anticipation dans la gestion des tours d'eau et des blocs d'irrigation.

## **Une stratégie fourragère pour valoriser au mieux les ressources naturelles en eau : pluies et réserves du sol.**

Lorsque la sécheresse estivale est trop intense, et en situations de sols à réserve hydrique trop limitée pour assurer une culture d'été, la stratégie qui doit être recherchée est la constitution de stocks fourragers à partir de plantes réalisant l'essentiel de leur croissance dans les périodes où la sécheresse est limitée. Ces stocks fourragers devant permettre d'assurer l'alimentation des animaux à la fois pendant la période sèche et pendant la période hivernale.

### *1- Les céréales immatures*

L'ensilage de céréales immatures peut constituer une solution pour fournir des stocks fourragers en situations où les cultures d'été telles que maïs ou sorgho ne sont pas possibles. De nombreuses études, tant en France qu'à l'étranger ont montré tout l'intérêt de l'ensilage des céréales d'hiver pour l'alimentation des troupeaux (Legall *et al.*, 1998 ; Bergen *et al.*, 1991 ; Garnsworthy et Stokes, 1993 ; Jobim et Emile, 1999 ; Mac Cartney et Vaage, 1997). Pfmilin (1998) indique que les céréales étant généralement présentes dans les régions d'élevage, à l'exception de la montagne, elles peuvent constituer le cas échéant une solution de rattrapage pour pallier un déficit fourrager occasionnel. A ce titre, les céréales immatures constituent sans doute la première sécurité vis-à-vis d'un déficit fourrager car elles peuvent être menées soit en grain soit en ensilage. En effet, pour ces cultures, la décision de les reconverter en ensilage au stade immature se prend en début d'été, moment où l'éleveur peut déjà évaluer le risque de sécheresse. D'autre part, d'un point de vue zootechnique, il est plus rassurant pour l'éleveur de faire consommer 5 kg de blé dans l'ensilage que de distribuer séparément le grain et la paille aux animaux (Pfmilin, 1998). Cependant, on peut penser que l'utilisation systématique de cette ressource fourragère peut devenir la règle dans un certain nombre de situations à sécheresse chronique.

La production de matière sèche permise par l'ensilage des céréales immature récolté un mois avant la récolte en grain (stade grain laiteux-pâteux) se situe à environ 150-190% du rendement en grain exprimé à 15% d'humidité (Le Gall *et al.*, 1998). Ces auteurs montrent ainsi que dans le Maine et Loire, sur la période 1981-1997, le blé immature ensilé peut produire de 6 à 12 tonnes de matière sèche ce qui correspond au niveau de production du maïs ensilage dans cette région pour la même période. Une même étude dans le Pas de Calais sur la période 1992-1997 (Le Gall *et al.*, 1998) indique une production moyenne de blé immature de 14, 8 tonnes de matière sèche à l'hectare avec un écart de 13 à 18 t/ha, alors que le maïs ensilage produit en moyenne 14 tonnes de matière sèche à l'hectare avec une variation de 10 à 16 t/ha. On voit donc que même dans des conditions *a priori* peu sèches, l'utilisation des céréales immatures peut devenir intéressante. Dans les régions les plus sèches du Centre-Ouest (Sud Bretagne, Pays de Loire et Poitou-Charentes), les céréales immatures présentent une régularité de rendement supérieure au maïs ensilage. Ces estimations de rendement ont été réalisées sur la base des cultures de céréales en grain, principalement les blés. Or, il est possible de diversifier la gamme de céréales. En utilisant soit de l'orge soit de l'avoine (Garnsworthy et Stokes, 1993 ; Mac Cartney et Vaage, 1994). L'utilisation du triticale permet d'avoir des productions de matière sèche souvent supérieures (Royo et Pares, 1996 ; Andrews *et al.*, 1991).

L'évolution rapide de la qualité impose une récolte à un stade « laiteux-pâteux » correspondant à une teneur en matière sèche comprise entre 30 et 40%. Pour le blé, l'avoine et le triticale, cela correspond en moyenne à 39-40 jours après la floraison. En revanche, l'orge doit être récoltée plus tôt (15-20 jours après floraison) en raison de la présence des barbes. Dans les tables alimentaires de l'INRA (1998), la digestibilité des céréales immatures est donnée à 60% (0,64UFL/kg MS) contre 70% au maïs ensilage. Cependant des essais plus récents (Emile *et al.*, 2008) donnent des valeurs un peu plus élevées (0,70 UFL/kg MS). Des travaux danois (Kristensen, 1992) indiquent même des valeurs quasiment identiques à celle du maïs ensilage. De plus, des résultats obtenus en Angleterre (Tetlow, 1992) montrent que l'application d'urée ou de soude permet d'améliorer l'ingestibilité et la digestibilité de ces ensilages de 2 à 5 points. Leaver et Hill (1995) montrent que les performances laitières permises par l'ensilage de céréales immatures sont analogues à celles des ensilages d'herbe. Les travaux d'Arvalis sur la ferme de la Jaillière dans le Maine et Loire ont permis de comparer les performances laitières de vaches alimentées avec des ensilages de céréales et avec de l'ensilage de maïs (ITCF, 1990 cité par Le Gall *et al.* (1998)). Les conclusions de ces travaux sont que

- (i) l'ingestion des céréales immature est inférieure à l'ingestion de l'ensilage de maïs,
- (ii) la production laitière permise par l'ensilage de blé immature est nettement plus faible que celle observée pour le maïs ensilage (-3kg lait/vache),
- (iii) mais les taux protéiques et butyreux sont supérieurs ainsi que l'état corporel des animaux.

Pour la production de viande, Le Gall *et al.* (1998) indiquent que les quantités ingérées d'ensilage de céréales peuvent être supérieures à celle du maïs et conduisent à des performances identiques en terme de GMQ que les ensilages de maïs. En conclusion de leur étude, Le Gall *et al.* (1998) indiquent que « les performances permises par l'ensilage de céréales immatures sont proches de celles obtenues par les bons ensilages d'herbe et légèrement inférieures à celles observées avec le maïs. Ces résultats sont très rassurants pour un fourrage qui a surtout une fonction de sécurité... ». De façon plus structurelle, l'ensilage de céréales immatures pourrait être avantageusement associé à l'ensilage d'herbe. C'est aussi un excellent complément du pâturage de cultures dérobées et des repousses d'herbe d'automne pour la production de viande.

Le recours à l'utilisation de céréales immatures pour constituer des stocks fourragers de bonne qualité constitue donc une solution permettant à la fois de sécuriser les systèmes fourragers et d'élevage dans les situations où l'irrigation du maïs n'est pas possible. Des études complémentaires sont en cours

actuellement à l'INRA de Lusignan pour essayer d'optimiser cette production. En effet, une analyse plus exhaustive des différents types de céréales utilisables, tant au niveau des espèces (blé, orge, avoine, triticale) que des variétés s'avère nécessaire. De plus, il semble possible d'améliorer la valeur énergétique et protéique en introduisant des légumineuses à graines en mélange dans la céréale : culture de vesce avoine, blé-pois ou triticale-pois par exemple (Lecomte et Parache, 1993), à l'image de ce qui est parfois réalisé en agriculture biologique. Ainsi, les céréales immatures pourraient passer du statut de culture fourragère « opportuniste » permettant seulement d'apporter une sécurité au système fourrager en année sèche, à un statut de culture fourragère « de base » permettant de réaliser tout ou partie des stocks fourragers dans un certain nombre de conditions ce qui constitue alors une véritable stratégie d'évitement de la sécheresse au niveau du système fourrager. Enfin, il est intéressant d'analyser cette culture dans le cadre d'un développement agricole plus durable. En effet, les itinéraires techniques pour la production d'ensilage ne sauraient être les mêmes que ceux mis en œuvre pour la production de grains. La gestion des apports azotés, du désherbage et des maladies sur cette nouvelle culture doit pouvoir conduire à des économies appréciables d'intrants par rapport aux productions céréalières classiques. Ceci doit être analysé et intégré dans une analyse environnementale et technico-économique.

## 2- La luzerne pure ou en mélange

Les surfaces de luzerne ont continuellement diminué en France depuis les années 1960, passant de plus d'un million d'hectares à environ 470 000 ha dans les années 1990 (Arnaud et al. 1993) puis à 360 000 ha aujourd'hui (Huyghe et al. 2005). Ces chiffres ne concernent que la luzerne semée en pure. Les ventes de semences étant relativement stables, on devrait pouvoir conclure en une légère augmentation des surfaces semées en association luzerne-graminées. Cette diminution correspond pour partie à la disparition de l'élevage dans les régions céréalières. Mais même dans certaines zones de polyculture-élevage cette culture, pourtant dotée de propriétés agronomiques et environnementales indéniables, reste largement sous-utilisée dans les systèmes fourragers. Face à la simplicité d'utilisation du maïs ensilage, la luzerne présente certaines contraintes de récolte et d'utilisation, notamment pour les premières coupes, période à laquelle la réalisation de foins de qualité reste délicate et aléatoire. La déshydratation est apparue comme une solution idéale, ce qui a permis le maintien de la luzerne dans les rotations céréalières en Champagne. On peut noter que la luzerne déshydratée constitue une ressource fourragère largement mobilisée par différents types d'élevage, notamment pendant les épisodes de sécheresse. Cependant, cette solution, techniquement très satisfaisante notamment en ce qui concerne la réduction de la charge de travail, ne peut guère être généralisable étant donné le prix de l'énergie. Il est cependant possible que des solutions techniques plus souples comme le séchage en grange utilisant des sources d'énergie alternatives puissent se développer localement pour permettre de sécuriser la récolte de foins de qualité (Baud, 1998 ; Foucras, 1998).

En situations de faibles disponibilités en eau, la luzerne peut produire 12 à 14 tonnes de matière sèche là où le maïs n'en produit que 10 à 12 (Straëbler et Le Gall, 1993). La luzerne est naturellement adaptée à la sécheresse grâce à son enracinement profond. Il importe alors de la réserver à des sols permettant à cet enracinement de se développer. Les deux premières coupes de printemps sont généralement récoltées en foin ou en ensilage. Les foins sont difficiles à réaliser pour la première coupe. Cependant, la technique de l'enrubannage peut permettre une récolte plus facile et de meilleure qualité (Le Gall *et al.*, 1993) bien qu'elle ne soit pas aussi aisée avec la luzerne pure, ce qui justifie parfois le recours aux associations. Les repousses d'été d'intensité assez variable avec la sécheresse et le type de sol peuvent être aisément pâturées. Les risques de météorisation peuvent être maîtrisés (cf les élevages argentins), mais la réduction de la pérennité des luzerne demeure un problème. Le mélange

de la luzerne avec des graminées telles que le dactyle ou la fétuque élevée permet en générale une meilleure fenaison et une utilisation plus souple de la luzerne (Lavoine et Peres, 1993).

Les foins de luzerne sont un très bon complément alimentaire du maïs ensilage ou des ensilages de céréales immatures. En outre, les stocks fourragers ainsi constitués sont aisément reportables d'une année sur l'autre, offrant ainsi à l'éleveur une souplesse d'adaptation à la sécheresse dans son système fourrager. Malgré des teneurs en MAT assez élevées, la luzerne a une valeur azotée assez moyenne du fait de la grande dégradabilité de ses protéines dans le rumen (Julier et al. 2002), c'est pourquoi sa distribution avec un ensilage riche en amidon est préférable.

Cette ressource fourragère est assez négligée à notre avis dans bon nombre de régions. Ses qualités agronomiques (économie d'azote) devraient lui donner un grand regain d'intérêt. Dans le cadre d'une agriculture durable, il est important de prendre en compte les économies d'énergie réalisées par l'utilisation de la luzerne à travers les économies d'engrais azotés. Enfin, cette culture limite de manière importante les fuites de nitrates vers les nappes et ne requiert qu'une très faible application d'herbicides. Malgré une efficacité pour l'eau de l'ordre de 25 kg MS/mm H<sub>2</sub>O comparée à celle du maïs de 40 kg MS/mm, une irrigation d'appoint de la luzerne en fin de printemps peut permettre d'assurer une troisième voire une quatrième coupe en été qui peut procurer un excellent foin. Cette irrigation précoce de la luzerne peut se situer avant le début de l'irrigation du maïs.

### 3- L'extension de la période de pâturage

L'allongement de la période de pâturage au-delà des dates habituellement pratiquées, que ce soit en été ou en hiver, permet d'augmenter la part de l'herbe pâturée dans l'alimentation des troupeaux (Pottier *et al.*, 2001, O'Donovan *et al.*, 2004)). De ce fait, il est possible de diminuer la part des stocks nécessaires. Cette extension de la période de pâturage consiste essentiellement à faire consommer au pâturage, en période de faible croissance de l'herbe en hiver ou en été, des stocks sur pied qui ont été élaborés pendant des saisons où la croissance de l'herbe était possible (automne et fin de printemps - début d'été avant la sécheresse). Mieux valoriser la croissance hivernale par le pâturage à une période où il n'y a aucun risque de sécheresse est un moyen de produire sans réduire la disponibilité en eau aux périodes à risque. C'est aussi un moyen de réduire la consommation en fourrages conservés qui seront ainsi disponibles en plus grande quantité pour réduire le déficit fourrager en été sec.

La croissance d'herbe est peu importante en hiver dans certaines régions alors que dans les zones océaniques elle peut produire jusqu'à 10-15 kg MS/ha/jour (Lemaire et Salette, 1982). Dans les Pyrénées, le pâturage de prairies en hiver peut contribuer de façon significative aux besoins nutritionnels des brebis en lactation, grâce notamment à une excellente valeur alimentaire de l'herbe ingérée (Gibon, 1981 ; Dedieu *et al.*, 1991). Cependant, lorsque l'on laisse un stock d'herbe sur pied important à l'automne pour être consommé pendant l'hiver, l'accumulation de matériel sénescé diminue fortement la qualité de l'herbe (Lemaire, 1999 ; Ducrocq, 1996 ; Delagarde *et al.*, 1999). Il s'agit donc d'avoir une gestion adaptée du pâturage en cette saison pour tirer un profit maximum de cette ressource en faisant coïncider les périodes à faibles besoins des animaux aux périodes à faible croissance de l'herbe et en adaptant le chargement aux conditions climatiques (Pottier *et al.* 2001). Le pâturage hivernal peut être soit partiel et réduit aux « marges de l'hiver » (pâturage tardif et/ou précoce) soit total (Dobbels *et al.*, 1996). Pottier *et al.* (2001) rapportent une série d'expérimentations où ils montrent que le pâturage hivernal de prairies temporaires ou permanentes n'a pratiquement pas affecté la production d'herbe au printemps suivant. Seul un décalage de la production en début de printemps est observé. Il importe cependant d'utiliser cette pratique avec une certaine prudence en évitant de trop forts chargements instantanés qui pénaliseraient la prairie par le piétinement en période trop humide et qui poseraient des problèmes environnementaux de lixiviation du nitrate. Dans cette expérimentation, toujours selon Pottier *et al.* (2001), la conduite des bovins et des ovins en plein air pendant l'hiver n'a

pas d'effet négatif sur les performances, sous réserve d'une disponibilité minimale de l'herbe. Dans une étude expérimentale, Pottier *et al.* (1996) ont montré qu'à l'échelle d'un système ovin, il était possible d'exploiter l'herbe jusqu'à une hauteur de 2 à 2,5 cm sur la totalité de la surface en hiver, sans que cela porte préjudice ni à la production fourragère ni aux performances animales. Au cours des 5 années d'expérimentation, les surfaces consacrées aux stocks n'ont pas diminué et le système est devenu excédentaire donc beaucoup moins vulnérable aux aléas de la sécheresse estivale. On peut donc dire que dans les régions océaniques à climat relativement doux en hiver, le pâturage des prairies temporaires ou naturelles pendant la période hivernale peut, dans les conditions qui s'y prêtent (portance des sols), fournir un supplément de ressource fourragère non négligeable qui permet d'aborder les périodes sèches de l'été avec plus de sécurité. En effet, l'herbe produite en fin d'automne et en hiver, si elle n'est pas consommée sur place par les animaux, sera perdue par sénescence (Lemaire, 1999). Il s'agit donc d'exploiter au mieux une ressource fourragère naturelle qui, bien que modeste, peut fournir une part de l'alimentation de certains troupeaux. Lemaire (1991) a montré que la précocité de croissance de l'herbe en fin d'hiver et au début du printemps était fortement dépendante des modes d'exploitation de l'herbe à l'automne. On peut en outre penser que le réchauffement climatique en cours devrait permettre dans les années à venir une contribution plus importante de l'hiver au pâturage.

Il est possible également de reporter une partie de la croissance d'herbe de la fin du printemps pour être consommée sur pied pendant la période estivale en situation de sécheresse (Pottier *et al.*, 2001). Des essais dans le Morbihan ont montré que la suppression d'une fauche de parcelles d'excédent en fin d'été et son dessèchement sur pied permettait un prolongement de 25 jours de la saison de pâturage estival en pâturant des repousses âgées de 50 à 100 jours d'une herbe bien consommée (association dactyle – trèfle blanc) qui conserve l'essentiel de sa valeur alimentaire. Cette technique de pâturage de stocks sur pied comparée au système classique de constitution maximum de stocks au printemps a permis dans cette expérience de passer d'une conduite déficitaire en fourrages conservés à une conduite excédentaire plus robuste face à l'aléa sécheresse. Ainsi, Thébaud (1999) signale qu'en Bretagne les repousses feuillues peuvent être pâturées en Juillet –Août après plus de 55 jours de repousse notamment lorsque la prairie comporte du trèfle blanc. Du fait de l'association avec le trèfle blanc, ces repousses feuillues conservent une valeur alimentaire très intéressante malgré un âge de repousse élevé (0,75 à 0,80 UFL- 80 à 90 g PDI- Delaby et Peccatte, 2003). Surault *et al.* (2001) ont réalisé une étude sur la valorisation du report sur pied en été de repousses de ray-grass anglais en comparant 4 variétés. Cette étude montre que la baisse de la qualité de l'herbe lorsqu'elle se dessèche sur pied reste relativement faible (-3 points de digestibilité entre 42 et 63 jours) et que la qualité de l'herbe consommée est relativement haute : en moyenne 79 % de digestibilité à 63 jours de repousse. Cette étude confirme les résultats obtenus par Lemaire *et al.* (1989) qui montraient que la qualité de la luzerne était en général augmentée par la sécheresse. En effet, la diminution de la digestibilité au cours du temps est liée à la croissance des plantes (Duru *et al.*, 1995 ; Ducrocq et Duru, 1996) or celle-ci devenant presque nulle avec la sécheresse elle ne diminue que très lentement.

En conclusion, on peut dire que l'extension de la saison de pâturage en hiver et au printemps permet de valoriser au mieux la croissance d'herbe permise par les ressources naturelles en eau, réserves du sol et pluie, en rendant les systèmes fourragers moins dépendant des aléas de la sécheresse. Il faut noter également que ces techniques sont susceptibles d'abaisser assez significativement les coûts de l'unité fourragère produite et doivent être analysées en conséquence à l'échelle du système de production. Pour que cette technique apporte réellement un surcroît de sécurité dans les systèmes fourragers, il importe qu'elle soit mise en œuvre à chargement animal constant. Il ne s'agit pas ici d'exploiter une nouvelle ressource fourragère entraînant une possibilité d'augmentation du chargement car dans ces conditions, la sensibilité du système d'élevage aux aléas de la sécheresse estivale serait accrue. Il s'agit par contre en utilisant cette nouvelle ressource fourragère de diminuer la dépendance des

troupeau vis-à-vis des stocks fourragers en limitant la consommation de ceux-ci durant la période hivernale afin d'en réserver le plus possible l'usage pour les périodes de pénurie d'herbe en été.

#### 4- La paille : une ressource à mobiliser

D'après le Bureau Commun des Pailles et Fourrages, environ 40% des pailles produites sont autoconsommées, 20% sont régulièrement commercialisées et plus de 30% seraient enfouies pour l'entretien organique des terres (d'après Pflimlin *et al.*, 1997). Ceci permet donc une certaine mobilisation supplémentaire de la ressource en cas de pénurie fourragère importante au niveau régional ou national. Ainsi, en 1976, il a été possible de mobiliser de 3 à 4 millions de tonnes de paille supplémentaires pour l'alimentation des animaux sur un total de 20 millions de tonnes de paille produite. Ceci n'a été possible qu'au prix d'un grand effort de solidarité nationale (plan « paille »). Cependant, cette ressource est plutôt en régression du fait que les zones céréalières prennent de plus en plus conscience de l'entretien organique de leurs sols.

La paille peut être consommée en l'état et il n'est pas besoin de la broyer ni de la hacher. Les traitements chimiques ne sont pas nécessaires lorsque la paille est distribuée avec des concentrés. Des régimes paille + concentrés conviennent à toutes les catégories d'animaux, la part de concentrés dans la ration devant être ajustée au niveau des performances animales attendues (Pflimlin *et al.*, 1997).

### Conclusion

Les systèmes herbagers basés essentiellement sur la production d'herbe sont les plus sensibles aux aléas de sécheresse car ils ne disposent pas le plus souvent sur place de ressources fourragères complémentaires de substitution. Les cultures de céréales qui autrefois accompagnaient ces systèmes ont disparu de la plupart des régions herbagères et, avec elles, a disparu un élément essentiel de flexibilité des systèmes. Aujourd'hui, la seule flexibilité de ces systèmes ne peut être apportée que par une gestion « sécuritaire » du pâturage et des stocks, se traduisant par un chargement modéré voire faible. Se pose alors le problème du coût économique de cette adaptation au risque de sécheresse compte tenu de son occurrence. Il ne peut être question de baisser le chargement au-delà d'un certain niveau pour pouvoir s'adapter à des sécheresses exceptionnelles. Dans ces situations de crise, il est alors nécessaire de mettre en œuvre des pratiques de sauvegarde, et notamment le recours à des achats de paille et de concentrés dans le cadre de solidarités régionales ou nationales.

Pour les systèmes plus intensifs de plaine basés sur un système mixte herbe-fourrages annuels, la mixité entre le système fourrager et les cultures céréalières de vente devient un élément de flexibilité considérable face à la sécheresse. Cette complémentarité peut le plus souvent s'opérer à l'échelle de l'exploitation lorsque celle-ci reste dominée par un système de production de polyculture-élevage. Mais la spécialisation de plus en plus prononcée des exploitations doit permettre d'envisager cette complémentarité à l'échelle des territoires par le biais d'échanges et d'entraides entre exploitations céréalières et d'élevage voisines. Ainsi, l'élevage doit pouvoir se maintenir même dans les zones les plus sèches du pays comme élément régulateur des paysages dans le cadre d'un développement territorial durable. L'amplification et l'extension territoriale des sécheresses annoncées pour le futur n'impliquent donc pas inexorablement l'uniformisation de grands territoires céréaliers pour peu que l'on y maintienne un nombre suffisant d'exploitations d'élevage interagissant spatialement avec les exploitations céréalières dans le cadre de systèmes fourragers à l'échelle territoriale adaptés à la sécheresse.

### Références bibliographiques

- Andrews A.C., Wright R., Simpson P.G., Jessop R., Reeves S., Wheeler J., 1991. Evaluation of new cultivars of triticale as dual-purpose forage and grain crops. *Australian Journal of Experimental Agriculture* 31, 769-775.
- Arnaud J.D., Le Gall A., Pflimlin A., 1993. Evolution des surfaces en légumineuses fourragères en France. *Fourrages* 134, 145-154.
- Baud A., 1998. En Franche-Comté, du foin de qualité par le séchage en grange. *Fourrages* 156, 451-458.
- Bergen W.G., Byrem T.M., Grant A.L., 1991. Ensiling characteristics of whole-crop small grains harvested at milk and dough stages. *Journal of Animal Science* 69, 1766-1791.
- Chénais F., Le Gall A., Legarto J., Kerouanton J., 1997. Place du maïs et de la prairie dans les systèmes fourragers laitiers. I- l'ensilage du maïs dans le système d'alimentation. *Fourrages* 150, 123-136.
- Dedieu B., Gibon A., Roux M., 1991. Notion d'état corporel des brebis et diagnostic des systèmes d'élevage ovin. *Etudes et Recherches sur les Systèmes Agraires et le Développement*, INRA, 48 p.
- Delaby L., Peccatte J.R., 2003. Valeur alimentaire des prairies d'association ray-grass / trèfle blanc utilisées entre 6 et 12 semaines de repousse. *Rencontres Recherches sur les Ruminants* 10, 389.
- Delagarde R., Peyraud J.L., Delaby L., 1999. Effet des quantités offertes sur l'ingestion de l'herbe d'automne chez la vache laitière au pâturage. *Rencontres Recherches sur les Ruminants* 6, 135-138.
- Dobbels M., Pottier E., Van Quackebeke E., 1996. Hivernage des brebis sous taillis et pâturage précoce de printemps. *Rencontres Recherches sur les Ruminants* 7, 123-125.
- Ducrocq H., 1996. Croissance des prairies de graminées selon la fertilisation azotée, l'intensité et la fréquence des défoliations. Thèse de Doctorat, 150p.
- Ducrocq H., Duru M., 1996. Effet de la conduite d'un pâturage tournant sur la digestibilité de l'herbe offerte. *Fourrages* 145, 91-104.
- Duru M., Calviere I., Tirilly V., 1995. Evolution de la digestibilité *in vitro* du dactyle et de la fétuque élevée au printemps. *Fourrages* 141, 63-74.
- Emile J.C., Jacobs Dias F., Al Rifaï M., Le Roy P., Faverdin P., 2008. Triticale and mixtures silages for feeding dairy cows. Proceedings of the 22nd General meeting of the European Grassland federation, Uppsala, Sweden, *Grassland Science in Europe*.
- Foucras J., 1998. Le séchage en grange dans les systèmes laitiers en Aveyron. *Fourrages* 156, 477-486.
- Gibon A., 1981. Pratiques des éleveurs et résultats d'élevage dans les Pyrénées Centrales. Thèse INA-PG, 106 p.
- Gransworthy P.C., Stokes D.T., 1993. The nutritive value of wheat and oat silages ensiled on three cutting dates. *Journal of Agriculture Science (Cambridge)* 121, 233-240.
- Grasset M., 1997. Place du maïs et de la prairie dans les systèmes fourragers laitiers. II- Aspects technico-économiques et exemples en Bretagne. *Fourrages* 150, 137-146.
- Huyghe C., Duru M., Peyraud J.L., Lherm M., Gensollen V., Bournoville R., Couteaudier Y., 2005. Prairies et cultures fourragères: au carrefour des logiques de production et des enjeux environnementaux. INRA Editions, 209 p.
- Jobim C.C., Emile J.C., 1999. Systèmes d'utilisation des céréales d'hiver pour l'alimentation des animaux au Brésil. *Fourrages* 159, 259-267.
- Julier B., Lila M., Huyghe C., Morris P., Allison G. and Robbins M., 2002. Effect of condensed tannin content on protein solubility in legume forages. *Grassland Science in Europe*, 7, 134-135.
- Kristensen V.F., 1992. The production and feeding of whole-crop cereals and legumes in Denmark. In: *Whole-Crop Cereals*, B.A. Stark and J.M. Wilkinson eds., pp 21-37.
- Lavoine M., Pérès M., 1993. Intérêt des associations fourragères graminées-luzerne pour économiser la fumure azotée. *Fourrages* 134, 205-210.

- Lecomte P., Parache P., 1993. L'association avoine-pois : une culture fourragère adaptée aux régions de semi-altitude et utilisable comme plante abri d'un semis fourrager. *Fourrages* 134, 211-216.
- Le Gall A., Corrot G., Campagnaud M., Garrigue G., 1993. L'enrubannage : une technique pour optimiser la récolte de la luzerne. *Fourrages* 134, 234-250.
- Le Gall A., Ledgarto J., Pflimlin A., 1997. Place du maïs dans les systèmes fourragers laitiers. III- Incidences sur l'environnement. *Fourrages* 150, 147-169.
- Le Gall A., Delattre J.C., Cabon G., 1998. Les céréales immatures et la paille : une assurance pour les systèmes fourragers. *Fourrages* 156, 557-572.
- Legarto J., 1991. Le sorgho grain ensilé en plante entière - Utilisation par les vaches laitières. *Comptes Rendus N° 91062 et 92081. Institut de l'Élevage ARPEB.*
- Legarto J., 2000. L'utilisation en ensilage plante entière des sorghos grains et sucriers : intérêts et limites pour les régions sèches. *Fourrages* 163, 323-338.
- Leaver J.D., Hill J., 1992. Feeding cattle on whole-crop cereals. In: *Whole-Crop Cereals*, B.A. Stark and J.M. Wilkinson eds.
- Lemaire G., 1999. Les flux de tissus foliaires au sein des peuplements prairiaux. *Éléments pour une conduite raisonnée du pâturage. Fourrages* 159, 203-222.
- Lemaire G., Charrier X., Hébert Y., 1996. Nitrogen uptake capacities of maize and sorghum crops in different nitrogen and water supply conditions. *Agronomie* 16, 231-246.
- Lemaire G., 1991. Précocité de croissance d'une prairie au printemps. Importance de la densité de talles. *Fourrages* 127, 313-320.
- Lemaire G., Durand J.L., Lila M., 1989. Effet de la sécheresse sur la digestibilité *in vitro*, la teneur en ADF et la teneur en azote de la luzerne. *Agronomie* 9, 841-848.
- Lemaire G., Salette J., 1982. The effects of temperature and fertilizer nitrogen on the spring growth of a tall fescue and cocksfoot. *Grass and Forage Science* 37, 191-198.
- Mac Cartney D.H., Vaage A.S., 1994. Comparative yield and feeding value of barley, oat and triticale silages. *Canadian Journal of Animal Science* 74, 91-96.
- Marion R., Humbert M., Mourier C., Pflimlin A., 1977.. Les conséquences de la sécheresse sur l'alimentation des ruminants. *Bulletin Technique d'Information*, 324-325.
- Marty J.R., Puech J., 1971. Efficience de l'eau en production fourragère. *Comptes Rendus de l'Académie d'Agriculture de France*, 57, 938-949.
- Nascimento W.G., Barrière Y., Charrier X., Huyghe C., Emile J.C., 2005. Evaluation of sweet grain sorghum silage for dairy cows as an alternative to irrigated maize silage. *Proceedings of the XXth International Grassland Congress, University College Dublin, Eire, 2 : 679.*
- O'Donovan M., Delaby L., Peyraud J.L., 2004. Effect of time of initial grazing date and subsequent stocking rate on pasture production and dairy performance. *Animal Research* 53, 489-502.
- Pflimlin A., 1997. Sécheresse: gérer les risques. Dossier spécial, Institut de l'Élevage. Mai 1997. 111 pages.
- Pflimlin A., 1998. Risques climatiques et sécurités fourragères selon les régions d'élevage. Cas de la sécheresse. *Fourrages* 156, 541-556.
- Pottier E., d'Hour P., Havet A., Pelletier P., 2001. Allongement de la saison de pâturage pour les troupeaux allaitants. *Fourrages* 167, 287-310.
- Pottier E., Sagot L., Van Quackebeke E., 1996. Pâturage hivernal de brebis dans le cadre d'une conduite extensive. *Rencontres Recherche sur les Ruminants* 3, 99.
- RICA, 2003. Situation financière et disparité des résultats économiques des exploitations. Commission des comptes de la Nation, session du 17-12-04, CCAN/04/024, 12p.
- Royo C., Pares D., 1996. Yield and quality of winter and spring triticales for forage and grain. *Grass and Forage Science* 51, 449-455.

- Soudais D., 1998. Le sorgho grain ensilage. Document des Journées d'été de la Confédération Paysanne FADEA, Saint Gaudens. Chambre d'Agriculture de la Haute-Garonne.
- Surault F., Hazard L., Emile J.C., 2001. Une approche qualitative des ray-grass anglais en stock sur pied au pâturage. *Fourrages* 168, 499-508.
- Straëbler M., Le Gall A., 1998. Luzerne sorgho et betterave. Trois cultures fourragères sécurisantes en conditions sèches ou froides. *Fourrages* 156, 573-587.
- Tetlow R.M., 1992. A decade of research into whole-crop cereals at Hurley. In: *Whole-Crop Cereals*, B.A. Stark and J.M. Wilkinson eds. pp 73.
- Thébault M., 1999. Gestion du pâturage d'été. *Revue Elevage Rentabilité* 355, 5-7.
- Veysset P., Bebin D., Lherm M., 2007. Impact de la sécheresse 2003 sur les résultats technico-économiques en élevages bovins allaitants charolais. Document interne, INRA Theix.

## **Améliorer la tolérance du maïs à la sécheresse ou la productivité du sorgho : enjeux et limites**

Claude Welcker<sup>1</sup>, Jean François Rami<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Laboratoire d'Ecophysiologie des Plantes sous Stress Environnementaux (LEPSE), UMR INRA – SupAgro, Institut de Biologie Intégrative des Plantes (IBIP - Bât 7), 34060 Montpellier

<sup>2</sup>CIRAD, 34398 Montpellier cedex

*avec l'aide de François Tardieu, Michael Dingkuhn, Jacques Chantereau et Jean Christophe Glaszmann*

Le changement global du climat est maintenant considéré certain et se traduira probablement par des températures plus élevées, une plus grande évapotranspiration, une distribution plus aléatoire des pluies et une incidence plus grande de la sécheresse (Amigues et al., 2006). Dans certains grands bassins de production, les sols et les réserves en eau se dégradent alors que la demande en eau pour satisfaire les besoins alimentaires de la population mondiale va croissante (Casman, 1999).

Le Sorgho est généralement considéré comme tolérant à la sécheresse, au contraire du maïs qui consomme la moitié de l'eau d'irrigation en France. Cependant, les deux espèces montrent une efficacité intrinsèque d'utilisation de l'eau semblable, et exceptionnellement haute, qui leur permet de produire davantage de biomasse par unité d'eau transpirée que la plupart des autres espèces grâce à leur métabolisme en C4. Les grandes quantités d'eau d'irrigation utilisées sur maïs ne sont donc pas liées à une plus forte demande en eau que le sorgho, mais à sa sensibilité au déficit hydrique notamment lors de la formation des grains. Est-ce que, pour autant, il faut renoncer à son utilisation au profit de celle du sorgho dans les régions à risques de déficit hydrique ?

La presse rapporte depuis une dizaine d'années des expériences de transferts de gène qui montrent qu'il est possible d'améliorer le comportement de plantes soumises au déficit hydrique (Xu et al., 1996 ; Garg et al., 2002 ; Heard et al., 2005). Cependant, ces expériences sont le plus souvent réalisées dans des conditions éloignées de celles subies par les plantes en champ et elles n'ont débouché sur aucune variété commerciale jusqu'à présent (Campos et al., 2004). Une variété est actuellement en cours d'homologation par Monsanto, mais les résultats sur lesquels cette certification est fondée sont à notre avis peu convaincants (Nelson et al., 2007). Inversement, des travaux moins médiatisés ont permis l'obtention de génotypes tolérants qui sont actuellement utilisés par les agriculteurs notamment au Mexique et en Afrique de l'Est pour le maïs (Ribaut et al., 2002 ; Bruce et al., 2007), en Inde et en Australie pour le sorgho (Hash et al., 2003 ; Borrell et al., 2004). Il importe donc de faire le point sur les progrès déjà réalisés et sur les voies possibles d'amélioration, et d'évaluer la complémentarité entre les deux espèces soit pour créer des variétés des deux espèces adaptées au déficit hydrique, soit pour améliorer la productivité du sorgho sans perdre ses caractères, réels ou supposés, de tolérance.

Chez les deux espèces, on distingue classiquement les phases de déficit pré-floral, qui intervient avant et au moment de la floraison et le déficit post-floral, qui intervient au cours du remplissage du grain. Parmi les symptômes d'un stress post-floral, on retrouve une sénescence prématurée des feuilles et de la plante, une verse de fin de cycle, et la réduction de la taille des grains, le déficit pré-floral aboutissant quant à lui à une réduction du nombre de grains et un allongement du cycle. La plus grande partie des travaux de recherche sur la sécheresse ont concerné jusqu'ici les phases florales et post florales, si bien que des indications suggèrent que les phases précédant la floraison pourraient être devenues aussi limitantes que les phases ultérieures (Bruce et al. 2002).

## 1- Des marges de progrès génétique pour la tolérance à la sécheresse du maïs

**La sélection a changé la tolérance du maïs au déficit hydrique, mais pas encore à la mesure des annonces médiatiques; des marges de progrès importantes existent mais il serait déraisonnable de penser qu'il y ait une solution unique face à la diversité des situations agronomiques.**

Dans les régions tempérées, les comparaisons de variétés de différentes générations de sélection montrent que les génotypes récents ont généralement une meilleure production en conditions de sécheresse que les génotypes anciens ou du moins que l'augmentation générale du rendement observée en régions tempérées ne s'est pas faite au détriment de la tolérance au déficit hydrique (Duvick et al., 1999 ; Campos et al., 2004). Des variétés de maïs tolérantes à la sécheresse ont été obtenues par le CIMMYT pour les régions tropicales par sélection ciblée à partir de populations locales. Ces génotypes ne sont pas utilisables en France, mais un travail est en cours pour transférer les allèles d'intérêt dans du matériel européen (INRA). On peut donc penser trouver dans les maïs tropicaux traditionnels régulièrement soumis à des conditions sèches des sources nouvelles d'adaptation. Les Téosinte, espèce dont dérive le maïs, ou les *Tripsacum* constituent également des ressources intéressantes pour l'amélioration du maïs (Barrière et al., 2006).

Les scénarios de sécheresse sont multiples, quant à leur calendrier et leur sévérité. La tolérance à la sécheresse ne peut pas se définir par des critères universels pour tous les scénarios. Un caractère donné peut avoir des effets positifs dans un scénario, avoir peu d'effet dans un autre et même être néfaste dans un troisième (Chapman et al., 2003). Par exemple, le maintien du nombre de grains obtenu dans les variétés améliorées de maïs du CIMMYT est généralement une stratégie utile pour des déficits moyens. Elle peut se révéler négative en cas de très fort déficit hydrique car l'acquisition des assimilats par la photosynthèse n'est pas suffisante par rapport à la demande des grains. On risque alors d'obtenir un grand nombre de grains de très faible qualité. De même, le maintien de la transpiration par amélioration de l'efficacité du système racinaire n'est pas une stratégie "gratuite", et n'a un intérêt que dans certaines conditions pédologiques notamment quand elle permet à la plante d'accéder à des couches profondes ou à une nappe d'eau (Tuberosa et al., 2002, Edmeades et al., 1999). Il n'y a donc pas de solution unique. La tolérance à la sécheresse peut être vue comme une optimisation de la photosynthèse, de la croissance et du développement des plantes pour maximiser la production de biomasse avec une quantité d'eau (Tardieu, 2003). Il faut au sélectionneur bien appréhender les conditions dans lesquelles seront cultivées ses futures variétés pour rechercher des caractères adéquats et construire une palette de variétés dans laquelle les agriculteurs feront leur choix en fonction de leur système de culture et des risques qu'ils sont prêts à prendre.

On peut opter pour des stratégies « conservatrices », qui échangent une limitation du potentiel de rendement contre une réalisation de rendement en conditions sèches. L'esquive consiste à réduire la durée du cycle de la plante pour l'adapter au scénario climatique attendu aux dépens du rayonnement intercepté. La réduction de la conductance stomatique et de la croissance foliaire permet de conserver l'eau du sol mais aux dépens de la photosynthèse et de la transpiration.

Le maintien de la croissance foliaire permet d'augmenter la photosynthèse cumulée, mais il augmente aussi la transpiration. Cependant, il évite aussi l'évaporation directe du sol, si bien qu'une forte croissance foliaire est généralement retenue comme un caractère favorable pour la tolérance au déficit hydrique avec des effets généralement positifs sur le rendement (Zhang et al., 1999, Condon et al., 2004). C'est la stratégie « dépensière », elle favorise le rendement potentiel en conditions modérément sèches, tout en augmentant le risque d'une perte totale de rendement en conditions extrêmes (Tardieu, 2003). Une variabilité génétique importante existe chez le maïs pour le maintien de la croissance foliaire en déficit hydrique et la compréhension des mécanismes génétiques en jeu ouvre des pistes nouvelles pour la sélection (Reymond et al., 2003 ; Welcker et al., 2007).

## 2- La tolérance à la sécheresse du sorgho

**Le sorgho est généralement reconnu comme une plante tolérante à la sécheresse, mais à productivité faible.**

Malgré sa réputation, le sorgho exprime une sensibilité au déficit hydrique. Des différences pouvant aller jusqu'à 30 q/ha peuvent être observées entre cultures irriguées et non irriguées au cours d'années sèches en France. Cependant, des capacités de tolérance supérieures à celle du maïs sont attribuées à un enracinement efficace qui lui permet de maintenir son activité photosynthétique pour une gamme étendue d'états hydriques du sol. Une des explications de la différence de tolérance entre maïs et sorgho est attribuée à une capacité maintenue du prélèvement d'azote du sorgho dans le sol en condition sèche, qui n'est à l'heure actuelle, pas totalement expliquée. L'architecture du système racinaire ainsi que des propriétés intrinsèques d'absorption des racines pourraient en être la cause (Lemaire et al., 2005).

Des géotypes montrant un certain niveau de tolérance à des déficits pré- ou post-floraison ont pu être identifiés. Une importante partie des travaux de recherche, tant d'un point de vue de la sélection que du point de vue physiologique ou génétique a porté sur la résistance au déficit post-floral, également appelé le caractère « stay-green » (Tao et al., 2000 ; Xu et al., 2000 ; Haussmann et al., 2003 ; Borrell et al., 2003). Ce caractère permet de conserver une activité photosynthétique prolongée en fin de cycle.

En conditions tempérées, et en conditions hydriques peu ou pas limitantes, le sorgho montre une productivité inférieure au maïs. L'amélioration génétique du sorgho en Europe a essentiellement consisté en une sélection hybride s'appuyant sur l'utilisation d'un système de stérilité mâle cytoplasmique (Stephens et al., 1954). Cette contrainte a probablement limité les capacités d'exploration de l'aptitude à la combinaison chez le sorgho et la définition de groupes hétérotiques performants. Par ailleurs, la sensibilité à la photopériode, caractère omniprésent dans le matériel tropical, a fortement limité l'utilisation de ces ressources en zone tempérée. Le programme de conversion américain (TAES/USDA-ARS Sorghum Conversion Program) initié en 1963 et visant à éliminer par backcross la sensibilité à la photopériode et à réduire la taille de la plante a permis de générer du matériel qui est à l'origine de l'essentiel de la sélection dans le monde. Néanmoins, le large potentiel de diversité de l'espèce est probablement loin d'avoir été exploré. Enfin, des travaux récents portant sur du matériel tropical pourraient indiquer une limite intrinsèque à la productivité du sorgho. D'une part, le principal facteur d'allongement du cycle serait lié à la photosensibilité (Clerget et al., 2007) difficilement exploitable en zone tempérée. D'autre part, la durée d'élaboration de la panicule ne variant plus au delà d'une certaine durée de cycle, avec un rythme lent de production des organes fructifères, il apparaît une limite à la relation positive entre la durée de cycle et le rendement (Clerget et al., 2008). Il reste cependant envisageable de mieux exploiter la redistribution des produits de la photosynthèse entre parties végétatives et fructifères et l'efficacité photosynthétiques par la sélection de matériels tardifs, raccourcis et stay green (Kouressy et al., 2008).

### Conclusion

La proximité phylogénétique du sorgho et du maïs se traduit par une forte conservation des deux génomes (Dufour et al., 1996). Celle-ci s'observe au niveau global par la composition et l'ordre des gènes (synténie) observés dans de grands fragments de chromosomes et au niveau des gènes, par une forte homologie de séquence entre les deux espèces. En pratique, cette proximité permet d'accélérer la découverte et la compréhension des mécanismes génétiques impliqués dans l'adaptation à la sécheresse par des approches de génomique comparative. Le séquençage complet du génome du sorgho est terminé depuis la fin de l'année 2007 et celui du maïs est prévu en 2008, ce qui ouvre des perspectives sans précédent pour l'identification de gènes d'intérêt chez le sorgho et les possibilités de

transfert de cette information au maïs. Cette stratégie reste cependant risquée tant que les réponses respectives de ces deux espèces au déficit hydrique ne sont pas mieux comprises.

Chez le maïs, des progrès ont été faits sur la compréhension des effets du déficit hydrique sur le fonctionnement des plantes aux échelles moléculaires et plante entière. De nombreuses études montrent qu'il existe une variabilité génétique importante sur des mécanismes impliqués dans la tolérance. Des gènes et des QTL (régions du génome contrôlant l'hérédité de caractère quantitatif, complexe) ont été identifiés (voir Tuberosa, Ribaut et Welcker), et sont actuellement transférés dans du matériel agronomique d'intérêt. La combinaison de la génétique quantitative et de la modélisation permet de prévoir quelles combinaisons d'allèles seraient favorables dans différents scénarios climatiques et de guider ainsi la sélection (Hammer et al., 2005 ; Tardieu, 2003). Des marges importantes de progrès existent donc, et on peut supposer qu'elles se traduiront par la mise à disposition de génotypes tolérants dans les prochaines années.

Dans certaines régions de production, la culture du sorgho pourrait se développer. Elle repose toutefois, pour être attractive, sur l'amélioration de la productivité de cette espèce dans les conditions européennes et entre autres sur des efforts de recherches sur la valorisation du photopériodisme, l'adaptation climatique et l'exploitation de l'hétérosis.

### Références bibliographiques

- Amigues J.P., Debaeke P., Itier B., Lemaire G., Seguin B., Tardieu F., Thomas A., 2006. Sécheresse et agriculture. Réduire la vulnérabilité de l'agriculture à un risque accru de manque d'eau. Expertise scientifique collective, INRA (Paris) 72 p.
- Barrière Y., Alber D., Dolstra D., Lapierre C., Motto M., Ordas A., Van Waes J., Vlaswinkel L., Welcker C., Monod J.P., 2006. Past and prospects of forage maize breeding in Europe. II. History, germplasm evolution and correlative agronomic changes. *Maydica* 51, 435-449
- Borrell A., Hammer G., Oosterom E., van Oosterom E., 2003. Stay-green: a consequence of the balance between supply and demand for nitrogen during grain filling? *Annals of Applied Biology* 138, 91-95.
- Borrell, A. et al., 2004. Discovering stay-green drought tolerance genes in sorghum: A multidisciplinary approach. In *New directions for a diverse planet*. Proceedings of the 4th International Crop Science Congress, Brisbane, Australia, 26 Sep – 1 Oct 2004.
- Boyer J.S., 1970. Leaf enlargement and metabolic rates in corn, bean and sunflower at various leaf water potential. *Plant Physiology* 46, 233-235.
- Bruce W.B., Edmeades G.O., Barker T.C., 2002. Molecular and physiological approaches to maize improvement for drought tolerance. *Journal of Experimental Botany* 53, 13-25.
- Campos H., Cooper M., Habben J.E., Edmeades G.O., Schussler J.R., 2004. Improving drought tolerance in maize: a view from industry. *Field Crops Research* 90, 19-34.
- Chapman S.C., Cooper M., Podlich D., Hammer G.L., 2003. Evaluating plant breeding strategies by simulating gene action and dryland environment effects. *Agronomy Journal* 95, 99-113.
- Claassen M.M., Shaw R.H., 1970. Water deficit effects on corn. II. Grain components. *Agronomy Journal* 62, 652-655.
- Condon A.G., Richards R.A., Rebetzke G.J., Farquhar G.D., 2004. Breeding for high water-use efficiency. *Journal of Experimental Botany* 55, 2447-2460
- Clerget B., Rattunde H.F.W., Dagnoko S., Chantereau J., 2007. An easy way to assess photoperiod sensitivity in sorghum: Relationships of the vegetative-phase duration and photoperiod sensitivity. *SAT eJournal* 3.
- Clerget B., Dingkuhn M., Goze E., Rattunde H.F.W., Ney B., 2008. Variability of phyllochron, plastochron and rate of increase in height in photoperiod-sensitive sorghum varieties. *Annals of Botany* 101, 579.

- Dufour P., Grivet L., D'Hont A., Deu M., Trouche G., Glaszmann J. C., Hamon P., 1996. Comparative genetic mapping between duplicated segments on maize chromosomes 3 and 8 and homeologous regions in sorghum and sugarcane. *Theoretical and Applied Genetics* 92, 1024-1030.
- Duvick D.N., Cassman K.G., 1999. Post-green revolution trends in yield potential of temperate maize in the North-Central United States. *Crop Science* 39, 1622-1630.
- Edmeades G.O., Bolanos J., Chapman S.C., Lafitte H.R., Banziger M., 1999. Selection improves drought tolerance in tropical maize populations: I. Gains in biomass, grain yield, and harvest index. *Crop Science* 39, 1306-1315.
- Hammer G., Chapman S., van Oosterom E., Podlich D. (2005). Trait physiology and crop modelling as a framework to link phenotypic complexity to underlying genetic systems. *Australian Journal of Agricultural Research* 56, 947-960.
- Hausmann B., Mahalakshmi V., Reddy B., Seetharama N., Hash C., Geiger H., 2003. QTL mapping of stay-green in two sorghum recombinant inbred populations. *Theoretical and Applied Genetics* 106, 133-142.
- Hash C., Bhasker Raj A., Lindup S., Sharma A., Beniwal C., Folkertsma R., Mahalakshmi V., Zerbini E., Blummel M., 2003. Opportunities for marker-assisted selection (MAS) to improve the feed quality of crop residues in pearl millet and sorghum. *Field Crops Research* 84, 79-88.
- Heard J., Adam T.R., Anstom G., Bensen R., Nelson D., Arner D., Ratcliffe O., Creelman R., Doston S., 2005. Increasing yield stability of corn under drought conditions: new insights from transgenic studies. *Interdrought II, abstract book., Univ. La Sapienza, Rome*
- Hoisington D., Khairallah M., Reeves T., Ribaut J.M., Skovmand B., Taba S., Warburton M., 1999. Plant genetic resources: what can they contribute toward increased crop productivity? *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA* 96, 5937-5943.
- Kouressy M., Dingkuhn M., Vaxsmann M., Clement-Vidal A., Chantreau J., 2008. Potential contribution of dwarf and leaf longevity traits to yield improvement in photoperiod sensitive sorghum. *European Journal of Agronomy* 28, 195-209.
- Lemaire G., Recous S., Mary B., 2005. Managing residues and nitrogen in intensive cropping systems. New understanding for efficient recovery by crops. *Proceeding of the 4<sup>th</sup> International Crop Science Congress. Brisbane.*
- Nelson D.E., Repetti P.P., Adams T.R., Creelman R.A., Wu J., Warner D.C., Anstrom D.C., Bensen R.J., Castiglioni P.P., Donnarummo M.G., Hinchey B.S., Kumimoto R.W., Maszle D.R., Canales R.D., Krolkowski K.A., Dotson S.B., 2007. Plant nuclear factor Y (NF-Y) B subunits confer drought tolerance and lead to improved corn yields on water-limited acres. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA* 104 16450-16455.
- Reymond M., Muller B., Leonardi A., Charcosset A., Tardieu F. (2003). Combining quantitative trait loci analysis and an ecophysiological model to analyse the genetic variability of the responses of leaf growth to temperature and water deficit. *Plant Physiology* 131, 664-675
- Ribaut J.M., Banziger M., Betran J.A., Jiang C., Edmeades G.O., Dreher K., Hoisington D.A., 2002. Use of molecular markers in plant breeding: drought tolerance improvement in tropical maize. In: *Quantitative Genetics, Genomics, and Plant Breeding*, M.S. Kang (ed). CABI Publishing, Wallingford, UK, pp. 85-99.
- Ribaut J.M., Hoisington D.A., Deutsch J.A., Jiang C., Gonzalez-de-Leon D., 1996. Identification of quantitative trait loci under drought conditions in tropical maize. 1. Flowering parameters and the anthesis-silking interval. *Theoretical and Applied Genetics* 92, 905-914.
- Sinclair T.R., Purcell L.C., Sneller C.H., 2004. Crop transformation and the challenge to increase yield potential. *Trends in Plant Science* 9, 70-75.
- Stephens J.C., Holland R.F., 1954. Cytoplasmic male-sterility for hybrid sorghum seed production. *Agronomy Journal* 46, 20-23.
- Tao Y., Henzell R., Jordan D., Butler D., Kelly A., McIntyre C., 2000. Identification of genomic regions associated with stay green in sorghum by testing RILs in multiple environments. *Theoretical and Applied Genetics* 100, 1225-1232.

- Tardieu F., 2003. Virtual plants: modelling as a tool for the genomics of tolerance to water deficit. *Trends in Plant Science* 8, 9-14.
- Tuberosa R., Salvi S., Sanguineti M.C., Landi P., Maccaferri M., Conti S., 2002. Mapping QTLs regulating morpho-physiological traits and yield: case studies, shortcomings and perspectives in drought-stressed maize. *Annals of Botany*, 89 n° spec, 941-963.
- Wang W., Vinocur B., Altman A., 2003. Plant responses to drought, salinity and extreme temperatures: towards genetic engineering for stress tolerance. *Planta* 218, 1-14.
- Welcker C., Boussuge B., Bencivenni C., Ribaut M., Tardieu F., 2007. Are source and sinks strenghts genetically linked in maize plants subjected to water deficit ? A QTL study of the responses of leaf growth and of the Anthesis-Silking Interval to water deficit. *Journal of Experimental Botany* 58, 339-349
- Xu D., Duan X., Wang B., Hong B., Ho T., Wu R., 1996. Expression of a late embryogenesis abundant protein gene, HVA1, from barley confers tolerance to water deficit and salt stress in transgenic rice. *Plant Physiology* 110, 249-257.
- Xu W., Subudhi P.K., Crasta O.R., Rosenow D.T., Mullet J.E., Nguyen H.T., 2000. Molecular mapping of QTLs conferring stay-green in grain sorghum (*Sorghum bicolor* L. Moench). *Genome* 43, 461-469.
- Zhang J., Nguyen H.T., Blum A., 1999. Genetic analysis of osmotic adjustment in crop plants. *Journal of Experimental Botany* 50, 291-302.

## Qualité des récoltes et sécheresse

Eugène Triboi, Anne-Marie Triboi-Blondel

INRA Agronomie - APAC Clermont - Ferrand

### Résumé

La sécheresse est un facteur majeur de la production végétale car elle détermine non seulement le rendement mais aussi sa qualité. Si l'effet sur le rendement est généralement négatif, car il dépend essentiellement de la quantité totale de carbone assimilé, l'effet sur la qualité est plus complexe. En effet la masse et la composition d'un organe récolté dépend d'une part de la disponibilité en assimilats C et N au niveau de l'organe, et d'autre part du fonctionnement de l'organe, déterminé génétiquement mais modulé par l'environnement. Après une discussion sur les critères de qualité, seront analysés successivement les effets de la sécheresse sur la masse de l'organe récolté et sur sa composition. La composition biochimique est analysée à trois niveaux : les composants majeurs (les hydrates de carbone (glucides), les protéines et les lipides), leur composition, et les composants "quantitativement mineurs" mais importants au point de vue santé ou technologique (micro-nutriments et macro-éléments, composés complexes issus du métabolisme secondaire, composés toxiques, etc.). Des exemples sur les plantes à grain(e)s, les arbres fruitiers et la vigne sont donnés.

### 1. La notion de qualité

La notion de qualité du produit comporte de multiples interprétations, dont certaines sont subjectives et culturelles, dépendant du produit et de son usage. Aussi elle nécessite d'être précisée. En général, on peut considérer que la qualité d'un produit est une notion complexe, résultant d'une évaluation effectuée par l'utilisateur d'une ou plusieurs caractéristiques ou propriétés du produit. Ainsi, un même produit peut être évalué comme "excellent" par un utilisateur ou pour une utilisation donnée et sans intérêt par un autre utilisateur ou pour une autre utilisation, car les critères d'évaluation ne sont pas les mêmes ou la valeur quantitative ou qualitative du caractère n'a pas la même signification. Par exemple, une teneur en protéines élevée est souhaitable pour le blé utilisé en boulangerie, et une teneur faible pour l'utilisation en biscuiterie / pâtisserie. De même, la couleur, la taille d'un fruit et sa durée de garde pourraient être des critères importants pour la commercialisation, et la composition pour la consommation en frais. Il en résulte donc que la qualité ou la valeur d'utilisation est basée sur des caractéristiques objectives, faisant référence aux "propriétés et à la composition du produit" d'une part, mais aussi subjectives faisant appel au "comportement de l'utilisateur" mettant en jeu un aspect culturel, éthique. Ceci nous conduit à nous interroger sur le mode de production et de gestion de la "qualité", qui conceptuellement fait appel à la notion de filière, avec une double approche, "de la fourche à la fourchette" et "de la fourchette à la fourche". Cette chaîne étant une activité économique, cela pose des problèmes d'optimisation économique, qui souvent sont des compromis par rapport à l'utilisation finale. Par exemple, malgré le fait que certains fruits comme la pêche ou la poire, présentent les meilleures propriétés organoleptiques à "maturité", le plus souvent, ils sont récoltés à un stade de développement "immature" auquel ils possèdent des propriétés mécaniques permettant le transport et le stockage.

Dans notre analyse, en souhaitant être le plus objectif possible, nous analyserons l'impact de l'alimentation hydrique sur la qualité du produit à partir de ses propriétés physiques et de sa composition biochimique, caractéristiques déterminant en grande partie la valeur d'utilisation vue principalement du point de vue du consommateur.

## 2. Les critères de qualité.

Selon les espèces et leur utilisation, plusieurs classes de critères pourraient être identifiées:

- Critères caractérisant *la morphologie et les propriétés physiques* d'un organe : masse, volume, forme, couleur, dureté, etc qui conditionnent son utilisation et / ou le comportement du consommateur (argument de vente). Ceci est vrai pour les fruits et les légumes mais aussi pour les grain(e)s. Par exemple, le taux d'extraction de la farine ou la valeur meunière dépend en grande partie de la masse individuelle du grain car le rapport farine (contenue essentiellement dans le compartiment albumen) / son (composé des germes et téguments) augmente avec la masse du grain.
- Critères caractérisant *la composition biochimique primaire* du produit récolté.

Deux niveaux d'analyse pourraient être identifiés.

*Le premier* concerne les hydrates de carbone (glucides), les protéines et les lipides, considérés comme composants majeurs, car leur somme rapportée par unité de surface représente le rendement. Il en résulte que le déterminisme de la composition primaire est étroitement lié au déterminisme de la productivité. A ces trois composants il faudrait ajouter l'eau, critère important non seulement pour les produits consommés en "frais", les fruits et les légumes où l'eau est un "signe de fraîcheur", mais aussi pour les graines, car elle conditionne leur stockage. Ainsi, selon les espèces, *les teneurs en hydrates de carbone, protéines, lipides et eau* représentent des critères généraux de qualité. Ceci est valable pour les utilisations faisant appel à la plante entière, donc à la biomasse totale (exemple la production fourragère), ou à des organes de la plante (grain(e), fruit, racine, feuille, tige).

*Le deuxième* concerne *la composition des ces trois composants majeurs*. En effet, ces composants ne sont pas homogènes ni en composition ni en structure. Cette hétérogénéité leur confère des propriétés fonctionnelles spécifiques et par conséquent des utilisations spécifiques. Elle pourrait être souhaitable pour la diversification des utilisations, mais, si elle est aléatoire, elle pose des problèmes aux utilisateurs.

Ainsi, pour les deux niveaux de composition, *la stabilité* est un critère important de valorisation. Notons aussi que pour l'utilisation industrielle, des *critères technologiques* ont été élaborés pour évaluer les propriétés fonctionnelles de la matière première.

- Critères caractérisant *la composition en composants "quantitativement mineurs "* mais importants pour le processus technologique et "in fine" pour le consommateur. Il s'agit le plus souvent des *"composants à valeur santé"* classés comme micro-nutriments, qui sont soit des micro - ou macro-éléments (S, Fe, Mg, Zn, ...), soit des composés complexes, issus du métabolisme secondaire, comme les caroténoïdes, les vitamines, etc. possédant des propriétés anti-oxydantes, ou des arômes, importants dans la technologie et la "consommation" du produit (pain, vin, fruit..).
- Notons aussi que dans certaines conditions, suite à des phénomènes de pollution du sol par voie atmosphérique (ex. dioxines, éléments radioactifs..), à des épandages des produits contenant des *éléments toxiques*, comme les métaux lourds, ou à l'utilisation incorrecte des pesticides, les plantes peuvent contenir des composants "toxiques". Ces aspects ne seront pas pris en compte dans cette synthèse. Cependant, nous signalerons les aspects phytosanitaires de type "mycotoxines" qui semblent plus liés au climat qu'aux conditions édaphiques.

## 3. L'élaboration de la masse et de la composition primaire: schéma conceptuel.

Pour analyser l'élaboration du rendement (rendement potentiel et potentiel du rendement) et de sa composition primaire (teneur en protéines, huile et amidon, etc.), on utilise *le concept source – puits*, appliqué à la production et l'utilisation des assimilats carbonés et azotés: entre un organe puits recevant des assimilats C, N, ... et un organe source produisant et exportant des assimilats C, N il existe une

interaction conduisant à un contrôle par la source (la disponibilité en assimilats) du fonctionnement du puits (élaboration des structures, taille et composition) et une rétroaction du puits sur le fonctionnement de la source (Triboi et Triboi-Blondel, 2002). Le niveau d'analyse le plus adapté pour comprendre les variations de la biomasse totale et / ou du rendement utile (graines, fruits...) est *le peuplement ou la plante entière*. La production d'assimilats C et N représentant la source est fonction d'une part du climat et d'autre part de la structure de la plante et/ou du peuplement, dépendant en grande partie du système de culture, y compris l'espèce et / ou la variété utilisée. La disponibilité au niveau du puits, représentée par un organe en croissance (graine, fruit, feuille...) est effectuée selon **le nombre de puits** par plante ou par peuplement (Fig. 1 A). L'utilisation des assimilats disponibles par le puits - organe en croissance recevant les assimilats (graine, fruit, feuille, racine ...) - sera fonction de ses propriétés intrinsèques, telles que le développement et la synthèse et l'accumulation des différents composants spécifiques à l'espèce et au cultivar, contrôlées en grande partie génétiquement (Fig. 1 B). Ainsi, il s'agit d'analyser les relations existantes entre la source de carbone (photosynthèse), de l'azote (absorption depuis le sol et remobilisation) et le fonctionnement du puits.

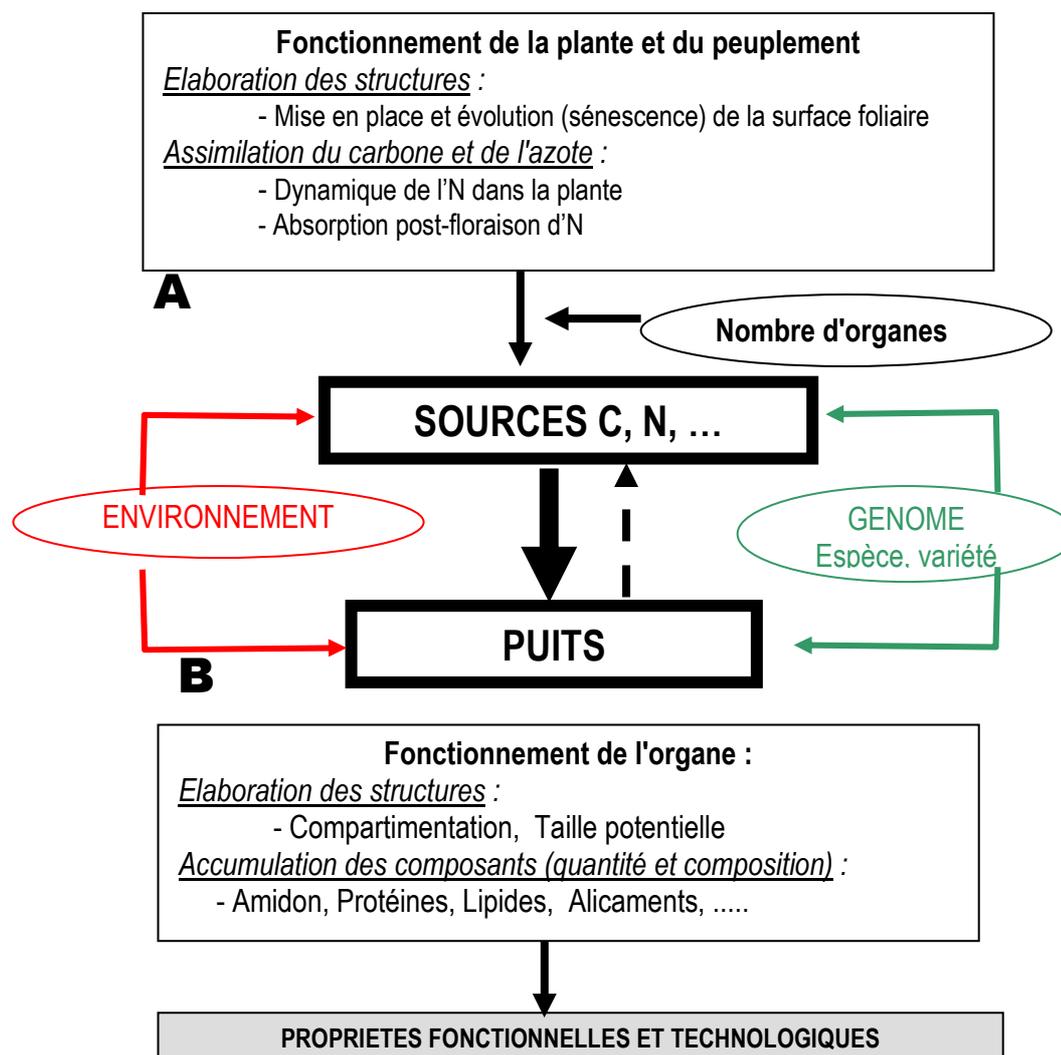
En effet, les assimilats azotés disponibles au niveau du puits sont utilisés principalement pour la synthèse des protéines fonctionnelles ou /et de réserve, qui sont ensuite accumulées comme réserve dans l'organe récolté. En revanche, la réserve en assimilats carbonés peut se faire sous formes multiples, soluble de type glucose, fructose, saccharose (betterave sucrière) ou polymérisée soluble de type fructanes (les graminées), inuline (topinambour, artichaut) ou insoluble, de type amidon, comme dans les grains de céréales ou dans la pomme de terre. Hormis ces formes de stockage, notons aussi le stockage sous forme d'huile, le 3<sup>ème</sup> composant majeur des plantes, caractéristique des oléagineux, qui transforment le glucose et le saccharose en triacylglycérols, communément nommés "huile ou graisse végétale".

Dans cette démarche, **le puits** est caractérisé par l'analyse de la courbe de croissance et d'accumulation de ses composants (protéines, huile, amidon) Ceci permet de calculer deux variables, la vitesse ou flux de matière sèche ou de l'azote vers la graine ( $V_{ms}$ ,  $V_N$ ) et la durée de remplissage ( $D_{ms}$ ,  $D_N$ ), l'unité de temps étant soit le degré-jour soit le jour (Triboi et Triboi-Blondel, 2001, Sofield et al, 1977). La source ou la production d'assimilats carbonés et azotés, est analysée d'une part par la mesure des échanges gazeux au niveau du peuplement ou de la plante et d'autre part par la dynamique de production de biomasse et d'absorption de l'azote. Ainsi, le schéma conceptuel de la Figure 1 permet de séparer effets génétiques (espèces, cultivars: potentiel du rendement) et facteurs environnementaux (rendement potentiel, eau, température, etc.) et de mettre en évidence les processus responsables des variations quantitatives et qualitatives et leur contrôle:

- le fonctionnement de la plante : absorption N, production d'assimilats carbonés (A)
- les propriétés intrinsèques de l'organe - puits: développement, compartimentation, potentiel métabolique et de stockage - taille, polymorphisme biochimique (B)
- l'accumulation des composants majeurs carbonés, l'amidon et l'huile (B).

En ce qui concerne le **déterminisme de la composition secondaire** (composition de l'amidon, des protéines, des lipides), notons seulement que, sur un fond génétique déterminant les potentialités, existe une variation plus ou moins importante expliquée en grande partie par la quantité totale de la composante accumulée dans le puits. Ainsi, dans une graine, le rapport amylose / amylopectine, protéines métaboliques / protéines de réserves, ratio entre différents acides gras, va dépendre de la quantité totale déposée dans la graine, respectivement de l'amidon, des protéines et des lipides.

Enfin, **le métabolisme secondaire** et ainsi l'origine et le devenir des produits issus de ce métabolisme commence à être mieux connu. Hormis le génotype, des facteurs du climat comme le rayonnement et les stress thermiques et hydriques sont souvent impliqués dans le déterminisme des composants du métabolisme secondaire.



**Figure 1.** Déterminisme génétiques et environnementaux de l'élaboration des structures, de la composition et des propriétés fonctionnelles d'un organe. A = Déterminisme des sources C, N par organe. B= Fonctionnement de l'organe puits

#### 4. Aspects globaux concernant la relation alimentation en eau - composition / qualité des produits.

Comme pour tous les stress, l'effet d'une sécheresse est fonction du *stade de développement* de la plante auquel elle intervient et de sa durée. Ainsi, la sécheresse agit d'une part sur la source, production des assimilats C et N, et d'autre part sur *le nombre de puits* de stockage. D'autre part, elle intervient souvent dans des périodes avec des températures élevées, d'où la nécessité de mieux comprendre l'interaction entre ces deux facteurs climatiques.

- Au niveau d'un organe, l'effet de la sécheresse est fonction du **stade du développement de l'organe** : la taille de l'organe est d'autant plus réduite que la sécheresse intervient précocement durant la division et l'élongation cellulaire. Dans la période végétative, si la sécheresse est très intense, le développement peut être stoppé par l'arrêt d'émission des nouvelles feuilles et des ramifications. Ceci induit des modifications importantes au niveau de la structure d'une plante et

d'un peuplement (nombre et taille des organes) et modifie profondément l'interception et la production des assimilats C.

- Au niveau d'une feuille - source de C, la diminution de la transpiration induit une fermeture stomatique qui augmente la température de l'organe d'une part et diminue l'assimilation nette du carbone d'autre part. Le rendement étant principalement un cumul des quantités de carbone assimilé quotidiennement, il en résulte une étroite relation entre la durée du fonctionnement en jours de la plante, contrôlée notamment par la température, et le rendement potentiel. Ainsi, au niveau de la production du carbone, l'effet négatif d'une sécheresse serait fonction surtout de sa durée en jours, plus précisément de la durée relative de la période de sécheresse par rapport à la durée totale du fonctionnement de la plante (Triboi et Triboi-Blondel, 2002).
- En ce qui concerne l'azote, soulignons que même si le métabolisme azoté est le premier touché par une sécheresse (Triboi-Blondel, 1978) par diminution de l'activité de la nitrate réductase, les conséquences visibles sont plus tardives, d'une part au niveau de la structure du peuplement (nombre et taille des organes) et d'autre part au niveau du fonctionnement, par la diminution de la production des assimilats carbonés. Ceci conduit à une baisse de la production de biomasse totale et éventuellement à l'augmentation de la teneur en azote.
- Au niveau de la plante, différents travaux ont montré que certaines phases de développement sont très sensibles à la sécheresse. Ainsi, la période reproductive, notamment la méiose, est une des plus sensibles car elle conduit souvent à des phénomènes de **stérilité des organes reproductifs**, et donc une diminution du nombre de puits de stockage. Le même effet est enregistré suite à une sécheresse lors de la fécondation, qui induit un phénomène *d'avortement des organes* (Fonseca et Westgate, 2005).

## 5. Structure et développement des organes de stockage

Pour comprendre l'effet d'un stress comme la sécheresse et les résultats "apparemment contradictoires" enregistrés souvent suite à des interactions avec d'autres facteurs comme la température ou le rayonnement, et ainsi de prévoir le comportement des différentes espèces, il est nécessaire de faire un bref rappel sur la structure et le développement des organes de stockage.

Selon l'espèce, le produit récolté est composé soit d'organes végétatifs, feuilles, tiges ou racines, soit d'organes reproducteurs. Nous n'insistons pas sur les organes végétatifs, dont la structure et les fonctions nous paraissent évidentes. En revanche, quelques précisions sont nécessaires pour les organes reproducteurs chez lesquels on utilise soit la semence ou la graine, soit le fruit, en sachant qu'une semence provient d'un ovule et qu'un fruit représente l'ovaire de la fleur. Ainsi, chez le colza et différentes légumineuses, le fruit est représenté par la silique ou la gousse et les parties utilisables sont les graines contenues dans le fruit. Par contre, chez les fruits charnus comme la pêche, l'ovule donne naissance à la graine et la paroi de l'ovaire au péricarpe (Monet, 1983), qui va se différencier en trois zones: l'épicarpe provenant de l'épiderme externe de l'ovaire, mésocarpe, la zone charnue comestible et l'endocarpe qui, après lignification, formera le noyau dans lequel se trouve la graine. La partie utilisée, le mésocarpe, représente pondéralement la partie la plus importante du fruit. Chez d'autres espèces comme chez les céréales (blé, orge), après la fécondation, les parois de l'ovaire fusionnent avec celle de l'ovule (testa) et la graine représente la masse essentielle du fruit. Chez les plantes annuelles à grain(e)s, il y a trois modalités de stockage des réserves: dans l'embryon (les cotylédons des dicotylédones, légumineuses incluses), dans l'albumen triploïde (les monocotylédones: les céréales) et dans un péricarpe ou albumen persistant diploïde (Solanacées, Brassicacées, Chénopodiacées, Amarantacées...). Ces différentes structures sont obtenues suite à des processus de développement (différenciation cellulaire et tissulaire, initiation / arrêt de synthèse de nouveaux composants, ...) et de croissance (allocation des assimilats vers différents compartiments), contrôlés génétiquement et différés

dans le temps. Ceci se traduit à plusieurs stades de développement, caractérisés soit par des processus moléculaires et cellulaires (division, élargissement) soit /et par la croissance (lente, linéaire, rapide, etc). En général, la phase de division cellulaire détermine le nombre de cellules de l'organe et ainsi son potentiel de croissance. Elle est caractérisée par une croissance lente. En revanche, la phase d'élongation cellulaire qui coïncide avec l'accumulation rapide des composants de réserve, présente une croissance rapide, le plus souvent linéaire. De son fonctionnement dépend la réalisation du potentiel déterminé antérieurement. L'arrêt du remplissage pourrait survenir soit suite à un manque d'assimilats, et dans ce cas le potentiel de stockage de l'organe n'est pas réalisé, soit à cause de l'organe même, par une limitation physique, due au remplissage d'un volume prédéterminé.

En terme de croissance, la graine et certains fruits (pomme, poire) suivent une croissance logistique en "S". En revanche, les fruits à noyau présentent une croissance en "double S" induite par l'endurcissement de l'endocarpe (et la croissance du noyau), suivie par une rapide expansion cellulaire et remplissage du mésocarpe (Faust, 1989). La fin du développement et de la croissance se termine par une phase de maturation et pour les fruits charnus par un ramollissement conduisant à la libération des graines.

Il en résulte que la connaissance de ces processus est indispensable car ils nous renseignent sur la notion de "phase sensible" liée au déterminisme des potentialités et sur l'allocation et la compétition entre les différents compartiments du fruit et de la graine.

## **6. Effet de la sécheresse sur les caractéristiques physiques et la présentation d'un organe récolté.**

Chez beaucoup d'espèces, notamment chez les légumes et les fruits consommés en frais, les propriétés physiques représentent un premier critère de qualité par "l'attractivité" qu'elles exercent sur le consommateur. Parmi ces propriétés, notons *la masse, la taille, la forme, la couleur, la dureté, l'état de fraîcheur, la présence de défauts visibles*. Même si ces critères ne sont pas étroitement liés à la qualité intrinsèque du produit, étant donné qu'ils sont importants dans la commercialisation, ils sont encore prioritaires dans certains cas.

Ainsi, le *comportement du consommateur*, souvent aléatoire et subjectif, est déterminant dans la hiérarchisation des caractéristiques physiques du produit. Par exemple, il préfère une orange ou un citron jaune et non vert, une pomme colorée en rouge, une grande taille pour une vente à la pièce ou petite s'il est vendu à la masse, une petite taille pour les petits pois, une racine de carotte non-ramifiée et de croissance uniforme, aucun trace de piqûre d'insecte ou pathologique ou physiologique pour un produit issu d'un système classique de production mais toléré pour l'agriculture biologique, etc. Pour satisfaire cette demande, qui n'est pas liée à la composition et aux propriétés fonctionnelles de l'organe, des opérations techniques supplémentaires sont introduites au niveau de la filière, comme par exemple le tri par taille ou la dé-colorisation. D'autre part, au cours du développement d'un fruit, pendant la maturation (fruits non climatériques) ou après (fruit climatérique), les propriétés physiques (couleur, texture, fermeté) et organoleptiques ou liées à la valeur santé (arômes, saveurs, sucre, acidité, phytoestrogènes, caroténoïdes...) évoluent. Ceci implique la prise en compte des propriétés fonctionnelles liées à la maturation et au ramollissement (composition biochimique de l'organe) comme critère de récolte et de gestion post-récolte.

Contrairement aux fruits et légumes, chez les espèces à graines et notamment chez les céréales, les caractéristiques physiques d'un grain ont une importance secondaire par rapport à la composition biochimique. Cependant, même dans ce cas, par exemple chez le blé, la masse d'un grain (MG) et sa dureté sont des critères importants car ils déterminent le rendement meunier et la dépense énergétique. Malgré ce fait, dans le processus de production, la priorité est accordée au potentiel de production représenté par le nombre de graines par m<sup>2</sup> (NG) ainsi qu'à la masse d'un grain. En effet, le progrès du

rendement (exemple ~1,2 q/ha an chez le blé) se produit d'une part par l'augmentation de la biomasse, notamment après la floraison, et d'autre part de la capacité de stockage, le nombre de grains par m<sup>2</sup>, et ceci au détriment du poids d'un grain. Pour cette raison et par souci de simplification dans de nombreuses études sur la productivité, les composantes NG et MG ne sont pas prises en compte et le passage de la biomasse totale au rendement en grains est effectué par un indice synthétique, "l'indice de récolte (IR)" ou "harvest index (HI)" qui est utilisé souvent pour évaluer l'effet des différents facteurs tels que le génotype et les facteurs environnementaux comme la sécheresse.

Malgré ces différences entre les organes consommés "en frais" et ceux stockés "en sec", le comportement des différentes espèces par rapport à la sécheresse présente de multiples similitudes mais aussi des spécificités. Chez toutes les espèces, la sécheresse est un facteur majeur de variation du rendement, de la masse de l'organe et de ses propriétés physiques. En général, on peut considérer que le rendement est diminué, mais l'effet au niveau de la masse individuelle de l'organe récolté, qui est une composante du rendement, est plus complexe, avec un effet négatif ou positif selon l'espèce, sa durée et intensité, de la date d'intervention, donc du développement de la plante et de l'organe, ainsi que de l'interaction avec d'autres facteurs tels que le rayonnement et la température. Le concept source – puits nous indique trois niveaux d'analyse de l'effet d'une sécheresse, qui interagissent en déterminant la qualité du produit:

- Production des assimilats C et N par la plante / peuplement
- Nombre d'organes : nombre de graines ou la charge en fruits pour les arbres fruitiers
- Développement et propriétés intrinsèques de l'organe de stockage

**Chez les plantes annuelles** à grain(e)s, Triboi et Triboi-Blondel (2002) en étudiant en conditions contrôlées, au niveau du peuplement et en lumière naturelle, l'effet d'une sécheresse ont montré que :

- Si la sécheresse intervient après la floraison, le nombre de grain(e)s n'est pas modifié et son effet se résume essentiellement à la *production réduite d'assimilats* carbonés et à la diminution du rendement par la baisse du poids moyen d'un grain. La diminution du poids du grain est d'autant plus importante que son potentiel déterminé par la température est élevé. En températures basses, le potentiel du MG est élevé car pour une même durée de fonctionnement en degrés-jours, la durée en jour et ainsi le rayonnement disponible augmentent. Par exemple, pour une température moyenne post-floraison inférieure de 5°C par rapport à la température ambiante, le MG potentiel est de 50 mg (100%) tandis qu'en température haute (+5°C) le PM potentiel est seulement de 40 mg (~72%) (Tableau 1). Une sécheresse à partir de la floraison diminue le MG potentiel déterminé par la température de 13 mg (-26%) en température basse et seulement de 5 mg (~10%) en température haute. Ainsi l'effet négatif de la sécheresse sur la masse du grain est d'autant plus fort que la durée du fonctionnement et de la sécheresse exprimée en jours est longue. Notons que ces effets négatifs de la sécheresse ne doivent pas être confondus avec le phénomène d'échaudage physiologique, qui se caractérise par un dérèglement métabolique très important provoquant un arrêt brutal de la croissance du grain.
- L'effet négatif d'une sécheresse post-floraison est plus prononcé pendant la première partie du *développement du grain* (division et élongation cellulaire) que pendant le remplissage proprement dit (Gooding et al., 2003). Pour cette raison, une économie d'eau pendant la période pré-floraison se traduit par une croissance limitée de la biomasse. Ainsi, une densité plus faible (maïs, tournesol) peut être utilisée comme technique culturale en vue de favoriser la période post-floraison, notamment sa première partie.
- Si la sécheresse intervient avant la floraison, la structure du peuplement pourrait être modifiée profondément ce qui peut provoquer une chute importante du rendement, essentiellement par la *diminution du NG*. Les stades méiose et floraison sont les plus sensibles

à la sécheresse, qui induit respectivement une stérilité du pollen (maïs, colza, blé, petit pois) et un avortement du grain (Robelin 1963; Fonseca et Westgate, 2005; Hiler et al., 1972). Dans cette situation, l'effet de la sécheresse sur le MG dépendrait du rapport source – puits ainsi créé. Etant donné qu'il s'agit de la dernière composante élaborée, des effets de compensation ont lieu et les caractéristiques du grain(e) (notamment sa masse) peuvent rester stables ou même, en cas extrêmes, augmenter, sans toutefois compenser la chute du rendement (Tableau 1). En présence d'un puits très diminué, si les conditions pendant le remplissage ne sont pas limitantes, la sénescence foliaire est déconnectée de la demande du grain et le grain atteint son potentiel et arrête sa croissance malgré la présence de feuilles non-sénescentes et encore actives. Dans ce cas, la sénescence foliaire est donc déconnectée de la demande en N du puits.

**Tableau 1.** Interaction sécheresse température pendant la période postfloraison\* (blé : Triboi et Triboi-Blondel, 2002 ; colza : Triboi-Blondel et Renard, 1999). Le témoin utilisé pour calculer le pourcentage est une culture sous irrigation et à température basse.

Température	Basse				Haute			
	Irrigué		Sec		Irrigué		Sec	
Eau								
Espèce	Blé	Colza	Blé	Colza	Blé	Colza	Blé	Colza
Rendement (t/ha)	8.77	6.29	6.53	3.99	6.34	4.21	5.55	3,51
% témoin	(100)	(100)	(74)	(63)	(72)	(67)	(63)	(72)
Siliques/m <sup>2</sup>		185.5		11.2		12.7		10.0
% témoin		(100)		(72)		(82)		(65)
Masse/silique (mg)		73.2		65.2		57.5		57.4
% témoin		(100)		(89)		(79)		(78)
Graines/silique		10.6		12.4		10.8		11.9
% témoin		(100)		(117)		(102)		(112)
Nb graines (10 <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> )	17.5	164, 5	17.4	138.4	15.7	137.2	15.8	118.8
% témoin	(100)	(100)	(100)	(84)	(90)	(83)	(90)	(72)
Masse/graine (mg)	50.1	3.82	37.4	2.89	40.3	3.07	35.0	2.95
% témoin	(100)	(100)	(75)	(76)	(80)	(81)	(70)	(77)
Huile (%MS)		48.3		42.5		43.0		40.0
Protéines (%MS)	10.1	16.2	13.3	20.5	12.5	22.8	14.6	25.8
% témoin	(100)	(100)	(132)	(127)	(124)	(141)	(144)	(159)
Protéines (µg/grain)	5084	619	4988	592	5056	700	5107	761
% témoin	(100)	(100)	(98)	(96)	(99)	(113)	(100)	(123)
Protéines (g/m <sup>2</sup> )	89	102	87	82	79	96	81	90
% témoin	(100)	(100)	(98)	(80)	(89)	(94)	(91)	(89)

\*Expérimentation effectuée à Clermont Ferrand en conditions thermiques contrôlées, sur des peuplements de 2 m<sup>2</sup> cultivés en rayonnement naturel. Température basse : -5°C par rapport à la température extérieure chez le blé, 18/10°C jour /nuit chez le colza ; Température haute : +5°C par rapport à la température extérieure chez le blé, 26/18°C jour /nuit chez le colza ;

Un comportement similaire a été enregistré chez d'autres espèces comme le colza, tournesol, maïs, et même chez les légumineuses. Ainsi, Egli et Bruening (2004) en étudiant au champ et en conditions contrôlées l'effet de la sécheresse pendant le remplissage des graines chez le soja ont enregistré une diminution du rendement de 5 à 38% due essentiellement à la baisse du poids de la graine (11-35%), à cause d'une durée de remplissage plus courte. La vitesse de remplissage et la concentration en saccharose sont restées relativement constantes. Il s'agit là d'une réponse typique à la sécheresse, car la diminution de la disponibilité en assimilats C par d'autres facteurs (ombrage, ablation) diminue la

concentration en saccharose et la vitesse de remplissage. La sénescence précoce et la capacité tampon de la réserve carbonée de la plante expliquent ce comportement (Egli, 2004).

Par rapport aux plantes annuelles à graines, **les arbres fruitiers et la vigne** présentent certaines particularités dues aux propriétés intrinsèques du fruit et à la pérennité de la plante.

La structure et la croissance d'un fruit et ainsi le déterminisme de sa masse sont relativement bien connus et décrits. Par rapport à une graine, un fruit présente une croissance du péricarpe qui va former ultérieurement la partie comestible. Cette croissance se superpose à la croissance de la graine (semence, noyaux, pépins). Ceci produit le plus souvent une courbe de croissance en S (pomme, poire) ou en double S (pêche, raisin), qui décrit les 3 ou 4 phases du développement du fruit et la croissance différée dans le temps de la graine avec ses parties constitutives (nucelle, tégument, albumen, embryon) et du péricarpe. Finalement, la masse finale du fruit est déterminée d'une part par le nombre de cellules et d'autre part par leur taille (volume) qui interagissent sous l'effet des différents facteurs. Ainsi, suite à un processus de compensation, la taille moyenne des cellules diminue si leur nombre augmente (exemple: suite à un éclaircissage précoce ou à la présence d'une charge de fruits importante). Cette compensation n'est pas totale et est modulée par des variables comme le rapport feuille / fruit, le rayonnement, la température et l'alimentation en eau. Notons aussi des différences de réaction au stress selon le stade de développement du fruit, mais aussi de l'arbre, car le stress agit non seulement sur la croissance du fruit mais aussi sur la croissance végétative et le potentiel de production de l'année suivante (Gonzales-Altozano et Castel, 1999b).

Aujourd'hui, de nombreuses publications décrivant l'effet de la variation de l'alimentation hydrique sur le fruit et la plante. En général, elles mettent en évidence des effets négatifs sur la taille et la masse du fruit d'une part, et un effet « rémanent » sur le fonctionnement de la plante dans l'année N+1, d'autre part. Une diminution de 5 à 10 % de l'alimentation hydrique peut modifier profondément les propriétés du fruit et le rendre invendable (Kays, 1999). Cependant l'effet est variable selon l'espèce, la dynamique et la date d'intervention de la sécheresse.

Par exemple, chez **les citrus** (clémentinier), la phase la plus critique est la période floraison-fécondation. Gonzales-Altozano et Castel (1999a) ont enregistré une chute de rendement de 30 à plus de 60%, mais avec une taille de fruit relativement constante. Cette période pourrait être critique aussi par un déficit de fécondation, notamment chez des fruits comme le kiwi et la baie du raisin, où le nombre de graines ou des pépins est relié directement à la taille du fruit. En revanche, chez **la vigne**, la période suivante, de la floraison – à la véraison (division cellulaire et élargissement rapide des baies et pépins, et phase « lag ») s'est avérée la plus critique car un stress hydrique produit une baisse de la croissance de la baie de 15 à 50% selon l'intensité du stress, qui n'est pas récupérable ultérieurement même si l'alimentation en eau est optimale (Ojeda et al., 2001 ; Deloire et al., 2004 ; Beker et Zimmerman, 1984 cité dans Huglin, 1986). Ojeda et al. (2001) supposent une limitation du volume par une extensibilité faible des parois cellulaires du péricarpe, car même si le nombre de cellules évalué par la quantité d'ADN n'est pas modifié, leur taille est modifiée par le stress hydrique. Au contraire, chez **l'abricot**, une croissance réduite pendant cette phase est récupérable pendant la phase de croissance rapide, si les conditions climatiques sont favorables (Torrecilas et al., 2004) Chez le **pêcher**, cette période n'est pas limitante non plus car, une sécheresse précoce pendant la période 'début de la croissance du fruit - fin de croissance des rameaux' modifie faiblement le nombre de fruits et leur masse (Chalmers et al., 1985 cité par Besset et al., 2001). En revanche, une restriction en eau pendant la phase finale de croissance rapide du fruit diminue fortement la qualité du fruit, notamment sa masse (Génard et Huguet, 1996 ; Besset et al., 2001). Une sécheresse sévère pendant cette phase, produisant une variation du tronc de l'arbre (DSS) de 400 à 500 µm diminue le rendement de 2 à 4 t/ha et la taille du fruit de 30 à 40%. Une sécheresse d'intensité inférieure à DSS 400 n'a pas eu d'effets marquants. Quant à la croissance végétative, les effets ont été minimes dans les deux cas. Par contre, Girona et al. (2003) montrent des effets plus marquants d'une sécheresse post-récolte, car elle diminue la floraison, le nombre des fruits et le rendement de l'année suivante. Par compensation, la taille de la

pêche augmente. Chez d'autres espèces, comme la **tomate**, l'effet d'un stress hydrique est plus lié à la dynamique de l'eau qu'à un stade précis de développement. En effet, la taille de la tomate, connue comme un fruit à faible transpiration, varie avec la quantité d'eau pénétrant dans le fruit. Le phloème étant la principale voie de l'eau vers le fruit, (plus de 80% d'eau du fruit), toute variation du flux phloémique et notamment celle induite par la disponibilité en sucres (par exemple du fait de la charge en fruit ou du rayonnement) contribue à la variation de la taille du fruit. Quant à l'effet sécheresse (et même salinité), l'effet négatif au niveau du fruit est moyennement induit par la diminution du flux xylémique (-25%) et l'augmentation de la transpiration (+27%), qui induisent un déficit global d'eau d'environ 30% (Bertin et al., 2000; Guichard et al., 2001).

Hormis la taille du fruit, d'autres modifications d'ordre physiologique ou pathologiques sont induites par une sécheresse. C'est le cas des craquelures du fruit (l'éclatement du péricarpe) sous l'effet d'une alimentation en eau irrégulière chez la tomate ou chez le clémentinier. De même, une déficience en Ca souvent liée au flux d'eau produit la nécrose *apicale* (*blossom-end*) de la tomate, le *bitter pit* et le *cork spot* de la pomme, le *black end* de la poire, le *black heart* du céleri (Kays, 1999 ; Guichard et al., 2001).

Ces résultats descriptifs, complétés par des hypothèses de fonctionnement dérivées du concept source - puits, ont conduit plusieurs auteurs à **l'élaboration de modèles** de croissance d'un fruit (pêche, kiwi, tomate..). Ces modèles nous permettent de mieux comprendre les interactions entre les différents facteurs du climat et de la plante qui sont difficiles à étudier expérimentalement et qui sont souvent à l'origine des résultats apparemment "contradictoires". Ainsi, Génard et Huguet (1996) ont développé et validé un modèle semi - fonctionnel de prévision des effets d'un stress hydrique sur la croissance d'une pêche, basé uniquement sur les flux d'eau dans le fruit, contrôlés par la différence du potentiel hydrique du fruit et de la plante. Le modèle traite essentiellement le stade III de croissance rapide du fruit, correspondant à l'expansion rapide des cellules du mésocarpe. Ainsi, à l'origine de la variation du potentiel hydrique du fruit et donc de sa demande en eau, on trouve *la transpiration du fruit, modelée par le rayonnement*. A un niveau de rayonnement inférieur à l'optimum photosynthétique, la transpiration du fruit et donc sa demande en eau diminuent. Ce faible effet est lié entre autres à la forte perméabilité de la cuticule externe du fruit et en conséquence à sa forte transpiration, qui représente environ 70% du flux d'eau (Génard et Huguet, 1996). Ceci explique pourquoi pour une diminution relativement forte de la transpiration depuis 20 à 10 g par fruit et par jour (par exemple faible rayonnement), sa masse reste constante, car ainsi l'influx d'eau diminue. Dans ces conditions, l'effet négatif d'une sécheresse sur la croissance du fruit est relativement faible. C'est souvent le cas pendant la phase I du développement du fruit, correspondant principalement à la division cellulaire. Un effet négatif de la taille initiale du fruit sur la masse finale est enregistré seulement pour une masse initiale du fruit faible (40g) et un rayonnement faible ( $<1\text{MJ h}^{-1} \text{m}^{-2}$ ). Dans ce cas, même si la vitesse de croissance du fruit augmente, la taille finale est plus faible car le flux d'eau reste plus faible à cause de sa taille réduite. En revanche, un stress hydrique relativement faible pendant la phase III (2 semaines avant la récolte) pendant laquelle la demande en eau du fruit est maximale à cause de sa taille, diminue fortement le flux de solutés vers le fruit, la vitesse de croissance et ainsi la masse du fruit.

Chez le kiwi, Lescourret et al. (1999) ont montré que la vitesse de croissance du fruit au temps "t" est fonction de la force du puits, représentée par sa masse et son activité, la vitesse relative de croissance  $RGR(t)=(dW/dt)*(1/W)$ . Dans ce cas RGR(t) varie en fonction de deux facteurs : le nombre de graines par fruit et la charge en fruits. Ceci met en évidence deux particularités chez cette espèce. La première concerne les effets des conditions de pollinisation sur le déterminisme de la taille du fruit, donc entre autres du climat. La seconde est due à l'utilisation du RGR(t), introduite pour tenir compte des spécificités des stress, car plusieurs auteurs ont montré qu'après un stress hydrique, la vitesse de croissance du fruit pouvait récupérer la vitesse d'un fruit non stressé, ce qui n'est pas le cas lors d'un stress carboné, car la force du puits a été diminuée. Une irrigation "économique" qui n'élimine pas totalement le stress hydrique diminue le rendement de 1,5 t ( $17,2-15,7=1,2$  t) et augmente la taille du fruit d'environ 8 g (98-90 g).

Enfin, chez la tomate, Bussières (2002) en modélisant le flux d'eau dans le pédicelle a montré que deux variables, la résistance du pédicelle et la transpiration du calice, sont à l'origine du potentiel hydrique faible du flux d'eau vers le fruit.

## 7. Sécheresse et composition primaire

Nous avons vu que la composition primaire est représentée par les trois composants majeurs, hydrates de carbone, lipides et protéines. Les deux premiers ont comme seule origine le carbone fix e par la photosynthèse, les protéines dépendant aussi de l'azote absorb e du sol ou fix e symbiotiquement. Les deux métabolismes du carbone et de l'azote sont relativement indépendants malgré leur haute interconnexion (Lawlor, 2002). Le rapport C/N représente un premier indice de la composition primaire car il intègre les effets génétiques et environnementaux. Ainsi, au niveau de la biomasse totale, on peut considérer que le rapport C/N augmente avec la durée de fonctionnement de la plante / peuplement ou encore que la teneur en N diminue avec l'augmentation de la biomasse. Parmi les facteurs environnementaux, la sécheresse est un facteur majeur de variation car elle agit directement sur la photosynthèse, donc sur la production du C. Il en résulte une augmentation de la teneur en N induite par la diminution de la quantité de C, d'abord du pool dit "C de réserve". Ceci est important pour les espèces fourragères car leur valeur énergétique, liée au C digestible est diminuée. Cet aspect ne sera pas trait e dans cette synthèse car il est bien connu et il existe de nombreuses publications sur ce sujet. En revanche, nous approfondirons les effets sur les graines et les fruits, qui sont plus complexes à cause de leurs multiples utilisations.

Le concept source -puits (Figure 1) nous donne un éclairage sur le déterminisme des flux et des quantités de C et N disponibles par organe r ecolt e, graine ou fruit (cf. point 3) et met en évidence certains aspects communs mais aussi des spécificités:

- La quantité de C disponible par organe est modulée par le fonctionnement des organes photosynthétiques et par le nombre de puits de stockage, le nombre de graines par plante ou par m<sup>2</sup> et la charge en fruits ou le rapport nombre de feuilles par fruit chez les arbres fruitiers.
- Le C stock e (hydrate de carbone, lipides) représente l'élément majeur de la matière sèches (MS) de l'organe : 80-90% MS chez les céréales, 60-70% MS chez les légumineuses (Triboi et Triboi-Blondel, 2002) et plus de 90% MS ou 10 à 20% matière fraîche (MF) chez 33 fruits consommés en « frais » (> 80% eau; Westood, 1978). Il en résulte qu'un stress hydrique va modifier principalement ces composants et qu'il existe un parallélisme étroit entre ces modifications et celles au niveau de la masse fraîche ou sèches de l'organe. De plus, le stress agissant aussi sur les propriétes intrinsèques de l'organe, son effet va dépendre du stade de développement de l'organe
- Le saccharose est la forme de C la plus répandue véhiculée dans le phloème vers l'organe de stockage. D'autres formes comme le glucose ou le sorbitol sont aussi présentes mais en plus faible quantité.
- Dans l'organe de stockage, le saccharose est utilis e pour la synthèse d'autres formes de stockage. Par exemple, les céréales stockent essentiellement de l'amidon, tandis que les oléagineux accumulent les deux formes, les lipides et l'amidon. Par contre, dans la partie comestible des fruits, les principales formes de stockage sont le saccharose, le glucose et le fructose. Chez la pêche, la forme majoritaire de stockage dans le mésocarpe est le saccharose qui représente 50 à 80% du total des sucres. Parall elment à son accumulation, elle est hydrolysée en glucose et fructose, les deux autres formes stockées dans le fruit. Dans le temps, l'accumulation du saccharose augmente depuis environ 1% à 6% MF (matière fraîche), tandis que le glucose et le fructose diminuent pour atteindre 1% MF. Ainsi, toute diminution de

la disponibilité en C va se répercuter sur le stockage du saccharose (Lescouret et Génard, 2005). Par contre chez la vigne, l'accumulation des sucres dans la baie (200 à 300 g/l) se fait sous forme de glucose et fructose, avec une légère prédominance du fructose, et un niveau très faible du saccharose (1 à 7 g/l) (Huglin, 1986). Enfin, le kiwi (*Actinidia*) accumule de l'amidon (57 mg g<sup>-1</sup> MF) et des sucres simples (fructose, glucose, saccharose, inositol respectivement 13.8, 11.3, 10.6, et 1.5 mg g<sup>-1</sup> MF) avec un ratio 1/0,65. Pendant la phase de maturation, la quantité d'amidon diminue et celles de saccharose, glucose, fructose augmentent (Richardson et al., 2004).

Cette analyse nous conduit à structurer notre synthèse en fonction du stade de développement de l'organe au moment du stress (division cellulaire, élongation, maturation) et de l'interaction entre le stress et les autres facteurs de l'environnement, comme la température ou le rayonnement. En effet, il s'agit d'une démarche utilisée assez fréquemment chez différentes espèces pour mettre en évidence les périodes critiques, quantifier les effets et enfin, les modéliser en vue de gérer "la sécheresse" ou d'étudier des interactions plus complexes, difficiles à étudier par voie expérimentale. Comme exemple, nous prendrons trois types de plantes modèles, différentes par leur biologie et leur utilisation : deux espèces annuelles à grain(e), le blé et le colza, qui stockent le C et N en majorité sous forme insoluble et à l'état sec, un arbre fruitier, le pêcher et une liane, la vigne, dont les réserves sont essentiellement des glucides solubles et les fruits sont utilisés en frais pour la consommation directe (pêche, raisin) ou la transformation industrielle (vin).

### 7.1) Les plantes à graines

Chez les plantes à graines, les teneurs en amidon, protéines et huile sont des critères majeurs de qualité. Une variation forte est enregistrée sous l'effet du climat, variation d'origine interannuelle ou géographique. Par exemple, dans les conditions chaudes et sèches de l'année 2003, on a enregistré une augmentation de la teneur en protéines chez le blé (12 à 15%) et une diminution de la teneur en huile chez le tournesol (44.2%). Chez cette espèce, 41% des échantillons ont eu moins de 44% d'huile et donc n'ont pas satisfait la norme de commercialisation ! L'effet négatif a été plus fort dans le sud que dans le nord et l'est de la France (Gardon et Merrien, 2004). Ces résultats sont une conséquence de la relation négative entre rendement et teneur en protéines enregistrée à différents niveaux d'investigation: à l'échelle de la France et de l'Europe, dans les études sur l'effet des différents facteurs du climat (année, température, eau, CO<sub>2</sub>-changement climatique ; Triboi et al., 2005) ou en Australie, dans de régions chaudes et sèches (Hocking et al., 1997). Ils reflètent l'interaction entre le métabolisme du C et de N qui conduit à des processus d'accumulation différents. A titre d'exemple, on peut analyser les résultats obtenus sur deux espèces modèles, une céréale, le blé, et un oléagineux, le colza.

**Tableau 2.** Effet de la sécheresse sur les composantes du rendement et sa composition biochimique chez le blé (Triboi et Triboi-Blondel, 2002)\*

	Epis/m <sup>2</sup>	Grains par épi	Grains par m <sup>2</sup>	Masse d'un grain (mg)	%N grain	µg N par grain	Rendement	
							t/ha	%
Effet de la date d'intervention de la sécheresse								
II_II	459	34.4	15780	45.9	2.10	964	7.24	100
II_IS	421	42.7	17977	40.4	2.13	816	7.26	100
II_SS	437	36.1	15776	30.5	2.66	811	4.81	66
IS_SS	463	27.9	12918	28.5	3.00	855	3.69	51
SS_SS	371	14.4	5328	39.5	3.00	1185	2.10	29
SS_II	382	16.0	6073	48.0	2.73	1310	2.92	40

\*Expérimentation effectuée à Clermont Ferrand sur des peuplements cultivés en bac de 2 m<sup>2</sup> et 0.5m de profondeur ; II\_II irrigué avant et après la floraison ; II\_IS sec après 29 mai, environ 300 dd après la floraison ; II\_SS sec après la floraison 18 mai ; IS\_SS sec après 30 avril, après méiose ; SS\_SS sec après 20 avril, montaison / méiose jusqu'à la récolte ; SS\_II sec du 29 avril au 18 mai, sec avant la floraison et irrigué après la floraison.

Une sécheresse après la floraison diminue la disponibilité en C par grain(e), (et donc la masse du grain) d'autant plus que la masse potentielle du grain déterminée par la température est élevée : environ -25% en température basse à fort potentiel de production (8.8 t/ha chez le blé et 6.3 t/ha chez le colza) et  $\leq 10\%$  en hautes températures, avec des potentiels de rendement plus faibles (respectivement 6.3 et 4.2 t/ha pour le blé et le colza, Tableau 1). Cette diminution est due principalement à la diminution de la durée en jours du fonctionnement post-floraison, car la durée de remplissage en degrés-jours est relativement constante (~600dj; Triboi & Triboi-Blondel, 2002; Egli, 2004).

- Dans les deux cas, par rapport à l'amidon ou à l'huile, qui représente la plus grande partie de la masse du grain(e), la quantité de protéines par grain(e) et par m<sup>2</sup> varie très faiblement. Il en résulte donc que la diminution de la quantité d'amidon et d'huile par grain(e) et de la masse du grain(e) est accompagnée par une forte croissance de la teneur en protéines par un mécanisme de dilution : environ 30% et 20% respectivement en températures basses et hautes, pour les 2 espèces (Table 2). Des résultats similaires ont été obtenus par Altenbach et al. (2003). L'augmentation de la teneur en protéines sous l'effet d'un stress hydrique post-floraison est due à la diminution de la durée de synthèse de l'amidon. Si une sécheresse intervient avant la floraison, la structure du peuplement est modifiée; la quantité d'assimilats C et ainsi de l'amidon et de la masse d'un grain(e) va diminuer ou va croître suite à un phénomène de compensation induit par le changement du rapport source – puits (Tableau 2). Ainsi, même si une sécheresse diminue la production d'assimilats C, si elle est intervenue dans la phase méiose - fécondation, le nombre de grain(e)s par épi diminue fortement et la disponibilité de C par grain(e) et donc sa masse peuvent croître. En revanche, le rendement diminue fortement (33%). Une croissance de la quantité de protéines par grain(e) a été enregistrée même chez le colza suite à une sécheresse post-floraison (Triboi-Blondel et Renard, 1999; Tableau 1) car, chez cette espèce, le nombre de graines par plante et par m<sup>2</sup> est la composante du rendement la plus sensible (Champolivier et Merrien, 1996). L'augmentation de la teneur en protéines suite à une sécheresse dénote une capacité de synthèse des protéines dans le grain(e) supérieure à celle de l'amidon et de l'huile (Triboi et al., 2005). Pour cette raison, pour obtenir une teneur élevée en protéines chez le soja, le Cetiom recommande un stress hydrique modéré au cours de la floraison afin de limiter le nombre de graines par gousse, suivie d'une alimentation en eau non limitante. Ainsi, la fixation symbiotique est maintenue et le poids d'une graine et la teneur en protéines augmentent (Escoffier, 2005). Des résultats similaires ont été enregistrés chez d'autres espèces, comme le tournesol (Triboi-Blondel et al., 2000).

## 7.2) Les arbres fruitiers

Chez les arbres fruitiers dont les fruits sont consommés en «frais», les deux composants principaux sont les glucides solubles et les acides organiques issus du cycle respiratoire de Krebs. Le rapport sucres / acidité est un critère principal de qualité.

Les effets environnementaux, notamment de la sécheresse ont été relativement bien étudiés. Comme exemple, nous prenons la pêche, qui au moins en France est utilisé comme « plante modèle » par son volume de production et par les interrogations suscitées par la variation de la qualité organoleptique des fruits. Rappelons que chez la pêche, le saccharose est le glucide principal de stockage et que, pendant la croissance du fruit, le rapport saccharose / autres glucides (glucose, fructose, sorbitol ...) augmente. Ainsi, comme chez le blé, à la récolte il existe une étroite corrélation entre la matière fraîche et la teneur en saccharose (Génard et Lescouret, 2004). Dans ce contexte, les recherches ont porté principalement sur la sensibilité des différentes phases de croissance et développement du fruit à la sécheresse,

évaluée par le rendement et par la taille du fruit. Ainsi, une sécheresse précoce pendant les stades I ou II du développement du fruit ou post-récolte induit une amélioration de la qualité par augmentation de la concentration en sucres et de l'intensité de la couleur rouge du fruit, indifféremment de l'effet sur la taille (Cf chapitre 6; Chalmers et al., 1985 ; Girona et al., 2003 ; Gelly et al., 2003). En France, Besset et al. (2001) ont focalisé leur travail sur la phase III de croissance finale. Ils ont montré qu'une sécheresse sévère diminue non seulement le rendement et la taille du fruit mais aussi sa teneur en glucides. Dans les deux années d'expérimentation, une chute du rendement de 10 et 30% et de la masse du fruit de 20 et 5% en frais et 60 et 40% en sec a été accompagnée d'une diminution de la teneur en sucres solubles de 20 et 10% respectivement. Si le stress hydrique est moins intense, le rendement et la masse du fruit ne changent pas mais la quantité de sucres diminue. Cependant, si on prend en considération le calibre du fruit, on constate soit un faible effet soit une augmentation de la teneur en sucres pour une même taille. Signalons aussi qu'une irrigation en excès augmente souvent la taille du fruit mais diminue la teneur en sucres.

Concernant l'acidité, la seconde composante importante de la qualité, elle est due à 80-90% à deux acides organiques, malique et citrique, synthétisés respectivement dans la cytoplasme et dans la mitochondrie. Wu et al. (2002) en étudiant la dynamique des différents acides pendant la croissance du fruit ont montré que jusqu'à environ 80 - 100 jours, la concentration en acide malique décroît de 10 à moins de 5 meq/100g MF pour augmenter ensuite pour une durée plus ou moins longue. Ceci serait lié au pH vacuolaire. En revanche, la concentration en acide citrique évolue de manière parabolique, avec une forte croissance pendant les premiers 100 jours jusqu'à 6-8 meq/100 g MF, suivie d'une baisse vers 1-2 meq/100g MF. Elle reflète l'état fonctionnel des mitochondries et ainsi caractérise l'évolution du potentiel de croissance du fruit. Hormis ces deux acides organiques, d'autres acides, comme les acides quinique et shikimique, impliqués dans la synthèse des arômes, sont présents dans la pulpe de la pêche, mais en faibles quantités à la récolte. Ces auteurs ont montré aussi qu'une amélioration de la disponibilité en assimilats C par le nombre moyen de feuilles par fruit présent, diminue la concentration en malate et augmente celle en citrate pendant la première partie de la croissance du fruit et, au contraire, dans la seconde partie augmente la concentration en malate et diminue celle en citrate. Ceci conduit à un rapport malate / citrate relativement constant (<5) initialement, suivi d'une croissance variable selon les années et avec la disponibilité en assimilats C. Sur l'effet d'un stress hydrique et l'interaction avec la disponibilité en C, ces auteurs ont montré une tendance de diminution de l'acidité générale suite à l'irrigation. Ceci pourrait être dû à la décroissance du contenu en hydrate de carbone ou à une dilution dans la masse du fruit. Ainsi, une légère sécheresse est souvent favorable à la qualité car elle augmente la concentration en sucres et en acides organiques. Ceci est valable aussi chez d'autres espèces, par exemple chez l'oranger. Cet effet a été mis en relation avec l'augmentation de l'activité saccharose synthase et la diminution du pH vacuolaire (Hockema et Etxeberria, 2001).

### 7.3) La vigne

Chez la vigne, comme chez la pêche d'ailleurs, la qualité de la baie est fonction de sa composition biochimique. Les composants majeurs d'une baie sont *les glucides solubles, les acides organiques et les composés phénoliques* issus du métabolisme secondaire.

#### Les glucides solubles.

Sur les 100 à 200g/l de glucides solubles, le saccharose représente seulement 7 à 10 g/l. Le restant est formé de fructose et glucose, le rapport entre les deux (F/G) étant légèrement supérieur à 1 (Huglin, 1986). La quantité totale de sucres, critère principal de qualité pour la consommation en frais et pour la qualité du vin, varie négativement avec le rendement, surtout pour les cépages de précocité limite. D'après Huglin (1986), si le rendement augmente d'une tonne, la concentration en sucres dans le moût

diminue de 2.3 g/l. Cependant la relation rendement – teneur en sucres est variable selon le facteur de variation et la date d'intervention. Ainsi, une sécheresse qui conduit le plus souvent à une diminution du rendement, n'augmente pas toujours la teneur en sucres car son effet dépend non seulement de la production d'assimilats C par la photosynthèse mais aussi du stade de développement de la plante qui influe sur l'allocation du C entre la croissance végétative et celle des baies d'une part et du stade de développement de la baie, d'autre part. Il s'agit là d'une interrogation importante avec de multiples répercussions économiques au niveau de la filière entière, qui n'est pas nouvelle mais qui revient dans le contexte économique actuel et dans la perspective du futur changement climatique (Duchêne et Schneider, 2000 ; Bindi et al., 2001). Dès 1973, Mériaux et al. (1979) étudiant l'impact d'une sécheresse de 21 jours appliquée à 5 périodes successives de mai à septembre ont montré que :

- le nombre de baies est affecté d'une part par l'effet direct d'une sécheresse pendant la période floraison – nouaison, et d'autre part par l'arrière-effet de l'environnement pendant les années précédentes.
- la croissance des baies subit les effets de la contrainte hydrique au cours de ces deux phases : le poids d'une baie est réduit de 10% au cours de la phase de multiplication et d'agrandissement cellulaire qui s'étend de la nouaison à la véraison et de 12% après la véraison, lorsque la croissance est due à l'accumulation des sucres et de l'eau.
- la teneur en sucres des baies est réduite de 8% par un stress hydrique à la véraison. Le pourcentage pondéral de pulpe dans la baie étant en moyenne de 75% (Cabernet-Sauvignon), la diminution pondérale de sucres est de l'ordre de 11%, ce qui représente la quasi-totalité de la réduction de poids de 12% d'une baie : c'est donc essentiellement le transfert des sucres qui est affecté par la sécheresse à cette période.

Ces résultats ont été confirmés ultérieurement et les mécanismes impliqués dans ces variations « aléatoires » ont été précisés. Ainsi, Becker et Zimmerman (1984) ont montré une baisse plus importante du rendement par souche pour une sécheresse dans la période floraison – véraison (-25%) par rapport à la période véraison – maturité (-18%). En revanche, la concentration en sucre reste constante pour la période floraison – véraison (-2%) et diminue faiblement (-12%) pour la 2<sup>ème</sup> période. Si la sécheresse est continue depuis la floraison à la maturité, le rendement baisse de 27%, étant pratiquement égal au rendement obtenu suite à une sécheresse uniquement dans la période pré-véraison, mais la concentration en sucres continue de baisser (-17%). De plus, une sécheresse intense est préjudiciable non seulement au rendement mais aussi à sa qualité. Ojeda et al. (2001) ont apporté une explication biologique à ces résultats en précisant qu'une sécheresse floraison – véraison ne change pas le nombre des cellules du péricarpe évalué par la quantité d'ADN, mais diminue fortement et de manière irrécupérable l'agrandissement cellulaire et ainsi le volume et la masse de la baie. Par contre, la concentration en sucres reste relativement stable car les sucres sont accumulés dans un volume plus faible (22,6 brix en irrigué et 21 en sécheresse selon Ojeda et al. (2002)). Elle pourrait même augmenter si la source en C n'est pas limitante. L'importance de la période véraison – maturation dans le déterminisme de la teneur en sucres en relation avec l'état hydrique a été confirmée par l'analyse à la récolte de l'isotope  $\delta^{13}\text{C}$  des sucres, qui est une intégration du fonctionnement hydrique de la plante, modifiée par l'année, le génotype, le sol et les techniques de culture (Gaudillère et al, 2002). Au point de vue pratique, concernant la relation sucres - sécheresse, on peut conclure en affirmant qu'un stress hydrique, dans la mesure où il évite des rendements excessifs, est un élément qui permet d'obtenir des raisins potentiellement plus concentrés en sucres. La période de stress hydrique est importante : un stress arrivant après la véraison modifie peu le rendement. La concentration finale est le résultat d'un équilibre entre le volume de baies à remplir et la capacité de la plante à synthétiser des sucres en fin de cycle (Duchêne 2005, communication personnelle). Cependant, si le stress hydrique, souvent associé aux températures élevées, est très important il pourrait altérer profondément le fonctionnement de la plante entière en bloquant l'activité de la

photosynthèse et la croissance et même le développement de la baie. C'était souvent le cas en 2003 (Payant et Salançon, 2004). Pour ces raisons, les préoccupations actuelles sont dirigées surtout vers l'évaluation des potentialités et de l'intensité d'une contrainte hydrique « in situ » avec des indicateurs physiologiques du fonctionnement de la plante (potentiel hydrique foliaire de base et de la tige, discrimination isotopique du carbone, etc.) et vers l'intégration des connaissances par la modélisation des effets complexes (Chone et al., 2001 ; Gaudillère et al., 2002 ; Lebon et al. 2003 ; Deloire et al., 2004).

## L'acidité

L'acidité est la 2<sup>ème</sup> composante majeure de la qualité chez la vigne car elle détermine en grande partie certaines qualités organoleptiques ainsi que la capacité de conservation du vin (Huglin, 1986). Elle est due essentiellement à deux acides organiques, malique et tartrique. Le premier (30 à 130 g/l) détermine l'acidité totale durant la maturation. Malgré son goût désagréable et âpre, une certaine quantité est nécessaire pour la qualité de la baie et du vin. Dans la baie, il est produit principalement avant la véraison à partir du saccharose importé depuis les feuilles. Il peut aussi provenir de l'oxydation du glucose au cours de la respiration ou de la transformation de l'acide citrique formé dans les racines l'année précédente. Sa quantité dans la baie est maximale à la véraison (20-25 g/l ou 250-350 meq/l) et ensuite, étant utilisé comme substrat respiratoire à la place du saccharose, sa teneur diminue. Ceci conduit à une corrélation négative à maturité entre la teneur en malate et celle en sucres d'une part et avec la température d'autre part. Notons aussi que la plus grande partie d'acide malique est souvent éliminée par la fermentation malo-lactique. Le second acide, l'acide tartrique (30-90 g/l), est essentiel car il participe à l'élaboration des propriétés organoleptiques. Par rapport à d'autres végétaux, la vigne en contient une quantité importante dans les baies et feuilles, et principalement dans les organes en croissance. Contrairement à l'acide malique dont la quantité par baie diminue après la véraison, la quantité d'acide tartrique reste relativement stable car il n'est pas métabolisé après sa synthèse ; en conséquence elle n'est pas corrélée au taux de sucres (Ruffner et al., 1983). En pratique, l'acidité d'un moût est mesurée en tant qu'acidité titrable (g acide tartrique/l), totale (g H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>/l) ou réelle (pH des moûts variant de 2,9 à 3,4 selon l'équilibre H<sup>+</sup>/K<sup>+</sup>). Enfin, notons que le seuil optimal d'acidité est fonction du type de vin. Par exemple, pour produire des vins blancs de qualité dans la région bordelaise, on recommande une acidité titrable de 7.5 g/l d'acide tartrique.

Nous avons déjà mentionné le rôle important du climat, notamment de la température et de la sécheresse, sur l'acidité et sur la teneur en sucres, ce qui a conduit à l'utilisation du rapport sucres / acidité comme critère de maturité du raisin et de détermination de la date de récolte. Peyrot des Gachons et al., (2005) en analysant l'effet de l'alimentation hydrique sur la qualité du Sauvignon blanc, ont confirmé ces traits généraux. Sur huit conditions (2 années d'expérimentation et 4 vignobles) en utilisant le critère "  $\delta^{13}C$ " les huit conditions ont été classées selon l'intensité du stress hydrique: une condition sévère, une faible, une modérée et cinq sans stress. Une forte variation des composantes du rendement a été enregistrée : poids d'une baie, 1.19 à 2.21g ; sucres totaux, 163 à 214g/l ; acidité titrable (exprimée en g/l acide tartrique) 5.0 à 7.7 g/l, acide malique, 1.34 à 2.48 g/l ; acide tartrique 5.5 à 6.8 g/l. Ces résultats montrent qu'une sécheresse sévère induit une croissance faible de la baie, avec une concentration faible en sucres et une faible acidité titrable car la teneur en acide malique est très faible. Pour ces huit conditions, des corrélations fortes ont été enregistrées entre le  $\delta^{13}C$  et le poids d'une baie ( $R^2= 0.81$ ), la concentration en sucres ( $R^2=0.59$ ) et l'acidité titrable ( $R^2=0.74$ ). Enfin citons aussi le millésime 2003, sec et torride, qui se caractérise par une faible acidité et un pH élevé, conséquence des teneurs faibles en acide malique. Dans les conditions de cette année, l'acide malique a été dégradé fortement pendant la maturation du raisin, tandis que l'acide tartrique est resté relativement stable.

## 8. Sécheresse et composition secondaire

Les trois composants majeurs, hydrates de carbone, lipides et protéines, stockés dans les organes de réserves ne sont pas des composants homogènes. Ils ont une composition et une structure complexe, variable avec le génotype et l'environnement. Dans le chapitre précédent, nous avons vu que, chez les fruits, les protéines et les lipides sont quantitativement faiblement représentés et que le composant principal, les glucides solubles, ont une composition variable et nous avons analysé leur composition en saccharose, glucose, fructose, etc.. Contrairement aux fruits, les composants accumulés dans les grain(e)s sont souvent polymérisés, stockés à l'état déshydraté. S'agissant des composants complexes, on peut les caractériser non seulement quantitativement, mais aussi qualitativement, en analysant leur composition et leurs propriétés fonctionnelles. Concernant la composition, on peut affirmer qu'elle est relativement bien connue et qu'elle est principalement contrôlée génétiquement. En revanche, l'environnement et donc la sécheresse influent sur les accumulations quantitatives, dépendantes de la source en C et N au niveau de l'organe. Malgré un changement de la composition et des rapports entre les différents composants signalé de longue date (Branlard et Triboi, 1983), l'origine de ces changements n'a été conceptualisée que relativement récemment, durant ces dix dernières années (Triboi et Triboi-Blondel, 1998 ; Triboi-Blondel et Triboi, 2000 ; Triboi et al., 2003). Le changement de la composition d'un composant majeur est induit par trois paramètres que sont la date d'initiation et d'arrêt de la synthèse et du coefficient d'allocation de C ou de N entre les différents composants. Comme exemple, nous analysons le changement de structure, composition et propriétés fonctionnelles de l'amidon et des protéines chez le blé et des lipides chez le colza et tournesol.

### 8.1) La structure et la composition de l'amidon

Chez les céréales, l'amidon est un polymère de deux polysaccharides, amylose et amylopectine. En tant que structure, l'amidon se trouve organisé en grains d'amidon de différentes tailles. Le rapport amylose /amylopectine et la distribution de taille de granules d'amidon déterminent en grande partie les propriétés fonctionnelles telles que le gonflement et la solubilité et finalement le pouvoir épaississant et gélifiant. La quantité d'amidon par grain varie avec la disponibilité en saccharose par grain, modulée par le génotype et par l'environnement, notamment par la température et la sécheresse, à travers le nombre de grains et la production d'assimilats C. Peu de résultats sont disponibles actuellement sur l'effet environnemental, notamment sur l'interaction sécheresse \* température. Les résultats obtenus chez le blé dans le cadre du projet GRAINCO– AIP-Agraf (Triboi et al., résultats non publiés) sur l'interaction température – sécheresse nous tracent le cadre général des changements envisagés : une augmentation de la quantité d'amidon par grain d'environ 30 mg/grain est accompagnée par une augmentation de la proportion de petits grains, de 70% environ à 85%, et par une baisse de la teneur en amylose de 30 à environ 25%. A l'origine de ces modifications, on trouve le développement du grain. En effet, les granules A de grande taille sont initiées précocement, contrairement aux granules B - de faible taille, initiées ultérieurement. Si la durée du développement du grain est diminuée par un stress, tel que la température ou la sécheresse (Daniel et Triboi, 2002), alors, le nombre de granules B diminue. Etant donné que la teneur en amylose (AM) des granules A et B est différente (Morrison, 1993 :  $AM_A = 12.3 + 0.019 LP$  et  $AM_B = 8.7 + 0.019LP$ , avec LP= lysophospholipide), il en résulte qu'une diminution de la quantité d'amidon par un stress augmente le rapport A/B et donc la teneur en amylose. De plus, ces changements structuraux et de composition ont une répercussion sur les propriétés fonctionnelles avec augmentation de la cristallinité et enthalpie de fusion et de gélatinisation.

### 8.2) La structure et la composition des protéines

Chez le blé, hormis la quantité de protéines, leur composition est un critère important de qualité car elle détermine les propriétés fonctionnelles du gluten et rhéologiques de la farine. Le déterminisme

génétique du polymorphisme des protéines et leur rôle dans l'élaboration des propriétés fonctionnelles sont relativement bien connus. En bref, un grain de blé contient deux grandes familles de protéines, enzymatique ou métabolique de type albumine et globuline (AG) et de réserve, de type gliadines (GLI) et gluténines (GLU). Les recherches sur la dynamique de leur accumulation a mis en évidence une synthèse précoce des AG, pendant la période de multiplication et élongation cellulaire de l'albumen, suivie d'une accumulation des GLI et GLN. Ainsi, le rapport AG / (GLI+GLN) augmente avec la disponibilité en N au niveau du grain, donc avec la quantité totale des protéines synthétisées dans le grain (Triboi et Triboi-Blondel, 2001). D'autre part, les GLI et les GLN ne sont pas homogènes car ces fractions sont à leur tour composées de plusieurs sous-fractions,  $\alpha$ -,  $\beta$ -,  $\gamma$ - et  $\omega$ -GLI et gluténines de faible et haut poids moléculaire, respectivement FPM- et HPM-GLN. Parmi ces sous-fractions, les HPM-GLN sont les plus importantes dans le déterminisme des propriétés rhéologiques. En effet dotées d'au moins deux groupes de SH- libres, elles constituent un noyau central d'agrégation et de polymérisation donnant naissance au réseau gluténique. Ainsi, le déterminisme génétique se manifeste par le type de protéines de chaque fraction, leur composition et leur capacité d'agrégation / polymérisation.

Concernant l'environnement, on connaissait l'effet de la nutrition azotée, mais d'importantes interrogations restaient sur l'effet climatique, notamment celui de la température et de la sécheresse, car, pour une même teneur en protéines, les propriétés rhéologiques présentaient une variation "aléatoire" importante. Une percée importante dans la compréhension de ces variations a été effectuée ces dix dernières années. En effet, en étudiant la dynamique d'accumulation des différentes fractions protéiques sous l'effet de l'azote, de la température et de la sécheresse, Triboi et al. (2001, 2003) ont montré des règles communes d'accumulation en fonction de la quantité totale de protéines du grain. De même, l'allocation entre les sous-fractions des gliadines ou des gluténines est peu variable et les quantités stockées dépendent seulement de la quantité totale de GLI ou GLN (Daniel et Triboi, 2001). Il en résulte que le rapport entre les différentes fractions et sous-fractions est dépendant principalement de la quantité de protéines accumulées dans le grain, contrôlée par la source en N au niveau du grain. Ces recherches ont conduit à l'élaboration du premier modèle de prévision de l'effet environnemental sur la quantité et la composition des protéines du blé (Martre et al., 2003). Les recherches récentes ont confirmé ces données et ont montré que le même processus est aussi à l'origine de l'effet génétique quantitatif (Martre et al., 2004). Ainsi, l'effet de la sécheresse, de la température et de leurs interactions s'explique en plus grande partie par la diminution de la quantité totale de protéines par grain, car l'allocation entre les différentes fractions reste relativement constante. Rappelons que ces deux facteurs du climat agissent principalement au niveau de la production d'assimilats C par la diminution de la durée en jours de la photosynthèse, et secondairement sur la synthèse de protéines dans le grain, car entre la durée en jours et la vitesse de synthèse par jour existe une forte compensation.

### 8.3) La structure et la composition des lipides

La biodiversité des lipides et de leur synthèse, même au niveau moléculaire, sont aujourd'hui bien connues et décrites dans d'excellentes synthèses (Voelker et Kinney, 2001). Ces connaissances ont contribué à un profond changement de la composition des lipides végétaux, en éliminant des acides gras toxiques (colza) et en favorisant la synthèse des acides gras à haute valeur santé (colza, tournesol). Cependant, comme chez les autres composantes, l'expression du potentiel génétique est modulée par l'environnement qui en modifiant la disponibilité en assimilats C, induit une variation importante de la quantité de lipides par grain(e) et même de leur composition en acides gras. Si l'effet climatique thermique était relativement bien connu (Trémolières et al, 1982), peu de travaux ont été consacrés à l'effet de la sécheresse et à l'interaction avec la température. Triboi-Blondel et Renard (1999) en étudiant le déterminisme climatique (interaction température \* sécheresse pendant la période post-floraison) et génétique chez le colza ont enregistré une diminution de la masse d'une graine, de sa teneur en huile et un changement de la composition en acides gras de l'huile. L'étude de la dynamique d'accumulation de l'huile a montré une initiation et un dépôt relativement tardif au cours du

développement. A 200 degrés-jours après la fécondation, quand la graine de colza atteint environ 10% de sa taille finale, la teneur en huile est de 5 – 10%, composée de 50-70% d'acides gras saturés (C16:0 et C18:0, palmitique et stéarique respectivement) et une plus grande proportion de C18:2 (15-27% de linoléique) que de C18:1 (6-12% d'oléique). La composition en acides gras change alors rapidement au cours des jours suivants et les différentes proportions approchent celles observées dans la graine mure. A maturité, des températures élevées conduisent à une augmentation de l'acide oléique (C18:1) et une diminution de l'acide linoléique (C18:2). Ceci confirme les résultats obtenus par Trémolières et al. (1982). Des résultats similaires ont été obtenus aussi chez le tournesol (augmentation de la proportion de C18:1 et diminution du dernier maillon de la chaîne, l'acide linoléique (C18:2), ce qui montre bien une analogie de fonctionnement de ces deux espèces pour le métabolisme des acides gras (Triboi-Blondel et al., 2000). L'ensemble de ces modifications (diminution des acides gras saturés, augmentation de l'oléique et diminution de linoléique), inférieur à 3% pour l'huile de colza correspond à une amélioration de la qualité de l'huile. En revanche, à basse température et en conditions de stress hydrique, la teneur en acide oléique diminue et le linoléique augmente, ce qui dénote une détérioration qualitative. Enfin, notons que tous ces effets sont dus au changement de la croissance de l'embryon par rapport au péricarpe d'une part et par l'altération des mécanismes de synthèse des acides gras, d'autre part. Ainsi, la modification génétique de certaines désaturases, la désaturase linoléique du colza et oléique du tournesol sont d'un grand intérêt pour la compréhension de l'interaction génotype \* environnement et l'augmentation de la stabilité de qualité de l'huile dans des conditions environnementales défavorables.

## **9. Micronutriments, composants issus du métabolisme secondaire, valeur santé.**

Hormis la trilogie majeure glucides, protéines, lipides, certains composants mineurs par leur quantité sont présents dans les organes récoltés et sont dotés de propriétés fonctionnelles intéressantes pour la santé et /ou pour la transformation du produit. Il s'agit des minéraux et de composés organiques de type vitamines ou issus du métabolisme secondaire. De même sur les 15 vitamines, seules les B12 et D ne sont pas contenues dans le règne végétal. A celles-ci, ajoutons d'autres composés organiques souvent appelés "phytochemicals", avec des propriétés antioxydantes et protectrices faisant référence à leur rôle dans la nutrition humaine (Grusak et DellaPenna, 1999).

### *9.1) Les minéraux*

Parmi les minéraux, hormis l'azote et le soufre qui sont contenus dans les protéines, 15 autres macro- et oligo-éléments sont essentiels pour la nutrition humaine, en ordre décroissant des besoins : K, Ca, P, Cl, Na, Mg, Fe, Zn, Mn, F, Cu, Mo, Cr, I, Se. Leur dynamique dans le système sol – plante est relativement bien connue. Leur concentration dans l'organe récolté est fonction de la biodisponibilité dans le sol et du fonctionnement de la plante (absorption, stockage et transfert dans l'organe récolté; Fageria et al., 2002). Ainsi, nous faisons référence seulement à la relation source – puits et à l'effet eau. L'eau intervient dans les deux aspects. Elle modifie la biodisponibilité dans le sol par des phénomènes d'oxydoréduction, solubilisation / précipitation, et de mobilité dans le sol. C'est le cas du P, Se, Mn, Fe. Au niveau de la plante, le contrôle de l'acquisition, l'allocation et le stockage est réalisé au niveau du fonctionnement du système racinaire, de la remobilisation des pools intermédiaires, de transport entre les organes, par des mécanismes complexes qui nécessitent d'être mieux connus (Grusak et al., 1999). Concernant l'effet de l'eau, même en absence d'une carence minérale, la sécheresse en modifiant la croissance et la quantité des composants majeurs induit un phénomène de dilution par rapport à d'autres composants moins altérés, d'autant plus importants que l'élément est localisé dans le compartiment moins affecté, par exemple dans le péricarpe chez les grain(e)s et que la remobilisation et le transport vers le puits n'est pas limitant. Pour cette raison, le poids d'un grain de blé est souvent

corrélé négativement avec la teneur en P, Mg, Se, Mn, Ca, K, Sr, Fe. D'autre part, bien que la teneur en protéines soit souvent corrélée négativement avec le poids de l'organe, car la source en N est moins diminuée par la sécheresse ou la température que celle en C, certains minéraux présentent une corrélation positive avec la teneur en protéines, surtout s'ils entrent dans la composition protéique (par exemple le S) ou s'ils sont déposés dans le compartiment de stockage. C'est le cas du S, P, Mn. Enfin, l'absorption de certains éléments s'arrête ou ralentit après la floraison et d'autres, comme le Ca, continuent d'être transportés avec le flux d'eau vers l'organe, grain(e) ou fruit, car ils ont un rôle important dans le métabolisme général de l'organe.

### 9.2) Métabolites secondaires

Les *composants organiques* issus du métabolisme secondaire présentent une très forte diversité (> 100 000 composés) et des teneurs souvent faibles, ce qui rend difficile leur étude. Leur rôle dans la vie de la plante et dans l'utilisation des récoltes est de plus en plus souligné (Gachon et al., 2005). Par exemple, les composés phénoliques représentent un groupe majeur de "phytochemicals" bien connus par leur activité antioxydante dont l'importance dans le fonctionnement de la plante et dans l'élaboration des principales caractéristiques organoleptiques des organes, graines ou fruits, comme la couleur, la saveur et les arômes a été depuis longtemps mise en évidence.

Au point de vue biochimique, ils sont répartis en quatre groupes : composés non-flavonoïdes, tannins, flavonoïdes et caroténoïdes. Parmi les premiers, citons les acides phénoliques (C6) (cyanamiques, benzoïque, ...) qui, suite à l'oxydation par les phénoloxydases sont impliqués dans le *brunissement* et qui participent au déterminisme de la flaveur et moins du goût ; les flavanes (C<sub>15</sub>H<sub>14</sub>O) qui ont des propriétés tannantes donnant l'astringence, et dont l'activité diminue avec le degré de polymérisation et au cours de la maturation des fruits. Polymérisés sous forme de flavolanes et oxydés, ils participent aussi au brunissement des fruits. Le second groupe, les flavonoïdes ou polyphénols proviennent de la polymérisation des acides phénoliques. Nombreux (>4 000), ils sont répartis en 14 classes dont six (anthocyanes, flavonols, flavanols, isoflavonoïdes, flavones, flavonones) ont des propriétés « santé » bien connues. Entre autres, ils sont à l'origine de la couleur. Enfin, les caroténoïdes sont présents sous différentes formes (phytoène,  $\alpha$ -,  $\beta$ -,  $\gamma$ -carotène) en quantités relativement importantes dans les végétaux. Les pigments caroténoïdes sont impliqués dans le déterminisme de la coloration des fruits, légumes et même des grain(e)s. Leur dégradation conduit à la formation des composants aromatiques volatiles. Ainsi, le lycopène, le pigment rouge majeur chez la tomate et la pastèque, est à l'origine de nombreux arômes tels que le géraniol.

Il en résulte donc que le monde végétal contient une pléthore de composants dont l'impact sur la valeur d'utilisation du produit sera de plus en plus déterminant non seulement par les aspects visuels mais aussi par les arômes et les propriétés fonctionnelles, à valeur santé ou économique (Berna et al., 2005). Pour plus d'informations sur leur composition biochimique, structure et propriétés fonctionnelles, nous indiquons quelques excellentes récentes synthèses : Yilmaz et Toledo (2004), Stintzing et Carle (2004), Skerget et al. (2005), Gachon et al. (2005), Lewinshon et al. (2005), Omoni et Aluko (2005). Les recherches dans ce domaine sont en plein développement. Il s'agit surtout d'approches biochimiques, nutritionnelles et génétiques, voire moléculaires. Les aspects environnementaux sont encore très peu étudiés, malgré l'importance évidemment croissante de ce domaine. Cependant, quelques données pertinentes, souvent disparates, existent aujourd'hui chez quelques espèces "traditionnelles" comme la vigne et le vin, la tomate, les céréales et les oléagineux, notamment le soja.

Chez *la vigne*, les composés phénoliques sont localisés essentiellement dans la pellicule (flavonols-*quercitrin*, anthocyanes) et dans la graine (flavan-3-ols). Ainsi, la taille de la baie, en modifiant le rapport surface / volume, est un premier facteur de variation de la concentration du moût de raisin en phénols. Il en résulte que des facteurs environnementaux comme l'eau, en modifiant la taille, changent indirectement la composition du moût et finalement du vin. Ojeda et al. (2002) en étudiant l'effet de la

sécheresse en fonction de son intensité et de sa date d'intervention ont mis en évidence les deux voies de variation de la concentration en composés phénoliques :

- a) Augmentation de la proportion de la pellicule dans la masse de la baie car la diminution de la taille de la baie est due exclusivement à l'effet négatif de la sécheresse sur la taille du péricarpe. Dans cette expérimentation, la taille de la baie diminue de 47 et 68 % pour un déficit hydrique sévère (S1) ou modéré (S2) pendant la période floraison – véraison et de 85% pour un stress après la véraison (S3). Ainsi le rapport pellicule/ masse de la baie augmente depuis 0.108 dans le témoin irrigué à : 0.120 pour S2 et S3 et 0.125 pour S1.
- b) Modification de la synthèse des différents constituants :
  - un stress hydrique précoce (avant véraison) augmente la synthèse des flavonols et diminue celle des flavan-3-ols (tannin total)
  - un stress après la véraison augmente les proanthocyanes et les anthocyanes
  - le degré de polymérisation augmente dans tous les cas. Ainsi, l'astringence et peut-être l'amertume due aux monomères de catéchine et épicatechine diminuent.

Ces données ont été confirmées par Deloire *et al.* (2004) qui, en analysant la teneur en anthocyanes de la pellicule en fonction du type de sol, montrent qu'une contrainte hydrique moyenne à forte (potentiel foliaire de base entre -0.4 et -0.6 MPa) et progressive durant la maturation est favorable à la synthèse des anthocyanes. De plus, en tenant compte de l'interaction anthocyanes - tannins dans la qualité finale, la sécheresse après la véraison paraît la plus favorable pour l'élaboration de la qualité. Ces auteurs signalent aussi un effet variétal, car le Grenache noir répond différemment du Syrah. Il est évident aussi que, pour les cépages blancs, d'autres composants comme les arômes (par exemple les terpènes : linalol, géraniol, nérol, terpinéol, citronellol, etc) sont pris en compte dans l'élaboration de la qualité à la place des composés phénoliques qui produisent une instabilité de la couleur et un goût amer. Sur le cépage Sauvignon blanc, Peyrot des Gachons *et al.* (2005), en étudiant l'effet de l'eau sur trois précurseurs (p-4MM : genêt, bois ; p-4MMPOH : agrumes, citron ; et p-3MH : grapefruit, fruit de la passion) des thiols volatils, ont montré qu'un déficit hydrique sévère limite le potentiel aromatique ; en revanche, un déficit modéré est favorable au développement aromatique surtout si la récolte est effectuée au pic maximal ou légèrement après pour le composant le plus variable p-4MMP. Notons aussi les résultats de Medrano *et al.* (2003) qui, synthétisant 10 années de recherche sur deux cépages en Espagne, concluent à une étroite relation entre le rendement et la sécheresse, due à l'effet sur la photosynthèse. En revanche, la relation sécheresse - qualité implique "la disponibilité" en eau au niveau de l'organe, mais n'est pas liée au rendement ou à la photosynthèse.

Des résultats similaires montrant un effet positif d'un léger stress hydrique sur certains composés du métabolisme secondaire impliqués dans la qualité ont été obtenus aussi chez d'autres espèces, comme *la tomate* (Dumas *et al.*, 2003) et *la pêche* (Monet, 1983). De même, certains résultats obtenus chez *les grain(e)s* respectent les règles générales mises en évidence précédemment. Par exemple, étant donnée la composition spécifique des différents compartiments d'une graine, une simple modification du rapport entre compartiments induit un changement global dans la composition. Dans ce sens, *le blé* est un modèle exemplaire car les minéraux sont localisés dans les couches extérieures, le péricarpe (le son), les caroténoïdes et les phytates dans la couche à aleurone, les lipides essentiellement dans le germe, les vitamines dans le germe et le son. Chez le *soja*, les isoflavones, connus par leurs propriétés « santé » (diminution des certains cancers, de l'ostéoporose, des maladies cardiovasculaires et des symptômes dus à la ménopause) sont localisés surtout dans le germe. Les cotylédons, qui représentent environ 90% de la masse de la graine, contiennent 0.2 à 1% isoflavones, tandis que le germe, 3% de la masse de la graine, possède une concentration de 4 à 10 fois supérieure. De plus leur composition est variable, car parmi les trois types d'isoflavones, daidzéine, génistéine et glycitéine, la dernière est contenue presque exclusivement dans le germe (30 à 50% du total d'isoflavones). En revanche, les

cotylédons sont plus concentrés en génistéine (Daydé et al., 2002). Comme chez d'autres espèces, leur teneur est contrôlée génétiquement, mais il existe une forte interaction génotype \* environnement (G\*E) : une irrigation pendant le remplissage des graines augmente significativement la teneur en isoflavones, d'autant plus que la température est basse. Ceci est dû à un effet direct sur le fonctionnement de la graine car sa masse est restée constante (Lozovaya et al., 2005). Si l'environnement modifie le poids de la graine (effet lieu par la date et l'intensité des stress), une corrélation positive de la teneur en isoflavones avec le poids de la graine et négative avec la teneur en protéines a été enregistrée. Ceci pourrait être dû, au moins en partie, au changement de la structure de la graine, car l'effet est plus marquant au niveau des cotylédons (+ 27 à 34 %) que du germe (+ 8 à 16 %) (Dayde et al., 2004). Une interaction G\*E a été observée aussi sur la composition des isoflavones : l'augmentation de la quantité totale d'isoflavones par graine est accompagnée par une augmentation de la teneur en daidzéine chez la variété Queen et une diminution chez Imari. Ces résultats indiquent comme conditions les plus favorables pour l'accumulation des isoflavones, les températures « fraîches » tardives qui semblent agir de manière synergique avec une irrigation tardive

Soulignons aussi que le progrès dans le domaine analytique et moléculaire rend possible de plus en plus la compréhension des mécanismes impliqués dans ces variations. En attendant d'avoir des connaissances permettant une *modélisation fonctionnelle*, le développement des recherches sur l'expression selon l'environnement, et donc des modèles statistiques ou semi-fonctionnels représente un objectif important pour les futures recherches (Struik et al., 2005).

### 9.3) Composantes toxiques

Hormis ces effets d'un stress hydrique, qui sont essentiellement d'ordre économique et dans certains cas positifs au point de vue "santé", on peut s'interroger sur les effets "santé" négatifs. Doré et al. (2002), dans leur synthèse sur l'impact négatif des pratiques agricoles sur la sécurité sanitaire des aliments, mentionnent les contaminants possibles et les voies de contamination. Nous ne citerons que les deux catégories de contaminants qui semblent plus probables : les minéraux toxiques (éléments traces) et les mycotoxines.

La probabilité d'avoir des concentrations élevées en *minéraux* qui les rendent toxiques, notamment en métaux lourds, est très faible, car, d'une part, la plante possède « des filtres » entre les organes (exemple du passage vers le grain) et, d'autre part, les conditions édaphiques conduisant à une accumulation excessive (pollution par utilisation des boues riches en métaux, anciens sites industriels, etc.) sont très rares.

L'effet toxique des *mycotoxines*, composés du métabolisme secondaire des champignons, est connu depuis environ 50 ans. Elles sont produites principalement par l'*Aspergillus*, le *Penicillium* et le *Fusarium*. Ainsi, tous les végétaux pourraient être concernés, et ainsi les aliments produits et même le vin ! Cependant, les porteurs les plus fréquents sont les céréales. Chez le blé, la production de mycotoxines par le *Fusarium* sp. est fonction de la température et de l'humidité de l'air principalement à la floraison et les différentes espèces ont des exigences différentes (Hope et al., 2005). L'humidité élevée (brumisation) est un facteur favorisant le développement des champignons et la production de deoxynivlenol - DON (Lemmens et al., 2004). Cependant, comme l'accumulation du DON augmente pendant environ 6 semaines après l'infection et décroît ensuite, les résultats finaux sont apparemment variables. Ces auteurs mentionnent aussi un effet variétal et une bonne relation entre les symptômes visuels de contamination et la production de DON, mais seulement pour des niveaux modérés de contamination. Enfin, Champeil et al. (2004) dans leur synthèse sur l'effet des différents facteurs au niveau du système de culture, mentionnent comme favorables la profondeur du travail du sol, le précédent, et le cultivar. Quant à l'effet de l'irrigation, elle favorise le développement du pathogène, la fréquence et la sévérité de l'attaque, mais l'effet sur la production des mycotoxines reste variable et difficile à prédire car en conditions naturelles il n'y a pas une bonne corrélation entre l'intensité de

l'attaque par *Fusarium* sp. et la production des DON. De même, chez le maïs il n'y a pas de corrélation entre l'attaque de *Fusarium poae* et la production de toxines, comme le nivalenol. Ainsi, la production de toxines dans un champ cultivé reste un mystère. Cependant, le climat à la floraison et les semaines qui suivent la floraison reste le principal facteur de risque, mais d'autres facteurs considérés comme 'secondaires' modulent l'effet pluie, et ce d'autant plus qu'ils sont nombreux (Grosjean et Barrier-Guillot, 2004).

## 10. Conclusions générales

A partir de l'analyse précédente, plusieurs conclusions générales peuvent être formulées sur l'effet la relation sécheresse - qualité:

1. D'une manière générale, une sécheresse diminue la production de biomasse principalement par deux mécanismes : diminution de la surface d'interception du rayonnement et de la durée de photosynthèse.
2. La production d'assimilats C étant plus touchée que les assimilats N, le rapport C / N diminue. Ainsi, la concentration des composants majeurs synthétisés à partir des assimilats C (amidon, lipides ...) diminue et la concentration en protéines augmente.
3. Les répercussions au niveau d'un organe sont fonction du rapport source / puits, modifié par l'intensité de la sécheresse et la date d'intervention par rapport au développement de la plante et de l'organe. En général, la taille de l'organe et donc la quantité des composants stockés diminuent. Ces changements sont positifs ou négatifs selon l'utilisation du produit, évaluée par la teneur en protéines, lipides, amidon, etc.
4. Le changement quantitatif au niveau des composants majeurs (amidon, lipides, protéines) induit un changement qualitatif au niveau de leur constitution et structure, de leur propriétés fonctionnelles et donc technologiques.
5. La sécheresse étant un stress, elle induit des mécanismes de défense matérialisés entre autres par le changement des composés dits mineurs ou issus du métabolisme secondaire. La valeur santé et technologique de ces composés est fonction de l'espèce et de l'utilisation du produit. Ces modifications ont pour origine le changement du rapport entre les différents compartiments de l'organe récolté et la modification des processus de synthèse et d'accumulation.
6. L'irrigation en optimisant la production de biomasse n'est pas dans tous les cas synonyme de « qualité supérieure ». La prise en compte de ces changements au niveau de la composition nécessite chez certaines espèces, comme les fruits, un changement de la technologie de production, par l'utilisation des « sécheresses contrôlées » à certains stades de développement
7. Nos connaissances actuelles au niveau de la variation de la composition des organes sont encore très limitées. Les premiers modèles de l'élaboration de la masse d'un organe et de sa composition primaire viennent d'être élaborés (blé, pêche..). Ils nécessitent d'être complétés par le développement et la compartimentation des organes, ainsi que par leur croissance et composition spécifique en composants majeurs mais aussi en composants secondaires à valeur santé et technologique. La variabilité génétique et l'effet de l'environnement sur l'extériorisation du potentiel génétique sont les deux objectifs majeurs de ces futures recherches.

## Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier vivement toutes les personnes qui les ont aidés dans la réalisation de cette synthèse en leur envoyant volontairement des tirés à part de leurs travaux, des commentaires ou par leurs discussions et observations: Monique Berger, Marc Bonhomme, Philippe

Bussièrre, Anne Chartier, Eric Duchêne, Yvon Dumas, Michel Génard, Françoise Lescouret, Pierre Martre, Nathalie Munier-Jolain, Hernan Ojeda, Philippe Vivien. Ils remercient aussi Christian Huyghe pour ses observations et son aide apportée à la publication de cette synthèse.

### Références bibliographiques

Altenbach S.B., DuPont F.M., Kothari K.M., Chan R., Johnson E.L., Lieu D., 2003. Temperature, water and fertilizer influence the timing of key events during grain development in a US Spring wheat. *Journal of Cereal Science* 37, 9-20.

Berna A., Lammertyn J., Buysens S., DiNatale C., Nicolaï B.M., 2005. Mapping consumer liking of tomatoes with fast aroma profiling techniques. *Postharvest Biology and Technology* 38, 115-127.

Bertin N., Guichard S., Leonardi C., Longuenesse J.J., Langlois D., Navez B., 2000. Seasonal evolution of the quality of fresh glasshouse tomatoes under Mediterranean conditions, as affected by air vapour pressure deficit and plant fruit load. *Annals of Botany* 85, 741-750.

Besset J.K., Génard M., Girard T., Serra V., Bussi C., 2001. Effect of water stress applied during the final stage of rapid growth on peach tree (cv. Big-Top). *Scientia Horticulturae* 91, 289-303.

Bindi M., Fibbi L., Migliette F., 2001. Free Air CO<sub>2</sub> Enrichment (FACE) of grapevine: II Growth and quality and wine in response to elevated CO<sub>2</sub> concentration. *European Journal of Agronomy* 14, 145-155.

Branlard G., Triboi E., 1983. Influence du milieu de culture sur les concentrations relatives des bandes de gliadines chez le blé tendre. *Comptes Rendus Académie de Science. Paris*, 297, série III, 229-233.

Bussièrres P., 2002. Water import in the young tomato fruit limited by pedicel resistance and calyx transpiration. *Functional Plant Biology* 29, 631-641.

Champeix A., Doré T., Fourbet J.F., 2004. Fusarium head blight: epidemiological origin of the effects of cultural practices on head blight attacks and the production of mycotoxins by Fusarium in wheat grains. *Plant Science* 166, 1389-1415.

Chalmers D.J., Mitchell P.D., Jerie P.H., 1985. The relation between irrigation, growth and productivity of peach tree. *Acta Horticulturae* 173, 283-288.

Champolivier L., Merrien A., 1996. Effects of water stress applied at different growth stages to Brassica napus L. var. oleifera on yield, yield components and seed quality. *European Journal of Agronomy* 5, 153-160.

Chone X., Van Leeuwen C., Du Bourdieu D., Gaudillères J.P., 2001. Stem water potential is a sensitive indicator of grapevine water status. *Annals of Botany* 87, 477-483.

Daniel C., Triboi E., 2001. Effects of temperature and nitrogen nutrition on the accumulation of the gliadins analysed by RP-HPLC. *Australian Journal of Plant Physiology* 28, 1197-1205.

Daniel C., Triboi E., 2002. Changes in wheat protein aggregation during grain development: effects of temperatures and water stress. *European Journal of Agronomy* 16, 1-12.

Daydé J., Berger M., Theodorou V., 2002. Variation of soybean isoflavones content and composition. *International Soya Conference & Exhibition*, 06-09/11/2002, Beijing, China, Technical committee, 361-362.

Daydé J., Berger M., Theodorou V., 2004. Screening and breeding soybeans for isoflavone content and composition. In: Moscardi F., Hoffman-Crampo CB., Saraiva OF., Galerani PR., Krzyzanowski FC, Carrao-Panizzi MC (Eds), *IV International Soybean Processing and Utilization Conference (ISPUC IV)*, 29/02-05/03/2004, Foz do Iguassu, PR, Brazil, Embrapa, 845-851.

Deloire A, Carbonneau A, Wang ZP, Ojeda H., 2004. Vine and water a short review. *Journal International des Sciences de la Vigne et du Vin* 38, 1-13.

Doré T., Le Bail M., Verger P., 2002. Pratiques agricoles et sécurité des aliments en production végétale. *Cahiers Agriculture* 11, 177-185.

Duchêne E., Schneider C., 2000. Grapevine and climatic change: a glance at the situation in Alsace. *Agronomy Sustainability Development* 25, 93-99.

- Dumas Y., Dadomo M., Di Lucca G., Grolier P., 2003. Effects of environmental factors and agricultural techniques on antioxidant content of tomatoes. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 83, 369-382.
- Egli D.B., 2004. Seed-fill duration and yield of grain crops. *Advances in Agronomy* 83, 243-279.
- Egli D.B., Bruening W.P., 2004. Water stress, photosynthesis, seed sucrose levels and seed growth in soybean. *Journal of Agricultural Science* 142, 1-8.
- Escoffier I., 2005. Qualité du soja. Piloter l'irrigation pour viser la protéine. *La France agricole*, 03/06/2005
- Fageria N.K., Baligar V.C., Clark R.B., 2002. Micronutrients in crop production. *Advances in Agronomy* 77, 185-267.
- Faust M., 1989. Physiology of temperate zone fruit trees. John Willey & Sons Eds, 206-260.
- Fishman S., Génard M., 1998. A biophysical model of fruit growth: simulation of seasonal and diurnal dynamics of mass. *Plant, Cell and Environment* 21, 739-752.
- Fonseca A.E., Westgate M.E., 2005. Relationship between desiccation and viability of maize pollen. *Field Crops Research* 94, 114-125.
- Gachon C.M.M., Janglois-Meurinne M, Saindrenan P., 2005. Plant secondary metabolism glycosyltransferases: the emerging functional analysis. *Trends in Plant Science* 10, 542-549.
- Garnon V., Merrien A., 2004. Pénurie d'huile dans les graines de tournesol en 2003. *Oléoscope* 76, 4-5.
- Gaudillère J.P., Van Leeuwen C., Ollat N., 2002. Carbon isotope composition of sugars in grapevine an integrated indicator of vineyard water status. *Journal of Experimental Botany* 53, 369, 757-763.
- Génard M., Huguet J.G., 1996. Modelling the response of peach fruit growth to water stress. *Tree Physiology* 16, 407-415.
- Génard M., Lescouret F., 2004. Modelling fruit quality: ecophysiological, agronomic and ecological perspectives. In : Dris R and Jain SM (eds)., *Production practices and quality assessment of food crops, Vol 1, "Preharvest practice"*, Kluwer Academic Publisher, Netherlands, 47-82.
- Girona J., Mata M., Arbones A., Alegre S., Rufat J., Marsal J., 2003. Peach tree response to single and combined regulated deficit irrigation regimes under shallow soils. *Journal of the American Society for Horticultural Science* 128, 432-440.
- Gelly M., Recasens I., Mata M., Arbones A., Rufat J., Girona J., Marsal J., 2003. Effects of water deficit during stage II of peach fruit development and postharvest on fruit quality and ethylene production. *Journal of Horticultural Science & Biotechnology* 78, 324-330.
- Guichard S., Bertin N., Leonardi C., Gary C., 2001. Tomato fruit quality in relation to water and carbon fluxes. *Agronomie* 21, 385-392.
- Gooding M.J., Ellist R.H., Shewry P.R., Schofield J.D., 2003. Effects of restricted water availability and increased temperature on the grain filling, drying and quality of winter wheat. *Journal of Cereal Science* 37, 295-309.
- Gonzales - Altozano P., Castel J.R., 1999. Regulated deficit irrigation in Clemantina de Nules citrus tree: I. Yield and fruit quality effects. *Journal of Horticultural Science & Biotechnology* 74, 706-713.
- Gonzales - Altozano P., Castel J.R., 1999. Regulated deficit irrigation in Clemantina de Nules citrus tree: II. Vegetative growth. *Journal of Horticultural Science & Biotechnology* 75, 388-392.
- Grosjean F., Barrier-Guillet B., 2004. Facteurs de variation et évaluation de la teneur en mycotoxines des céréales françaises. Dans « Action transversale «Mycotoxines » », Séminaire Bilan Toulouse 25-26 oct, INRA, 32-35.
- Grusak M.A., Della Penna D., 1999. Improving the nutrient composition of plants to enhance human nutrition and health. *Annual Review Physiology Plant Molecular Biology* 50, 133-161.
- Grusak M.A., Pearson J.N., Marentes E., 1999. The physiology of micronutrient homeostasis in field crops. *Field Crops Research* 60, 41-51.

- Hiler E.A., Van Bavel C.H.M., Hossain M.M., Jordan W.R., 1972. Sensivity of southern peas to plant water deficit at three growth stages. *Agronomy Journal* 64, 60-64.
- Hockerna B.R., Etxeberria E., 2001. Metabolic contributors to drought-enhanced accumulation of sugars and acids in oranges. *Journal of the American Society for Horticultural Science* 126, 599-605.
- Hocking P.J., Kirkegaard J.A., Angus J.F., Gibson A.H., Koetz E.A., 1997. Comparison of canola, Indian mustard and Linola in two contrasting environments. I. Effects of nitrogen fertilizer on dry-matter production, seed yield and seed quality. *Field Crops Research* 49, 107-125.
- Hope R., Aldred D., Magan N., 2005. Comparison of environmental profiles for growth and deoxynivalenol production by *Fusarium culmorum* and *F. graminearum* on wheat grain. *Letters in Applied Microbiology* 40, 295-300.
- Huglin P., 1986. *Biologie et écologie de la vigne*. INRA (ed), Payot Lausanne, Technique & Documentation, Paris, 125-151.
- Kays S.J., 1999. Preharvest factors affecting appearance. *Postharvest Biology and Technology* 15, 233-247.
- Lebon E., Dumas V., Pieri P., Schultz H.R., 2003. Modelling the seasonal dynamics of soil water balance of vineyard. *Functional Plant Biology* 30, 699-710.
- Lemmens M., Buerstmaryr H., Krska R., Schuhmacher R., Grausgruber H., Ruckenbauer P., 2004. The effect of inoculation treatment and long-term application of moisture on *Fusarium* head blight symptoms and deoxynivalenol contamination in wheat grains. *European Journal of Plant Pathology* 110, 299-308.
- Lescourret F., Blecher N., Habib R., Chadoeuf J., Agostini D., Pailly O., Vaissière B., Poggi I., 1999. Development of a simulation model for studying kiwi fruit orchard management. *Agricultural Systems* 59, 215-239.
- Lescourret F., Génard M., 2005. A virtual peach fruit model simulating changes in fruit quality during the final stage of fruit growth. *Tree Physiology* 25, 1303-1315.
- Lozovaya V.V., Lygin A.V., Ulanov A.V., Nelson R.L., Dayde J., Widhohn J.M., 2005. Effect of temperature and soil moisture status during seed development on soybean isoflavone seed concentration and composition. *Crop Science* 45, 1934-1940.
- Lewinsohn E., Sitrit Y., Bar E., Azulay Y., Ibdah M., Meir A., Yosef E., Zamir D., Tadmor Y., 2005. Not just colors - carotenoid degradation as a link between pigmentation and aroma in tomato and watermelon fruit. *Trends in Food Science & Technology* 16, 407-415.
- Lawlor D.W., 2002. Carbon and nitrogen assimilation in relation to yield: mechanisms are the key to understanding production systems. *Journal of Experimental Botany* 53, 773-787.
- Marte P., Samoil V., Triboi E., Branlard G., 2004. Grain protein composition for hexaploid bread wheat (*Triticum aestivum*). and related diploid and tetraploid species. A general scheme. *VIII ESA Congress: European agriculture in a global context*, 11-15/07 2004, LVL Copenhagen, Denmark, Oral presentation et Book of Proceedings, 535-536.
- Marte P., Porter J.R., Jamiesson P., Triboi E., 2003. Modelling Grain Nitrogen Accumulation and Protein Composition to Understand the Sink/Source Regulations of Nitrogen Remobilization for Wheat. *Plant Physiology* 133, 1959-1967.
- Marwede V., Schierholt A., Mollers C., Becker H.C., 2004. Genotype x environment interactions and heritability of tocopherol contents in canola. *Crop Science* 44, 728-731.
- Medrano H., Escalona J.M., Cifre J., Bota J., Flexas J., 2003. A ten-year study on the physiology of two Spanish grapevine cultivars under field conditions: effects of water availability from photosynthesis to grape yield and quality. *Functional Plant Biology* 30, 607-619.
- Mériaux S., Rollin H., Rutten P., 1979. Effets de la sécheresse sur la vigne I. Etude sur Cabernet-Sauvignon. *Annales Agronomiques*, 30, 553-575.
- Monet R., 1983. *Le pêcher. Génétique et physiologie*. INRA (ed), Masson, 86-96.
- Morrisson W.R., 1993. Cereal starch granule development and composition. In: Shewry P.R. and Stobart K. (ed.). *Seed Storage Compounds*. Oxford Science Publications, 175-206.

- Ojeda H., Deloire A., Carbonneau A., 2001. Influence of water deficits on grape berry growth. *Vitis* 40, 141-145.
- Ojeda H., Kraeva E., Deloire A., Carbonneau A., Andary C., 2002. Influence of pre and post-veraison water deficits on synthesis and concentration of skins phenolic compounds during the berry growth of Shiraz grapes (*Vitis vinifera* L.). *American Journal of Oenology and Viticulture* 53, 261-267.
- Omoni A.O., Aluko R.E., 2005. The anti-carcinogenic effects of lycopene: review. *Trends in Food Science & Technology* 16, 344-350.
- Payant J.C., Salançon E., 2004. Comportement de la vigne face à la canicule et la sécheresse de 2003. *Progrès Agricole et Viticole* 121, 282-286
- Peyrot des Gachons C., Van Leeuwen C.V., Tominaga T., Soyer J.P., Gaudillère J.P., Dubourdiou D., 2005. Influence of water and nitrogen deficit on fruit ripening and aroma potential of *Vitis vinifera* L cv Sauvignon blanc in field conditions. *Journal of the Science Food and Agriculture* 85, 73-85.
- Richardson A.C., Marsh K.B., Boldingh H.L., Pikerling A.H., Bulley S.M., Frearson N.J., Ferguson A.R., Thornber S.E., Bolitho K.M., Macrae E.A., 2004. High growing temperature reduces fruit carbohydrate and vitamin C in kiwifruit. *Plant, Cell and Environment* 27, 423-435.
- Robelin M., 1963. Contribution à l'étude du comportement du maïs-grain vis-à-vis de la sécheresse. *Journées internationales de l'irrigation*, AGPM Ed, 69-76.
- Ruffner H.P., Brem S., Malpiero U., 1983. The physiology of acid metabolism in grape berry ripening. *Acta Horticulturae* 139, 123-127.
- Skergot M., Kotnik P., Hadolin M., Hras A.R., Simonic M., Knez Z., 2005. Phenols, proanthocyanidins, flavones and flavonols in some plant materials and their antioxidant activities. *Food Chemistry* 89, 194-198.
- Sofield I., Evans L.T., Cook M.G., Wardlaw I.F., 1977. Factors influencing the rate and duration of grain filling in wheat. *Australian Journal of Plant Physiology* 4, 785-797.
- Stintzing F.C., Carle R., 2004. Functional properties of anthocyanins and betalains in plants, food, and in human nutrition. *Trends in Food Science & Technology* 15, 19-38.
- Struick P.C., Yin X., de Visser P., 2005. Complex quality traits: now time to model. *Trends in Plant Science* 10, 513-516.
- Torrecillas A., Domingo R., Galego R., Ruiz-Sanchez M.C., 2004. Apricot tree response to withholding irrigation at different phenological periods. *Scientia Horticulturae* 85, 201-205.
- Trémolières A., Dubacq J., Drapier D., 1982. Unsaturated fatty acids in maturing seeds of sunflower and rape: regulation by temperature and light intensity. *Phytochemistry* 21, 41-45.
- Triboi-Blondel A.M., 1978. Effets de différents régimes d'alimentation hydrique sur l'activité in vivo de la nitrate-réductase dans les feuilles de Dactyle. *Comptes Rendus Académie Science, Paris*, 286, Série D, 1795-1798.
- Triboi-Blondel A.M., Renard M., 1999. Effects of temperature and water stress on fatty acid composition of rapeseed oil. *10<sup>th</sup> International Rapeseed Congress*, 26-29/09 1999, Canberra, Australia, 4 p.
- Triboi-Blondel A.M., Triboi E., 2000. A modelling approach to integrate the effects of post-anthesis temperature and water stress on grain growth and composition of wheat, rapeseed and sunflower. *Proc ESA, 3<sup>rd</sup> International Crop Science Congress*, 17-22/08 2000, Hambourg (Germany)
- Triboi-Blondel A.M., Bonnemoy B., Falcimagne R., Martignac M., Messaoud J., Philippon J., Vear F., (2000). The effect of temperature from flowering to maturity on seed composition of high oleic sunflower inbred and mid-oleic hybrids. In: *Proceedings of 15<sup>th</sup> International Sunflower Conference*, 12-15/06 2000, Toulouse, France, A66-72.
- Triboi E., Triboi-Blondel A.M., 1998. Concept for the analysis of environmental and agronomical effects on grain quality. *5th ESA Congress*, 28/06 - 02/07 1998, Nitra, Poster et Résumé, ESA - Short communication, vol I, 251-252.
- Triboi E., Triboi-Blondel A.M., 2001. Environmental effects on wheat grain growth and composition. *Aspects of Applied Biology* 94, 91-101.

Triboi E., Triboi-Blondel A.M., 2002. Productivity and grain or seed composition: a new approach to an old problem – invited paper. *European Journal of Agronomy* 16, 163-186.

Triboi E., Colonna P., Gallant D., 2000. Déterminisme climatique et agronomique du poids du grain et de sa composition protéique chez le blé d'hiver. GRAINCO, Projet AIP Agraf, CR résultats

Triboi E., Martre P., Triboi A.M., 2003. Environmentally-induced changes of proteins composition for developing grain of wheat are related to changes in total protein content. *Journal of Experimental Botany* 84, 1731-1742.

Triboi E., Martre P., Girousse C., Ravel C., Triboi-Blondel A.M., 2006. Unravelling environmental and genetic relationships between grain yield and nitrogen concentration for wheat. *European Journal of Agronomy* 25, 505-513.

Voelker T., Kinney A., 2001. Variations in the biosynthesis of seed – storage lipids. *Annual Review of Plant Molecular Biology* 52, 335-361.

Westwood M.V., 1978. Temperate - zone pomology. Freeman WH and Company, Eds, New York, 200-203.

Wu B.-H., Génard M., Lescourret F., Gomez L., Li S.-H., 2002. Influence of assimilate and water supply on seasonal variation of acids in peach (cv Suncrest). *Journal of the Science of Food and Agriculture* 82, 1829-2002.

Yilmaz Y., Toledo R.T., 2004. Health aspects of functional grape seed constituents. *Trends in Food Science & Technology* 15, 422-443.

## Alimentation hydrique de la vigne et qualité des raisins

Cornelis van Leeuwen<sup>1</sup>, Philippe Vivin<sup>2</sup>

<sup>1</sup> ENITA, UMR EGFV, ISVV Bordeaux, BP 81, 33883 Villenave d'ornon, France

<sup>2</sup> INRA, UMR EGFV, ISVV Bordeaux, BP 81, 33883 Villenave d'ornon, France

*d'après les travaux de Xavier Choné, Olivier Tregoat, Marie-Eve Jaeck, Sébastien Rabusseau et Jean-Pierre Gaudillère*

### Résumé

Le développement de la vigne et la maturation du raisin sont fortement influencés par le régime hydrique. Ce dernier dépend à la fois des réserves en eau du sol, de paramètres climatiques (précipitations, ETP) et de l'architecture de la végétation. Pour une conduite raisonnée de la vigne, il est important de connaître son niveau d'alimentation en eau. Pendant longtemps celle-ci a été suivie au niveau du sol, soit à l'aide de tensiomètres pour connaître la disponibilité de l'eau dans le sol, soit à l'aide d'humidimètres à neutrons pour évaluer les quantités d'eau prélevées dans le sol par la vigne dans le but d'établir des bilans hydriques. Des bilans hydriques peuvent également être obtenus par modélisation. De plus en plus on évalue l'état hydrique de la vigne à partir d'indicateurs physiologiques. Parmi celles-ci on peut citer les potentiels hydriques et la discrimination isotopique mesurée sur les sucres du moût à maturité. La contrainte hydrique réduit la photosynthèse, favorise l'arrêt de croissance, limite la taille des baies et stimule la synthèse des composés phénoliques. Une contrainte hydrique modérée augmente la vitesse de maturation malgré la limitation de la photosynthèse, à cause d'une moindre compétition pour le carbone (arrêt de croissance) et d'un volume plus faible de raisin à remplir. Elle est ainsi un facteur important de précocité. Une forte contrainte hydrique peut rester favorable au potentiel œnologique des cépages noirs, surtout si le niveau de rendement est faible, alors qu'elle est presque toujours pénalisante pour les cépages blancs. Le viticulteur peut agir sur le régime hydrique à travers le choix du matériel végétal (cépage et porte-greffe), le système de conduite (notamment la surface foliaire) et l'entretien du sol. Dans des conditions pédo-climatiques particulièrement sèches, et lorsque la législation le permet, il peut avoir recours à l'irrigation. Cette technique est avant tout un facteur d'augmentation du rendement. Dans certaines situations, lorsqu'elle permet d'éviter un stress hydrique sévère tout en maintenant un déficit hydrique modéré, elle peut également être un facteur de qualité.

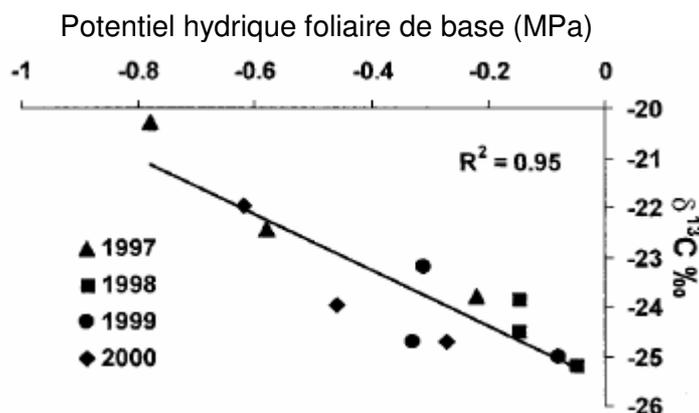
### Introduction

Selon un vieil adage « la vigne doit souffrir pour produire des raisins de qualité ». Reste à savoir de quoi et dans quelles limites... A la différence de la plupart des productions végétales, et notamment des cultures annuelles, la vigne est généralement cultivée en dessous de l'optimum agronomique, notamment dans des sites réputés pour la qualité du vin produit. Il est admis que différents types de contraintes environnementales peuvent limiter la vigueur et le rendement et favoriser le potentiel œnologique du raisin. Parmi ces contraintes, la limitation de l'alimentation en eau joue un rôle important sur le comportement de la vigne et la composition des baies. Un régime hydrique modérément limitant induit généralement des effets bénéfiques sur la qualité des vins produits ; on parle dans ce cas de « contrainte hydrique ». L'expression « stress hydrique » doit être réservée à des situations où un manque d'eau excessif altère la qualité du raisin ou met en péril la pérennité de la vigne.

## Appréciation de l'état hydrique de la vigne

De nombreux facteurs influent sur l'état hydrique de la vigne. L'offre naturelle (sans irrigation) est assurée essentiellement par la réserve en eau utilisable du sol (RU) qui dépend, entre autres, de la profondeur de sol exploré par les racines, de sa texture et de sa structure (éventuellement de la présence d'une nappe d'eau perchée, du ruissellement,...), et par le mésoclimat (pluviométrie sur la parcelle). La demande découle de l'évapotranspiration de la plante et du sol, elle-même étroitement dépendante de la dimension du couvert végétal (densité de plantation, surface foliaire,...), des caractéristiques du cépage et des porte-greffe, de la couverture du sol et de la pression d'évaporation de l'atmosphère.

Il existe de nombreuses techniques pour évaluer le régime hydrique de la vigne (Van Leeuwen *et al.*, 2001a ; Van Leeuwen, 2003). Les plus anciennes sont basées sur la mesure de la quantité d'eau dans le sol (gravimétrie ou humidité à neutrons) ou de sa disponibilité pour la plante (tensiométrie) (Seguin, 1970). Le bilan hydrique théorique constitue une autre approche du régime hydrique de la vigne, par modélisation (Riou et Lebon, 2000 ; Lebon *et al.*, 2003). Il propose de simuler le stock d'eau restant dans le sol à chaque instant de l'été à partir de données concernant le stock d'eau au début de la saison, auquel on ajoute les apports (précipitations) et retranche les pertes (évapotranspiration). Il présente l'avantage de discriminer le degré de contrainte hydrique à travers trois composantes : l'époque, la durée et l'intensité. La principale difficulté de cette approche concerne l'estimation du stock d'eau au début de la saison, qui est extrêmement difficile à estimer à cause de particularités propres à la culture de la vigne (profondeur d'enracinement, sols caillouteux).

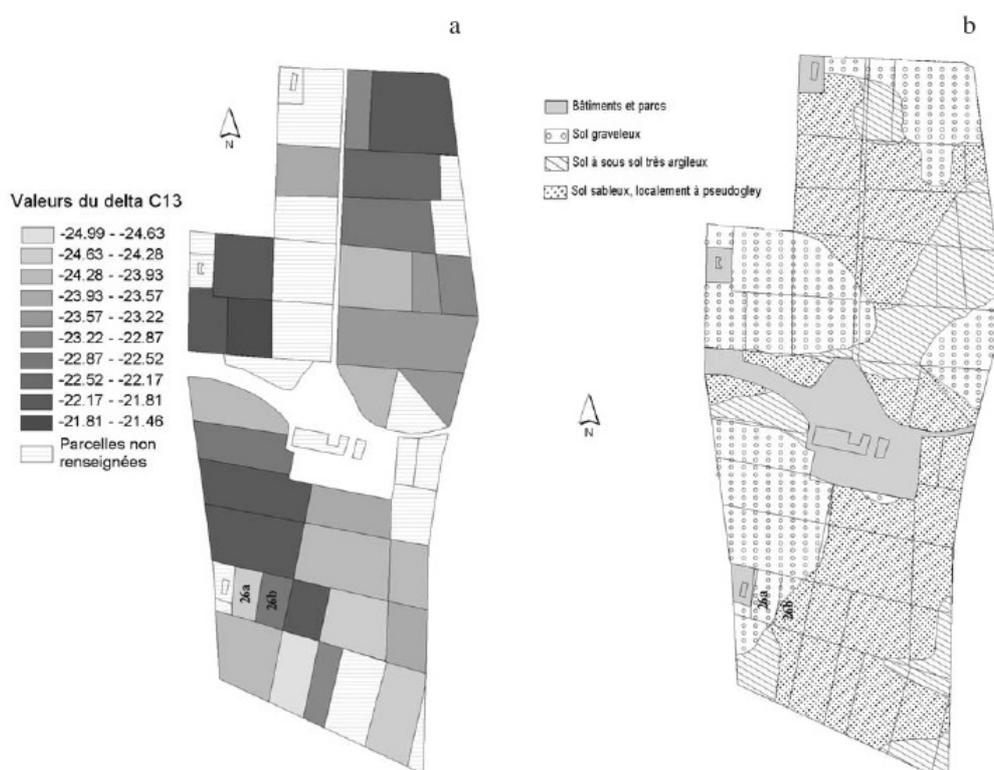


**Figure 1.** Corrélation entre le potentiel hydrique foliaire de base (valeur minimale en août) et la discrimination isotopique du carbone ( $\delta^{13}\text{C}$ ) mesurée sur les sucres du moût de Merlot à maturité (d'après Gaudillère *et al.*, 2002).

Au vu de la difficulté à raisonner le régime hydrique de la vigne à partir de mesures réalisées dans le sol, ou par modélisation, il est apparu séduisant d'aborder ce problème en effectuant des mesures directement sur la plante. Un déficit hydrique provoquera un certain nombre de modifications dans le fonctionnement physiologique de la vigne, qui sont mesurables : variations de la tension de la sève xylémienne, fermeture stomatique, déroulement de la photosynthèse... Lorsque la plante est utilisée comme indicateur de son propre état hydrique, on parle « d'indicateurs physiologiques ». Ceux-ci sont nombreux : potentiel foliaire, potentiel de base ou potentiel tige (Choné *et al.*, 2001a), micro-variations de diamètre d'organes de la vigne (Van Leeuwen *et al.*, 2000), débit de sève (Valancogne et Nasr, 1989) et transpiration. La mesure des potentiels foliaires ou de la transpiration peuvent mettre en évidence l'état hydrique instantané de la vigne avec une grande précision, mais l'extrapolation des

conditions de l'alimentation en eau de la vigne sur l'ensemble de la saison nécessite des mesures répétées sur le terrain.

La discrimination isotopique du carbone 13 (appelée  $\delta^{13}\text{C}$ ) est un autre indicateur physiologique du régime hydrique. Le  $^{13}\text{C}$  représente un peu plus de 1% du carbone dans le  $\text{CO}_2$  atmosphérique. Le  $^{12}\text{C}$ , plus léger, est préférentiellement utilisé lors de la photosynthèse. La contrainte hydrique, en provoquant la fermeture des stomates pendant une partie de la journée, ralentit les échanges de  $\text{CO}_2$  entre la feuille et l'atmosphère et limite ainsi la discrimination isotopique. Le rapport  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$  se rapproche, dans ces conditions, de celui du  $\text{CO}_2$  atmosphérique. La mesure du  $\delta^{13}\text{C}$  sur les sucres du moût à maturité constitue alors un indicateur global de la contrainte hydrique subie par la vigne au cours de la période de maturation (figure 1). L'intérêt de cet indicateur réside dans le fait que sa mesure ne nécessite pas d'intervention sur le terrain autre que le prélèvement de raisin à maturité (Van Leeuwen *et al*, 2001b, Gaudillère *et al*, 2002). Il devient alors possible d'échantillonner un grand nombre de parcelles à un coût réduit, ce qui n'est pas possible avec une chambre à pression (figure 2).



**Figure 2.** Comparaison entre le  $\delta^{13}\text{C}$  des sucres du moût mesuré en 2000 sur un grand nombre de parcelles d'une propriété (a), et la carte des textures des sols de la même propriété (d'après Van Leeuwen *et al.*, 2001b).

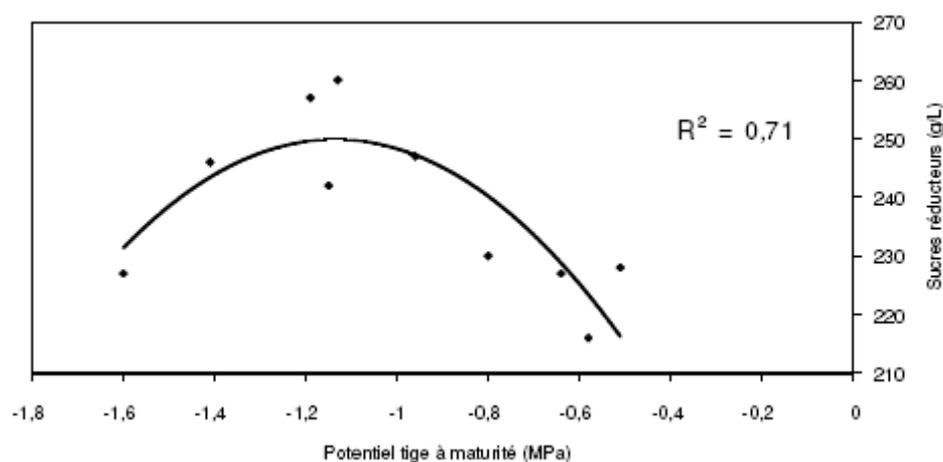
### **Incidence du régime hydrique de la vigne sur son développement et sur la constitution du raisin à maturité**

L'apparition d'une contrainte hydrique au cours de la saison modifie profondément le fonctionnement physiologique de la vigne. Elle peut s'installer plus ou moins rapidement, suivant l'année. Un déficit hydrique provoque la fermeture des stomates pendant une partie de la journée. La régulation stomatique limite la photosynthèse et sera d'autant plus intense que le déficit hydrique est sévère. La réduction de l'alimentation en eau favorise l'arrêt de croissance des rameaux de la vigne ; elle limite aussi le grossissement des baies, notamment lorsqu'elle intervient avant la véraison (Becker et Zimmermann, 1984). Lorsque les racines se trouvent dans un sol en cours d'assèchement, leurs

extrémités produisent de l'acide abscissique. Cette hormone est favorable à la maturation du raisin. Une limitation de l'alimentation en eau de la vigne induit des effets négatifs sur la maturation du raisin (limitation de la photosynthèse) et des effets positifs (production de l'acide abscissique, limitation de la compétition pour les substances carbonées par les apex en croissance, baies moins volumineuses). En cas de déficit hydrique modéré, les effets positifs l'emportent sur les effets négatifs : les raisins sont plus riches en sucres réducteurs, en anthocyanes et en tanins et moins riches en acide malique (Van Leeuwen et Seguin, 1994, Trégoat *et al.*, 2002). En cas de stress hydrique sévère, la photosynthèse se trouve trop fortement limitée et des blocages de la maturation peuvent se produire.

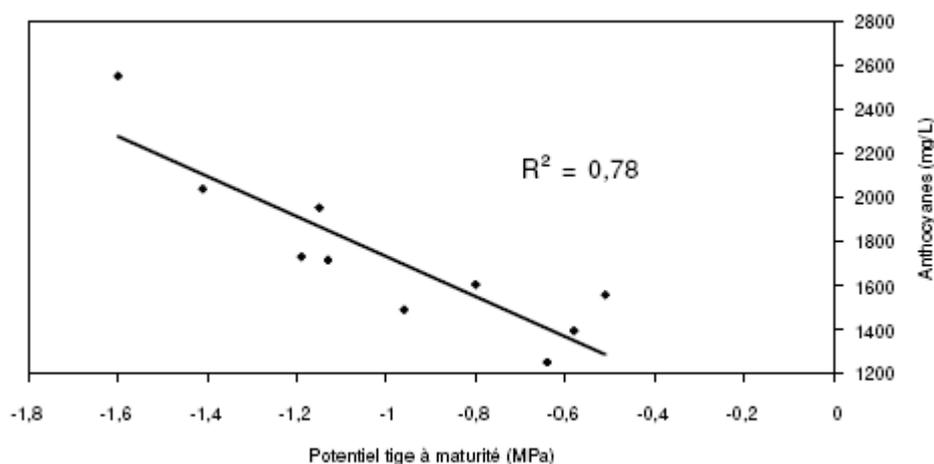
En viticulture, il est fondamental de savoir jusqu'où va le déficit hydrique, favorable à la qualité, et à partir de quel seuil commence le stress hydrique, défavorable à la qualité. La réponse à cette question dépend du type de production, du type de substance considérée et du niveau de rendement.

La plupart des études qui relient l'état hydrique de la vigne à la constitution du raisin concernent la production de vins rouges. Il est généralement admis que la plage de contrainte hydrique favorable à la qualité est plus grande pour les raisins noirs que pour les raisins blancs. Sur une exploitation qui produit à la fois du vin rouge et du vin blanc, il est, dans ces conditions, logique d'implanter les cépages rouges sur les sols avec les plus faibles réserves hydriques.



**Figure 3.** Corrélation entre l'intensité de la contrainte hydrique (évaluée par la mesure du potentiel tige à maturité) et la concentration en sucres réducteurs.

Parmi les substances favorables à la qualité des vins rouges, l'accumulation des sucres est maximale pour une alimentation en eau modérément limitante. Aussi bien en cas d'un régime hydrique moins contraignant qu'en cas de stress plus sévère, la teneur en sucre du raisin est plus faible (figure 3). Sur la même gamme de contrainte hydrique, la richesse en anthocyanes augmente de façon linéaire ; elle est la plus élevée sur la parcelle avec le régime hydrique le plus limitant (figure 4). La qualité d'un vin rouge dépend davantage de sa teneur en composés phénoliques que de la teneur en sucres du raisin à maturité. Le potentiel œnologique des raisins noirs peut donc être excellent, même si une forte contrainte hydrique pénalise légèrement la richesse en sucres du moût.

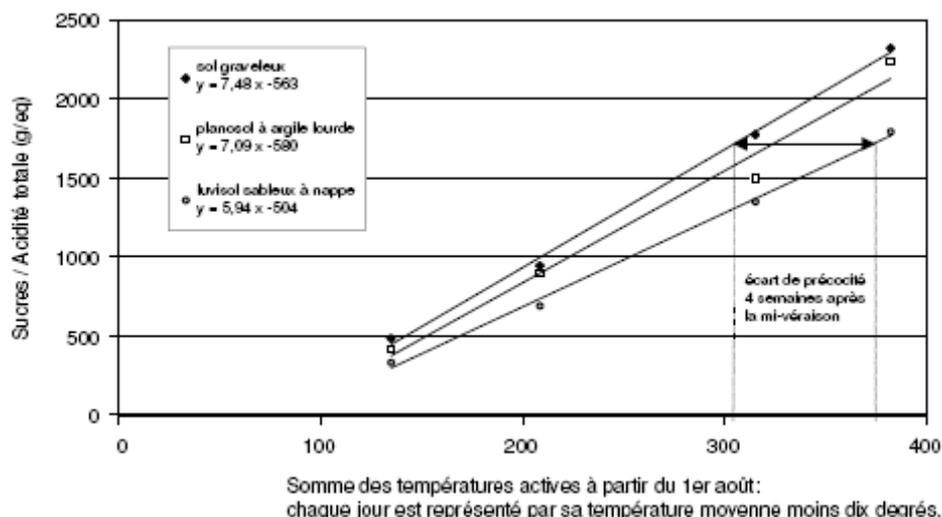


**Figure 4.** Corrélation entre l'intensité de la contrainte hydrique (évaluée par la mesure du potentiel tige à maturité) et la concentration en anthocyanes.

La question de l'effet de la contrainte hydrique sur la qualité ne doit pas être séparée du niveau de rendement. Il est observé par les praticiens que des vignes éclaircies (limitation du rendement par réduction du nombre de grappes) sont beaucoup moins sensibles aux contraintes hydriques sévères que des vignes supportant une forte charge en raisins.

### Effet de la contrainte hydrique sur la précocité de la maturité

Le moment où les raisins arrivent à maturité dépend à la fois de la précocité du cycle phénologique, qui peut être évaluée par la date de mi-véraison, et de la vitesse de maturation, qui peut être calculée d'après Duteau (1990). La précocité du cycle phénologique dépend essentiellement de la température du sol, qui est en relation avec sa teneur en eau (Morlat, 1989). La vitesse de maturation est en grande partie déterminée par le régime hydrique de la vigne (Van Leeuwen et Seguin, 1994). Un déficit hydrique est favorable à une maturation rapide, car il limite la taille des baies (et donc du compartiment à remplir avec des sucres) et il réduit la compétition pour les substances carbonées entre les baies et les apex. La figure 5 montre un exemple de l'incidence du régime hydrique sur la vitesse de maturation et la précocité de trois parcelles avec des sols très différents (Van Leeuwen et Rabusseau, résultats non publiés). Pour faire abstraction de l'influence de la température sur la vitesse de maturation, les dates sont indiquées en abscisse par la somme des températures actives à partir du premier août, calculée avec un seuil à 10°C. La vigne a subi une contrainte hydrique sur le sol graveleux et le planosol ; l'évolution de la maturité de la pulpe (rapport sucres sur acidité) est rapide dans ces parcelles. Sur le luvisol, l'alimentation en eau de la vigne a été non limitante ; la maturation de la pulpe est lente. Malgré des dates de mi-véraison très proches sur ces parcelles (le 10 août sur le sol graveleux, le 11 août sur le planosol et le luvisol), l'écart de précocité atteint 70°C.jours en somme de températures actives, soit environ 7 jours après quatre semaines de maturation.

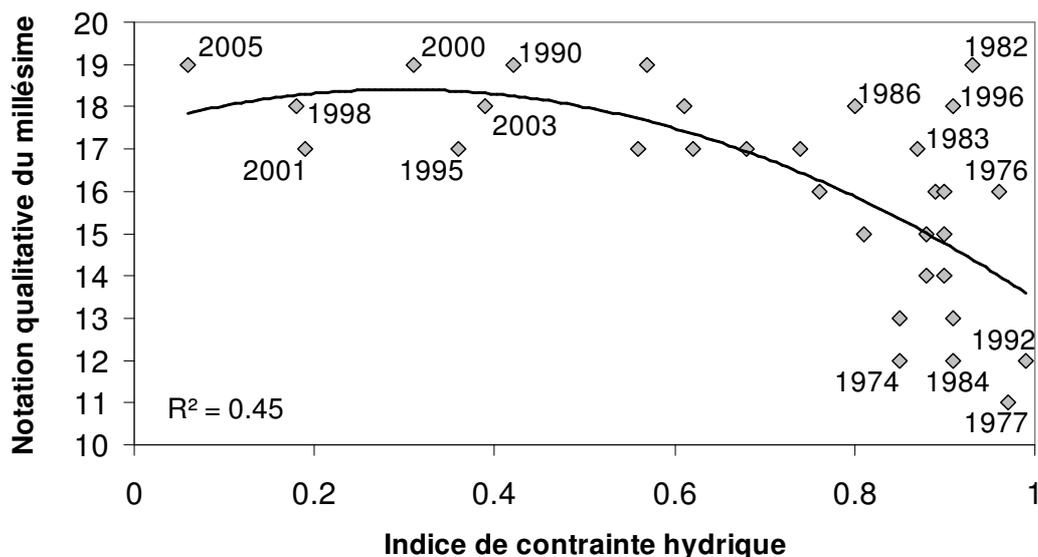


**Figure 5.** Vitesses de maturation sur trois sols de la région de Saint-Emilion (Merlot noir en 2001). Les vitesses de maturation sont calculées d'après Duteau (1990), modifié par Van Leeuwen et Rabusseau. La vitesse de maturation correspond à la pente de la droite (soit  $a$  de l'équation  $y = ax + b$ ).

Dans la grande majorité des cas, les sols humides sont à la fois des sols froids et des sols qui fournissent une alimentation en eau non limitante. Les raisins arrivent à maturité tardivement sur ces sols, car le cycle phénologique  $y$  est retardé et la maturation  $y$  est lente. Suivant le même raisonnement, la plupart des sols secs sont des sols précoces. Il existe dans certains crus très réputés du Bordelais, notamment à Pomerol, mais aussi plus localement à Saint-Emilion et dans le Haut-Médoc, des sols très argileux. Ils ont la particularité d'être riches en eau (et donc froids), mais de provoquer néanmoins des contraintes hydriques précoces. En raison de la nature des argiles (smectites) la disponibilité de l'eau (malgré son abondance)  $y$  est très faible. Ces sols sont précoces et même si on  $y$  a implanté, pour des raisons historiques, du Merlot à Pomerol, le Cabernet-Sauvignon arrive parfaitement à maturité sur le même type de sol dans le Haut-Médoc. Cet exemple montre que la contrainte hydrique joue un rôle essentiel sur la précocité de la vigne et que son effet est plus important que celui de la température du sol. Le choix du cépage par rapport au type de sol dépend en grande partie de la précocité de la parcelle. Il est donc en étroite relation avec le régime hydrique (Van Leeuwen, 2001).

## Régime hydrique et effet millésime

Le régime hydrique d'un millésime peut être évalué par le calcul du bilan hydrique. Les valeurs proposées dans la figure 6 indiquent donc pour quelques millésimes du Bordelais un indice de contrainte hydrique théorique calculé d'après Riou et Lebon (2000). Les millésimes de faible qualité possèdent sans exception un indice de contrainte hydrique proche de 1 à la fin du mois de septembre (ce qui correspond approximativement au moment des vendanges). Les millésimes où la vigne a subi une forte contrainte hydrique correspondent sans exception à de grands millésimes. Globalement à l'échelle de l'ensemble du Bordelais, il n'y a aucun millésime dont la qualité a été dépréciée par stress hydrique excessif. Cependant, ponctuellement sur certaines parcelles (notamment des jeunes vignes à système racinaire encore superficiel, fortement chargées en raisins, en sol de graves), des blocages de maturation peuvent se produire au cours d'un été très sec avec des conséquences négatives sur la qualité des vins.



**Figure 6.** Relation entre la qualité du millésime (notes /20) dans le bordelais et le niveau de contrainte hydrique subie par la vigne calculé sur la période véraison – récolte à l'aide d'un modèle de bilan hydrique. Plus la valeur de l'indice est proche de zéro, plus le millésime est sec (d'après Bois *et al.*, non publiés).

### Les possibilités de modifier le régime hydrique de la vigne

Le régime hydrique idéal pour la production de raisin à fort potentiel œnologique correspond à une situation de contrainte hydrique modérée, qui intervient tôt dans la saison (avant la véraison). À l'inverse, le potentiel œnologique du raisin sera moindre, aussi bien en l'absence de contrainte hydrique, qu'en cas de stress hydrique excessif.

La perte de qualité par un déficit hydrique insuffisant est beaucoup plus fréquente que la perte de qualité par un stress hydrique excessif, même si elle passe généralement inaperçue. Lorsque la pluviosité estivale et la réserve en eau des sols ne permettent pas d'atteindre de façon régulière un déficit hydrique suffisant, il faut augmenter la surface foliaire par hectare pour augmenter l'évapotranspiration réelle et choisir un porte-greffe qui valorise peu les réserves en eau du sol (Riparia Gloire de Montpellier par exemple). Ces situations peuvent également être valorisées par le choix de l'encépagement (cépages blancs ou cépages rouges précoces (Van Leeuwen, 2001)).

Dans les situations où il se produit certaines années une perte de qualité par stress hydrique excessif (climat très sec, sols avec de faibles réserves en eau), il est possible de limiter les effets négatifs sur la vigne par une adaptation de la conduite de la vigne et du matériel végétal (Choné *et al.*, 2001b). La meilleure protection contre les effets néfastes d'un stress hydrique est une limitation du rendement. Un rendement modéré permet d'avoir une surface foliaire moyennement faible sans altérer le rapport feuille/fruit. Le choix de porte-greffes résistants à la sécheresse (par exemple le 110 Richter) est sûrement la forme d'adaptation à la sécheresse la plus répandue. On peut également signaler qu'une faible alimentation en azote de la vigne réduit ses besoins en eau, par une limitation de la vigueur et de la surface foliaire.

Dans des situations extrêmes, et lorsque la législation le permet, le viticulteur peut avoir recours à l'irrigation. On considère que la culture de la vigne avec des rendements économiquement viables est difficile lorsque la pluviosité annuelle est inférieure à 400 mm. Cette valeur doit cependant être modulée en fonction de la répartition des précipitations au cours de l'année et de la capacité de rétention d'eau

des sols. Sous des climats très secs, l'irrigation raisonnée peut être un facteur de qualité, mais une irrigation mal conduite peut également provoquer une perte de potentiel œnologique du raisin. Lorsqu'elle est nécessaire, l'irrigation doit amener la vigne progressivement à une situation de contrainte hydrique modérée, tout en lui évitant de basculer dans une situation de stress hydrique. Ce pilotage fin de l'irrigation peut être réalisé grâce au suivi régulier de l'état hydrique de la vigne par la mesure du potentiel tige (Choné *et al.*, 2001b).

Le concept de la culture de la vigne sous contrainte environnementale a pendant longtemps été l'apanage des vignobles européens, et notamment les vignobles d'A.O.C. Il est intéressant de constater que cette notion commence à faire son chemin dans les vignobles du Nouveau Monde. Les Australiens expérimentent avec succès deux concepts d'irrigation, où l'alimentation en eau de la vigne est volontairement réduite. Dans le cas du « Regulated Deficit Irrigation » (R.D.I.), une contrainte hydrique est volontairement provoquée après la floraison par une période sans irrigation, notamment pour réduire la taille des baies (Dry *et al.*, 2001). Le « Partial Rootzone Drying » (P.R.D.) fait appel à une irrigation alternée. Avec une périodicité d'environ deux semaines, chaque côté du rang est irrigué de façon alternée. Ainsi, une partie du système racinaire se trouve en permanence dans un sol qui est en train de s'assécher. Un effet très net est constaté sur le potentiel œnologique du raisin, qui peut en partie être expliqué par une plus grande synthèse d'acide abscissique en comparaison avec des vignes irriguées et ne subissant aucune contrainte hydrique (Stoll *et al.*, 2001).

## Références bibliographiques

Becker N., Zimmermann A., 1984. Influence de divers apports d'eau sur des vignes en pots sur la maturation des sarments, le développement des baies et la qualité du vin. Bulletin O.I.V. 641-642, 584-596.

Choné X., Van Leeuwen C., Dubourdiou D., Gaudillère J.P., 2001a. Stem water potential is a sensitive indicator for grapevine water status. *Annals of Botany* 87, 477-483.

Choné X., Tregoat O., Van Leeuwen C., 2001b. Fonctionnement hydrique des terroirs, base de l'irrigation raisonnée de la vigne. *Journal International des Sciences de la Vigne et du Vin*, N° Hors série : « Un raisin de qualité : de la vigne à la cuve », 47-51.

Duteau J., 1990. Relations entre l'état de maturité des raisins (Merlot noir) et un indice climatique. Utilisation pour fixer la date des vendanges en année faiblement humide dans les crus de Bordelais. *In Actualités œnologiques* 89, pp. 7-12, Dunod (Ed.) Paris.

Dry P., Loveys B., McCarthy M., Stoll M., 2001. Strategic irrigation management in Australian vineyards. *Journal International des Sciences de la Vigne et du Vin* 35, 129-139.

Gaudillère J.P., Van Leeuwen C., Ollat N., 2002. Carbon isotope composition of sugars in grapevine, an integrated indicator of vineyard water status. *Journal of Experimental Botany* 53, 757-763.

Lebon E., Dumas V., Pieri P., Schultz H.R., 2003. Modelling the seasonal dynamics of the soil water balance of vineyards. *Functional Plant Biology* 30, 699-710.

Morlat R., 1989. Le terroir viticole : contribution à l'étude de sa caractérisation et de son influence sur les vins. Application aux vignobles rouges de la moyenne vallée de la Loire. Thèse de Doctorat d'Etat, 289 p. + annexes, Université Bordeaux II.

Riou C., Lebon E., 2000. Application d'un modèle de bilan hydrique et de la mesure de la température de couvert au diagnostic du stress hydrique de la vigne à la parcelle. *Bulletin de l'O.I.V.* 73, 755-764

Seguin G., 1970. Les sols de vignobles du Haut-Médoc. Influence sur l'alimentation en eau de la vigne et sur la maturation du raisin. Thèse de Doctorat d'Etat, 141 p., Faculté des Sciences, Université de Bordeaux.

Stoll M., Loveys B., Dry P., 2000. Hormonal changes induced by partial rootzone drying of irrigated grapevine. *Journal of Experimental Botany* 51, 1627-1634.

Tregoat O., Van Leeuwen C., Choné X., Gaudillère J.P., 2002. Etude du régime hydrique et de la nutrition azotée de la vigne par des indicateurs physiologiques. Influence sur le comportement de la vigne et la maturation du raisin. *Journal International des Sciences de la Vigne et du Vin* 36, 133-142.

Valancogne C., Nasr Z., 1989 Measuring sap flow in the stem of small trees by a heat balance method. *HortScience* 24, 383-385.

Van Leeuwen C., 2001. Choix du cépage en fonction du terroir dans le Bordelais. *Journal International des Sciences de la Vigne et du Vin*, N° Hors série : « Un raisin de qualité : de la vigne à la cuve », 97-102.

Van Leeuwen C., 2003. Le suivi du régime hydrique de la vigne et son incidence sur la maturation du raisin. *Bulletin de l'O.I.V.* 76, 367-378.

Van Leeuwen C., Choné X., Tregoat O., Gaudillère J.P., 2001a. The use of physiological indicators to assess vine water uptake and to manage vineyard irrigation. *The Australian Grapegrower and Winemaker* 449, 18-24.

Van Leeuwen C., Gaudillère J.P., Tregoat O., 2001b. Evaluation du régime hydrique de la vigne à partir du rapport isotopique  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ . *Journal International des Sciences de la Vigne et du Vin* 35, 195-205.

Van Leeuwen C., Lerich O., Renard R., Tregoat O., Alla P.L., 2000. Micromorphometric changes in trunk diameter in relation to mild water stress in field grown vines. *Journal International des Sciences de la Vigne et du Vin* 34, 41-47.

Van Leeuwen C., Seguin G., 1994. Incidences de l'alimentation en eau de la vigne, appréciée par l'état hydrique du feuillage, sur le développement de l'appareil végétatif et la maturation du raisin (*Vitis vinifera* variété Cabernet franc, Saint-Emilion, 1990). *Journal International des Sciences de la Vigne et du Vin* 28, 81-110.