

# Quels outils pour concevoir, conduire et évaluer des systèmes de culture adaptés à la contrainte hydrique ?

P. Debaeke

INRA, UMR AGIR, BP 52627, 31326 Castanet-Tolosan, France, debaeke@toulouse.inra.fr

## Résumé

*Etant donné la variabilité inter-annuelle du climat, la diversité des sols et la gamme de pratiques culturales qui jouent sur la disponibilité en eau pour les cultures, l'expérimentation agronomique classique peine à fournir rapidement les meilleurs systèmes de culture pour une situation hydrique donnée. Ceci est particulièrement vrai en région Méditerranéenne où l'accès inégal à la ressource en eau et la variabilité climatique inter-annuelle contribuent à la forte instabilité des rendements. En revanche, la modélisation dynamique apparaît particulièrement recommandée pour prendre en charge la diversité des situations agropédologiques et la variabilité climatique (fluctuations inter-annuelles ou évolution tendancielle). Les modèles de cultures permettent de simuler le rendement et la consommation en eau d'un grand nombre d'espèces en fonction du type de sol, de la conduite et du climat. Les marges de progrès concernent aujourd'hui la prise en compte de la variété, levier important de la résistance à la sécheresse. Des modèles pluri-annuels simulent le fonctionnement hydrique de la succession de cultures et d'intercultures, ce qui est important en région Méditerranéenne car le recouvrement hivernal des sols n'y est pas garanti. La prise en compte des effets du travail du sol sur le stockage de l'eau est encore insuffisante. Dans ces modèles, les décisions des acteurs peuvent être représentées sous forme de règles. A côté de ces « simulateurs », des « optimisateurs » peuvent être mis en œuvre pour rechercher le meilleur assolement ou le meilleur itinéraire technique sous contrainte de disponibilité en eau (irrigation ou eau du sol). Dans cette communication, on se propose de faire le point sur les potentialités des outils de modélisation, sur les conditions de leur emploi et sur les applications entreprises pour concevoir et évaluer des systèmes de culture adaptés à la disponibilité en eau.*

## 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 limitée et incertaine, 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 réguliers 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). 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), notamment:

- ajuster l'offre à la demande, par la création de ressources supplémentaires (retenues...);
- développer une gestion concertée locale entre acteurs autour du partage de la ressource en eau (collectifs d'irrigants...);
- ajuster la demande en eau à l'offre de ressources par la voie réglementaire, par l'incitation économique, mais aussi par des solutions agronomiques et techniques.

L'agronome est plus spécialement interrogé sur les voies et moyens techniques pour ajuster la demande en eau agricole à l'offre de ressource 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 la contrainte hydrique.

De manière très concrète, la recherche agronomique est interrogée par la profession et 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 ?
- 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 ?

Pour répondre à ces questions, l'expérimentation factorielle n'est pas adaptée, même si elle peut contribuer à produire des références sur la réponse à l'eau des cultures et des variétés (Bouthiba et al., 2008). L'expérimentation systémique permet d'évaluer des solutions intégrées d'adaptation de la conduite et de la succession de cultures à la disponibilité en eau (Nolot et Debaeke, 2003). Dans les deux cas, la variabilité inter-annuelle et intra-saisonnière des précipitations rend délicate la généralisation des résultats. C'est pourquoi, dans le domaine de la gestion de l'eau, la modélisation biotechnique est de plus en plus utilisée pour éclairer la décision, car elle permet de prendre en charge l'extrême variabilité climatique, 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).

Dans cette communication, on fera le point sur les potentialités des outils de modélisation, sur les conditions de leur emploi et sur les applications entreprises dans le cadre de ressources en eau limitées: a) pour mieux gérer l'irrigation, b) pour évaluer et concevoir des itinéraires techniques, c) pour optimiser le choix d'assolement.

On s'appuiera sur l'expérience acquise à l'INRA en partenariat avec les instituts techniques (Arvalis, Cetiom) avec qui une Unité Mixte Technologique a été constituée à Toulouse en 2007.

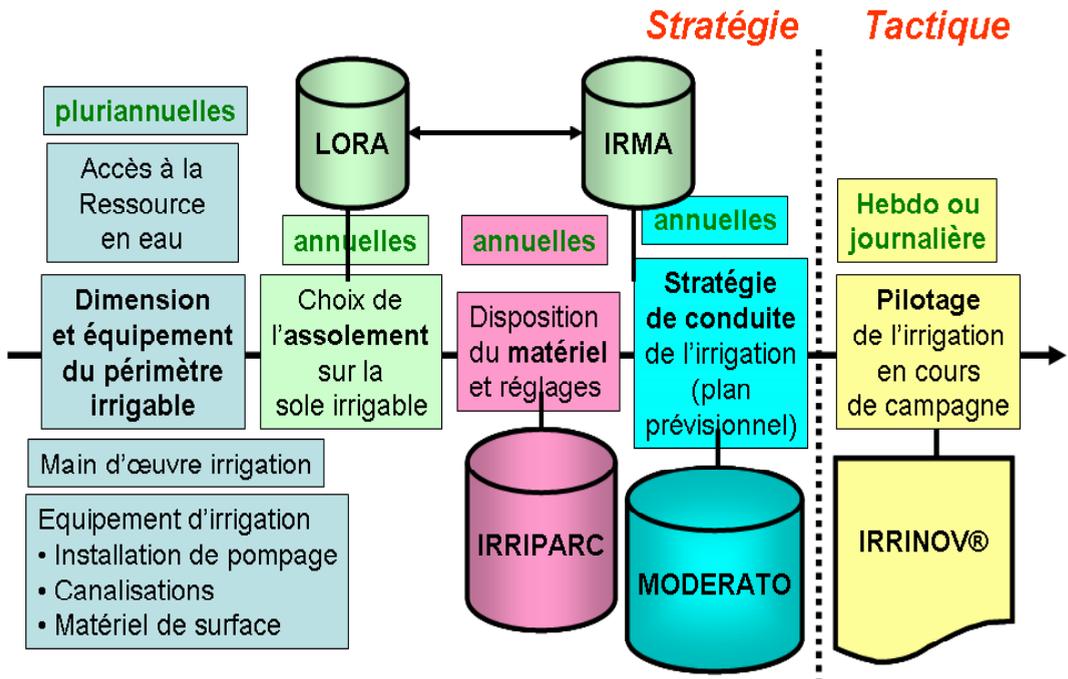
## 2. Des outils pour gérer l'irrigation

La gestion de l'irrigation peut être considérée à plusieurs échelles de temps et d'espace. A chacune de ces échelles, des progrès peuvent être faits pour mieux rationaliser l'utilisation de l'eau d'irrigation en fonction des contraintes locales de ressource. Concernant l'exploitation agricole, on a coutume de représenter l'action d'irrigation 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 (Fig. 1). A chacune de ces étapes, des outils existent ou sont en cours de développement pour améliorer la maîtrise de l'irrigation.

En ce qui concerne l'approche stratégique, on peut différencier des étapes de choix d'assolement (positionner les soles irriguées et les soles en sec, choisir les cultures irriguées ainsi que les variétés), définir un calendrier prévisionnel d'irrigation (positionner dans le temps les opérations culturales concernant l'irrigation en fonction des contraintes climatiques, agronomiques et techniques prévisibles) et contrôler les équipements. Des outils informatiques ont été conçus pour aider les techniciens et indirectement les agriculteurs à optimiser leurs choix d'assolements et leurs stratégies d'irrigation (Deumier et al., 2006). Ainsi LORA, basé sur la programmation linéaire, aide à optimiser l'assolement sur le périmètre irrigable de l'exploitation agricole (Jacquin et al., 1993). Une fois l'assolement établi, MODERATO, qui couple un modèle biotechnique 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 (Bergez et al., 2001). En effet, cet outil mobilise des algorithmes d'optimisation de stratégies

(marge brute, rendement, efficacité de l'eau...) en fonction des ressources disponibles.

En ce qui concerne les aspects technologiques de l'irrigation, on peut citer l'outil IRRIPARC développé avec le Cemagref (Deumier et al., 2003) qui a comme finalité d'aider au contrôle et au réglage des matériels d'irrigation afin de maîtriser l'uniformité d'arrosage et l'adaptation régionale aux conditions de vent.



**Figure 1 - Positionnement temporel des décisions liées à l'irrigation à l'échelle de l'exploitation agricole et outils d'aide à la décision pour une meilleure gestion de la ressource en eau (Bergez et Lacroix, 2008)**

Durant la campagne d'irrigation, différents outils sont disponibles pour maîtriser les apports d'eau, le plus simple étant 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 a montré qu'en Midi-Pyrénées, seuls un tiers des exploitants recevant le bulletin l'utilisaient pour leur pratique. Il est donc important de mieux définir le support, l'origine et le contenu des informations contenues dans le bulletin pour qu'il soit utilisé par l'exploitant.

Il existe ensuite des outils basés sur le bilan hydrique prévisionnel, comme BHYP (Deumier et al., 2005) ou IRRIBET développé pour la betterave par l'ITB ([www.itbfr.org](http://www.itbfr.org)).

Un peu plus complexe, car utilisant d'autres instruments de mesure, on peut citer la méthode IRRINOV®, développée par Arvalis pour une gamme de cultures (Deumier et al., 2005). Basée sur une approche tensiométrique 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. En se couplant à un simulateur de stratégie de conduite d'irrigation tel que MODERATO, il est possible d'améliorer le conseil basé sur de l'expérimentation en utilisant

la puissance de la simulation. Enfin, pour terminer ce panorama des outils, on peut citer le développement d'outils basés sur l'analyse d'images satellitales pour un conseil aux irrigants. C'est le cas de l'outil FarmStar développé par Astrium et Arvalis qui permet de représenter l'indice foliaire à l'échelle parcellaire et de spatialiser la contrainte hydrique subie par les cultures. On peut espérer des applications pour le conseil d'irrigation tenant compte du stade (début et fin d'irrigation).

Tous ces outils participent à l'ajustement de la demande à l'offre de ressource, certains permettent de proposer des solutions optimales en conditions de ressources restrictives, rendant acceptable une réduction de la demande. Des progrès sont encore attendus 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 en temps utile par l'exploitant.

### **3. Des outils pour évaluer des stratégies d'adaptation à la sécheresse**

Un grand nombre d'exploitations en France sont confrontées (et le seront de plus en plus) à la construction de systèmes de culture économes en eau d'irrigation, moins sensibles à la sécheresse et valorisant mieux les ressources en eau (sol, pluie). Il s'agit des exploitations irriguées (16 %) bientôt soumises à des contraintes volumétriques mais aussi des exploitations d'agriculture 'pluviale' du Sud de la Loire, souvent composées de 'petites terres'. De multiples compromis sont à trouver à l'échelle de l'itinéraire technique, de la succession de cultures et de l'assolement valorisant l'esquive, le rationnement et la tolérance face à une ressource plus limitée.

#### **3.1. 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 hivernale. 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 (Cooper et Gregory, 1987). 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 recombement 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). 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), imposée par la réglementation, contribue à dessécher davantage le profil de sol au printemps. Cependant, en France, l'effet positif des CIPAN sur 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 profonde (Aboudrare et al., 2001). 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

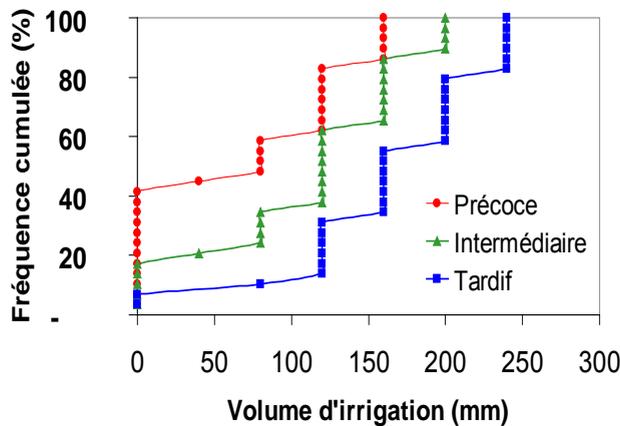
sécheresse par la simplification du travail du sol n'est attendu que dans certaines situations (labour tardif et printemps sec, non recombement de la réserve en hiver). On ne peut espérer pour autant une réduction très significative des besoins en irrigation.

Pour évaluer ces alternatives mettant en jeu l'évolution pluri-annuelle de la réserve en eau, on peut s'appuyer sur des modèles dynamiques simulant le devenir de l'eau dans le système sol-plante en fonction des successions de culture et de la gestion de l'interculture. Des analyses fréquentielles peuvent être menées sur de longues séries climatiques. On dispose aujourd'hui de plusieurs modèles de culture développés aux USA (CropSyst, EPIC, DSSAT), en Australie (APSIM) et en France (STICS) qui permettent de simuler avec une précision suffisante les bilans hydriques pluri-annuels (Plentiger et Penning de Vries, 1997; Dolling et al., 2006; Brisson et al., 2008). Cependant les conséquences des interventions réalisées en interculture sur la disponibilité en eau pour la culture suivante restent mal représentées: par exemple, l'effet du travail du sol sur l'infiltration et l'évaporation de l'eau ou l'effet du salissement en interculture sur le dessèchement du profil de sol.

### 3.2. 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. Ainsi, l'esquive peut consister à semer à l'automne une culture de printemps (pois, tournesol...) lorsque les températures hivernales le permettent afin de décaler la floraison et la période de remplissage du grain vers des périodes où le déficit hydrique ou les contraintes thermiques sont moins marquées. En France, 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 en France (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)..

L'utilisation de modèles de simulation comme STICS (Brisson et al., 2008) permet de simuler les besoins en eau d'irrigation pour différentes précocités variétales. 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 (Fig.2): les besoins médians sont respectivement de 80, 120 et 200 mm avec l'allongement du cycle végétatif (Debaeke, 2004). 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 2. - Simulation du besoin en eau d'irrigation pour le blé d'hiver à Avignon en fonction de la précocité de la variété (modèle STICS 4, 1967-2000), la dose d'irrigation est à adapter à la précocité de la variété**

### 3.3. Réduire les besoins en eau des cultures: rationnement végétatif et tolérance variétale

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 (Bouthiba et al., 2008) ou à faible conductance stomatique (Richards, 2004; Casadebaig, 2008). 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.

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). Une des limitations de ce type de modèle est la prise en compte de la variabilité génétique, notamment pour ce qui concerne la tolérance à la sécheresse, qui est peu évaluée en pratique.

Récemment, le modèle SUNFLO a été construit pour représenter le fonctionnement des variétés de tournesol (culture d'été non irriguée) et en particulier leur comportement vis à vis de la contrainte hydrique (Casadebaig, 2008). Ainsi, la question de l'adaptation du choix variétal pour différents contextes hydriques a pu être explorée largement. 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. Il a été montré qu'en milieu contraint par l'eau, on devrait privilégier des variétés à fermeture stomatique précoce, permettant de conserver la ressource en eau du sol; les variétés devraient être plutôt précoces avec une surface foliaire suffisante pour ne pas être trop

pénalisées par le stress hydrique. À l'inverse, en milieu productif, on devrait favoriser 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 aurait moins d'importance que la tardiveté. Ainsi, à l'aide d'un modèle de simulation à paramètres variétaux, il est possible de proposer un conseil variétal standard dans la plupart des régions de production françaises 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.

#### 4. 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 culturels et des espèces afin de répartir les risques climatiques et de disposer de solutions d'esquive (Amigues et al., 2006). Le choix des espèces est à adapter à la réserve utile du sol. En France, dans les petites terres à cailloux de la zone intermédiaire, 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.

À 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, 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. 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 Arvalis 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 par culture (Cabelguenne et al., 1982), en considérant 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.

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 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.

## Références

- Agreste, 2005. L'irrigation, un outil de développement en voie de stabilisation, Agreste Aquitaine n°3, 03/05.
- Aboudrare A., Debaeke P., Bouaziz A., Chekli H., 2006. Effects of soil tillage and fallow management on soil water storage and sunflower production in a semiarid Mediterranean climate. *Agric. Water Manag.* 83, 183-196
- 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 (en ligne sur [www.inra.fr](http://www.inra.fr)).
- 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. *Ecol. Model.* 137, 43-60.
- Bergez J.E., Lacroix B., 2008. Gestion de l'irrigation: du stratégique au tactique. Quelques apports de la recherche. *Innovations Agronomiques* 2, 59-69.
- 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. *Irrig. Sci.* 26, 239-251.
- Bouthier A., 2005. Irrigation des céréales: pour sécuriser rendement et qualité. *Persp. Agric.* 313, 68-71.
- Brisson N., Launay M., Mary B., Beaudoin N. (eds.), 2008. Conceptual basis, formalisations and parameterization of the STICS crop model. Editions QUAE, c/o, INRA, Versailles, 297 p.
- 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 Manag.* 3, 57-62
- Debaeke P., 2003. Supplemental irrigation. In: B.A. Stewart, T.Howell (eds), *Encyclopedia of Water Science*, 537-539. Marcel Dekker, Inc., New York.
- 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., Bertrand M., 2008. Evaluation des impacts de la sécheresse sur le rendement des grandes cultures en France. *Cah. Agricultures* 17, 437-443.
- Debaeke P., Cabelguenne M., 1994. Influence of previous crop on available water for a subsequent winter wheat on a deep silty clay soil. *Proc. 3rd ESA Cong., Padova (Italy)*, 682-683.
- Deumier J.M., Balas B., Leroy P., Jacquin C., 1996. Maîtrise des systèmes irrigués. Gestion d'un équipement existant. *C.R. Acad.Agric.Fr.* 82 (5), 89-102.
- 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*, <http://afeid.montpellier.cemagref.fr/Mpl2003>.
- 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., Leroy P., Jacquin 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* » (JR Tiercelin & A.Duval coord), 2ème édition, Lavoisier TEC & DOC (Paris), pp. 1120-1150.
- Dolling P.J., Fillery I.R.P., Ward P.R., Asseng S., Robertson M.J., 2006. Consequences of rainfall during summer-autumn fallow on available soil water and subsequent drainage in annual-based cropping systems. *Aust. J. Agric. Res.* 57, 281-296.
- 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. *Persp. Agric.* 322, 19-33.
- Dubuisson B., Moisselin J.M., 2006. Evolution des extrêmes climatiques en France à partir des séries observées. *La Houille Blanche*, 6-2006, 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.
- Dregne H.E, Willis W.O. (eds), 1983. *Dryland Agriculture*. ASA Monograph 23. American Society of Agronomy, Madison, Wisconsin, USA.
- Gerik T, Freebairn D., 2004. Management of extensive farming systems for drought-prone environments in North America and Australia. *Proc 4th Int. Crop Science Cong, 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. *Persp. Agric.* 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. *Proc. 7th ESA Cong., 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 ? *Persp. Agric.* 321, 62-68.
- Nolot J.M., Debaeke P., 2003. Principes et outils de conception, conduite et évaluation de

systèmes de culture. Cah. Agricultures 12, 387-400

Passioura J.B., 1977. Grain yield, harvest index and water use of wheat. J. Aust. Inst. Agric. Sci. 43, 117-120.

Plentiger M.C., Penning de Vries F.W.T.(eds), 1997. Rotation models for ecological farming, AB-DLO & C.T.de Wit Graduate School for Production Ecology, Wageningen (The Netherlands), Quantitative Approaches in Systems Analysis N°10.

Richards R.A., 2006. Physiological traits used in the breeding of new cultivars for water-scarce environments. Agric. Water Manag. 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 Res.77, 17-30.

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 Res. 20, 219-240

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

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)