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

Philippe Debaeke, Magali Willaume, Pierre Casadebaig, Jean Marie Nolot

▶ **To cite this version:**

Philippe Debaeke, Magali Willaume, Pierre Casadebaig, Jean Marie Nolot. Raisonner les systèmes de culture en fonction de la disponibilité en eau. Innovations Agronomiques, 2008, 2, pp.19-36. 10.17180/d4vp-8e98 . hal-02667397

HAL Id: hal-02667397
https://hal.inrae.fr/hal-02667397

Submitted on 3 May 2021

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

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

Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0 International License

Innovations Agronomiques (2008) 2, 19-36

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

Philippe Debaeke[(1)*], Magali Willaume[(2)], Pierre Casadebaig[(1)], Jean-Marie Nolot[(3)]

[(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, esquive, 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, 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[1] ?
- 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. Eléments 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 esquive, rationnement et tolérance.

[1] 15 % des sols français ont moins de 80 mm de réserve utile, source : INFOSOL, INRA Orléans

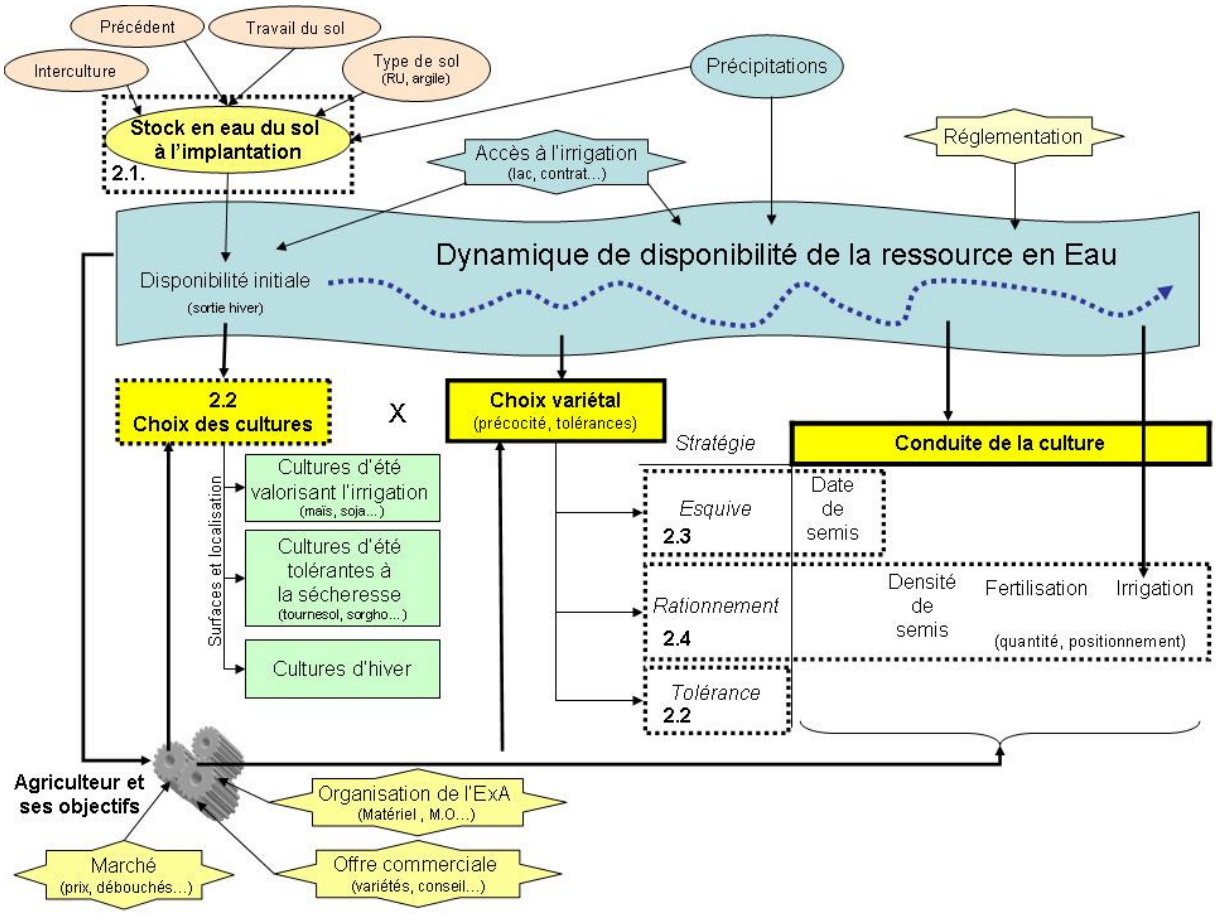

Figure 1 : Principales étapes du raisonnement des systèmes de culture contraints par une disponibilité en eau limitée (les chiffres font référence aux paragraphes correspondants)

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)[2]. 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

[2] 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 recomblement de la réserve en hiver). On ne peut espérer pour autant une réduction très significative des besoins en irrigation.

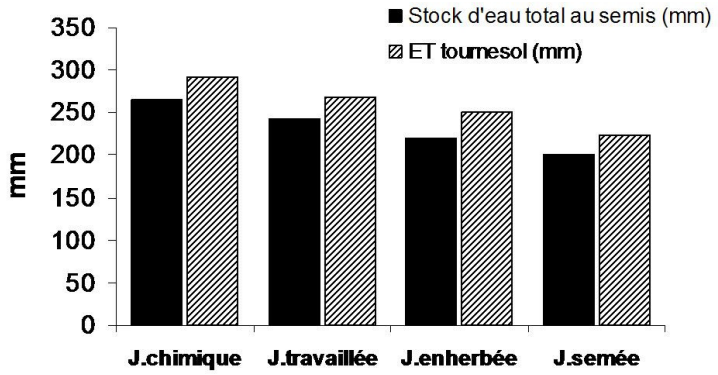

Figure 2 : Effet du mode de gestion de l'interculture blé – tournesol (jachère) sur le stock en eau au semis du tournesol et sur sa consommation (Meknès, Maroc), Debaeke et Aboudrare (2004)
J.chimique: traitement glyphosate, non travail du sol ; J.travaillée : hersage début Décembre ; J.enherbée : repousses blé et adventices; J.semée : semis d'orge mi-Octobre ; 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.

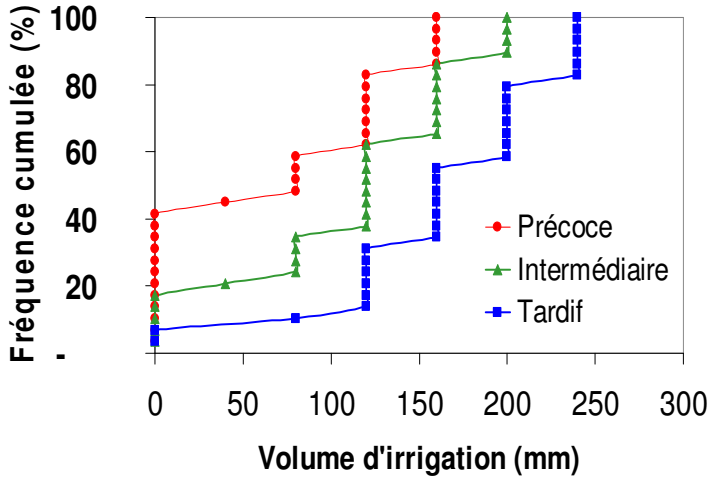

Figure 3 : Simulation du besoin en eau d'irrigation pour le blé d'hiver à Avignon en fonction de la précocité d'épiaison de la variété (modèle STICS 4, 1967-2000) - Debaeke (2004)

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 (Kc), 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.

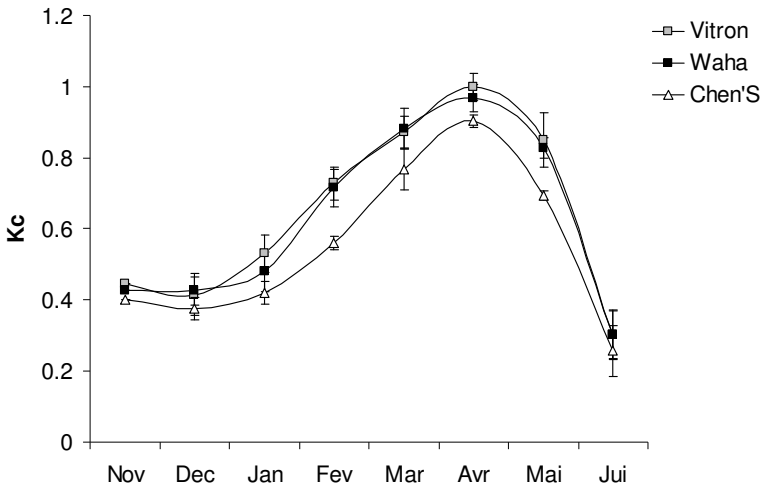

Figure 4 : Comparaison du coefficient cultural pour 3 variétés de blé dur en Algérie (4 années).

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 culturaux 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 »	❑ Viser le rendement potentiel ou une qualité particulière ❑ Satisfaire des besoins en eau, azote et protection phytosanitaire, mais sans majoration d'assurance sur les intrants ❑ 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 »	❑ Réduire le besoin en eau, le niveau de protection phytosanitaire, les charges opérationnelles et le temps de travail ❑ 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. ❑ 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). ❑ Choisir des cultures et variétés tolérantes : sorgho, tournesol, pois d'hiver, blé dur
C – Rustique et simple Non irrigué « Préserver l'outil de production »	❑ Rationner (objectif de rendement réduit) et esquiver les problèmes agronomiques ❑ Maintenir la fertilité physico-chimique et biologique du milieu à moyen terme ❑ 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^{-1} en B et de 50 kg N.ha^{-1} en C. A titre de comparaison, le maïs en A, a reçu 190 mm d'irrigation et 195 kg N.ha^{-1}.

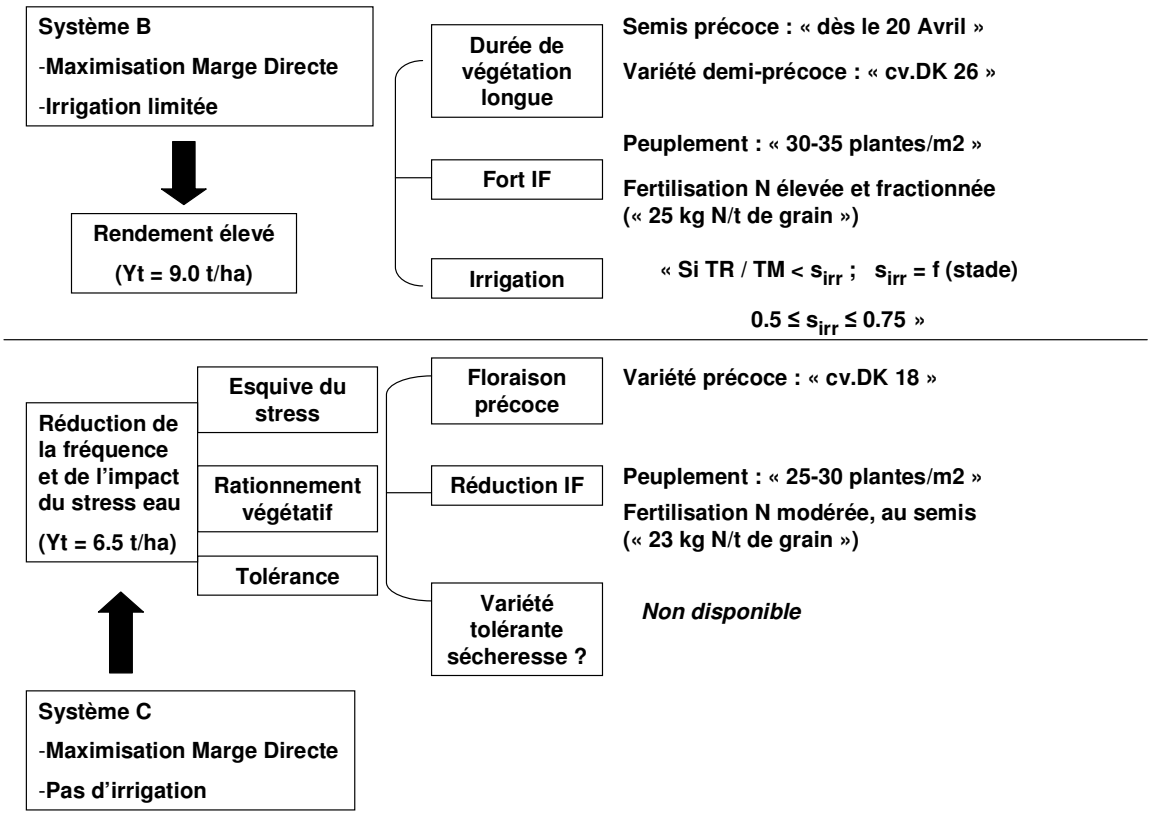

Figure 5 : Construction des règles de décision pour deux sorghos selon l'accès à l'irrigation (Debaeke et al., 2006).

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).

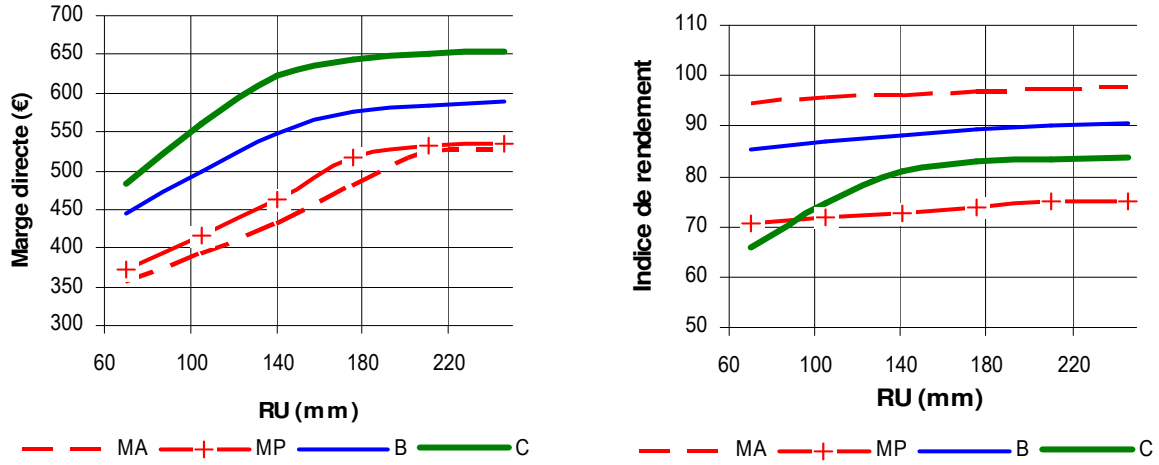

Figure 6 : Marge directe (produit brut –[charges opérationnelles + charges matérielles]) et indice de rendement (en % du rendement potentiel de chaque culture), en fonction de la réserve utile (RU). (Contexte : prix 2005, climat moyen 1994-2007, eau à 0.75 €/mm)

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.

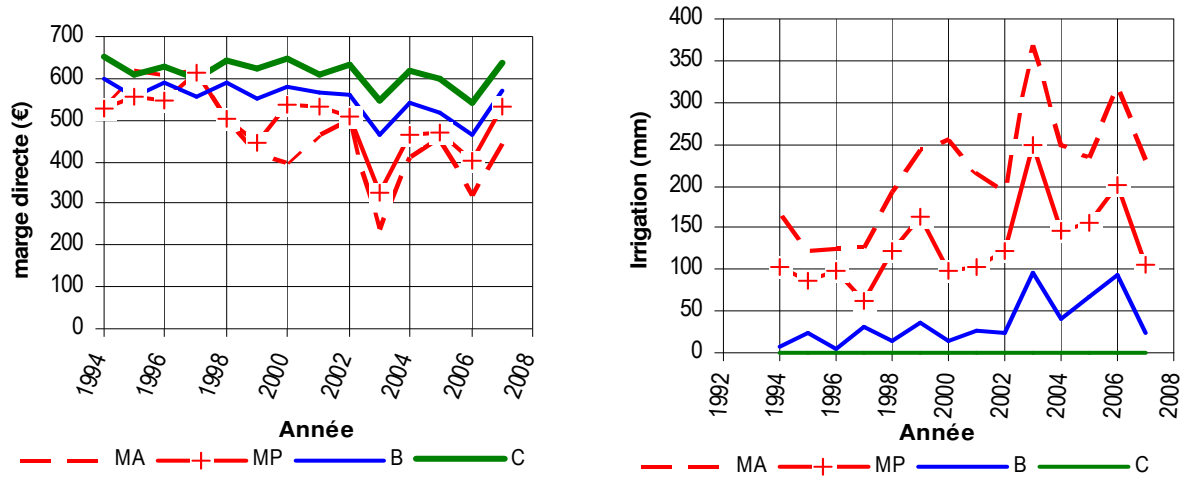

Figure 7 : Influence de la variabilité interannuelle du climat sur la marge directe et le volume d'eau utilisé pour l'irrigation (Contexte : prix 2005, RU 105 mm, eau à 0.75 €/mm)

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.

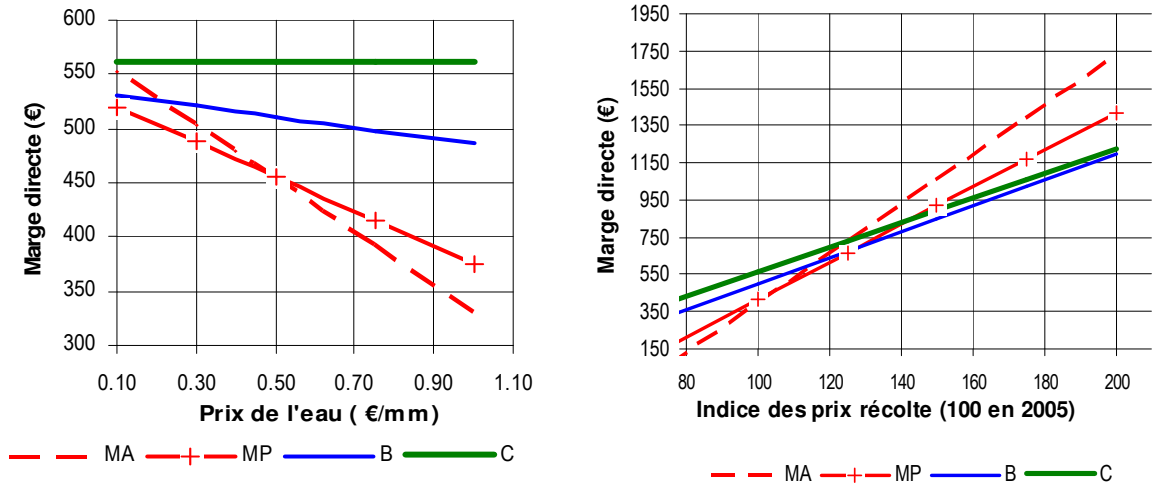

Figure 8 : Marge directe en fonction des évolutions possibles du prix de l'eau (valeur 2005 : 0.75 €/mm) et de l'indice des prix de vente des récoltes (base 100 en 2005, évolution identique des prix des différentes cultures) (contexte : RU 105 mm, climat moyen 1994-2007, eau à 0.75 €/mm ou prix récolte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

Un prix de l'eau élevé favorise économiquement des systèmes moins exigeants en eau (par ordre croissant maïs 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.

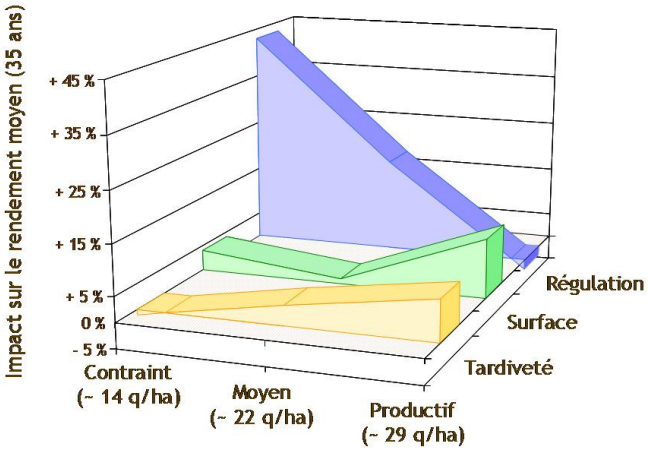

Figure 9 : Réponse relative du rendement du tournesol pour trois traits observés au sein de la gamme variétale : Régulation (Fermeture stomatique précoce vs tardive), Surface (Surface foliaire forte vs faible), Tardiveté (Durée post-floraison longue *vs.* courte) et pour trois milieux différant par leur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

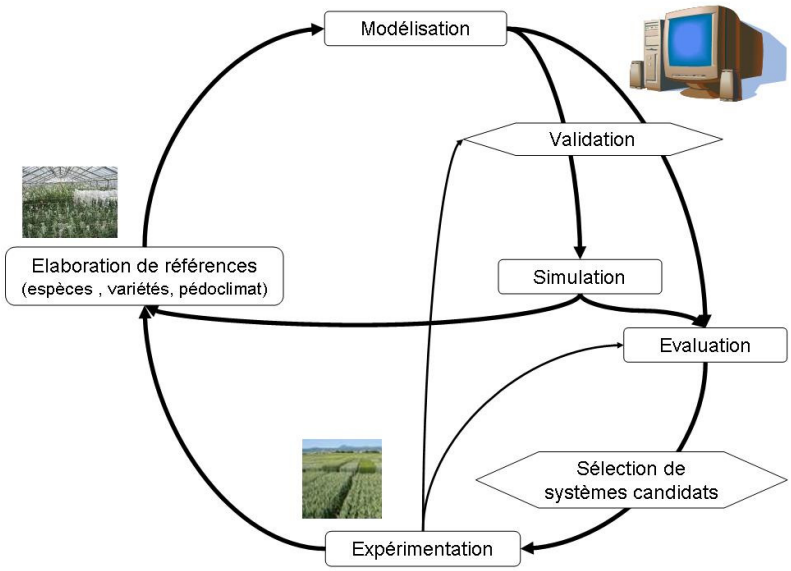

Figure 10 : Démarche de recherche pour améliorer l'adaptation des systèmes de culture à diverses disponibilités en eau

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 (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-authors), 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 4th International Crop Science Congress, Brisbane (Australia), www.cropscience.org.aus, 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 mais 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