

2.2. Adaptations agronomiques au risque de sécheresse

2.2.1. Systèmes de grande culture

Philippe Debaeke (INRA, Toulouse), Jean-Claude Mailhol (Cemagref, Montpellier), Jacques-Eric Bergez (INRA, Toulouse)

L'objet de cette section est d'envisager quelles solutions peuvent être proposées :

- pour réduire la sensibilité à la sécheresse des systèmes de grande culture non irrigués ou à irrigation restrictive,
- pour réduire la consommation d'eau en systèmes fortement irrigués.

2.2.1.1. Bases pour le raisonnement des itinéraires techniques en conditions d'eau limitante

2.2.1.1.1. Le modèle d'élaboration du rendement

Lorsque l'eau est le principal facteur limitant, Passioura (1977) préconise de décomposer le rendement des cultures en 3 termes largement indépendants :

$$\text{Rendement (R)} = \text{Transpiration (T)} \times \text{Efficacité de Transpiration (TE)} \times \text{Indice de récolte (IR)}$$

On peut décomposer également le terme T de la façon suivante (Es = évaporation du sol) :

$$T = (T+Es) / (1+Es/T)$$

L'amélioration du rendement s'obtient ainsi en augmentant la quantité totale d'eau disponible pour la culture (T+Es), l'efficacité de transpiration (TE) et l'indice de récolte (IR), mais en diminuant la contribution de Es (Es/T).

Comment le système de culture peut-il influencer les différents termes de l'élaboration du rendement en condition d'eau limitante ?

1. En augmentant la quantité d'eau initiale et son extraction par la culture (T+Es). Ceci passe par le choix de situations à forte disponibilité initiale (profondeur du sol, stock hydrique laissé par la culture précédente...), par l'augmentation de cette disponibilité (meilleure infiltration par le travail profond, extraction profonde après sous-solage, irrigation...) et par la limitation des pertes par évaporation (désherbage, gestion des résidus, travail du sol minimum...).
2. En diminuant le rapport Es/T par le mulching, mais aussi par la couverture rapide du sol par la culture (viguer de la variété, densité de peuplement élevée, fumure starter...).
3. TE est plus élevée lors des phases de faible demande évaporative (printemps). Ceci peut être atteint par des cultures d'hiver ou des variétés très précoces (cultures semées tôt au printemps) tolérant les basses températures.
4. Diminuer la demande en eau en période végétative pour conserver la ressource tardivement est souvent évoqué parmi les stratégies d'adaptation. Ceci s'obtient par un rationnement végétatif (réduction de la densité de peuplement ou de l'azote, défoliation partielle, modulation de l'interrang...). Le principe est d'optimiser la contribution de la transpiration post-floraison à la transpiration totale pour augmenter IR. Un ratio du type 2 (pré-floraison) / 1 (post-floraison) est souvent préconisé.

Selon Richards (2006) citant plusieurs réussites de la sélection, le progrès génétique sur le rendement pour les conditions d'eau limitées s'est opéré en augmentant T, TE et/ou IR selon les cas. En particulier, un allongement de la durée de végétation active et une meilleure prospection racinaire ont contribué à augmenter la quantité d'eau transpirée. La sélection en céréales a recherché une plus grande vigueur initiale et un indice foliaire plus élevé afin de réduire le rapport Es/T.

2.2.1.1.2. La réponse à l'eau des cultures

De nombreux travaux dans les années 1970-80 se sont consacrés à l'établissement de fonctions de production "eau", mettant en relation rendement relatif (par rapport au rendement d'une culture bien alimentée en eau) et évapotranspiration relative (par rapport à la consommation en eau d'une culture bien alimentée) (voir, par exemple, Cabelguenne et al., 1982). Une synthèse de la littérature mondiale sur le sujet a été réalisée par la FAO (Doorenbos et Kassam, 1979). Ces fonctions de production ont été utilisées très fréquemment par les économistes dans le cadre de l'optimisation du choix d'assolement (Leroy et Jacquin, 1994).

La Figure 1 illustre cette réponse pour quelques cultures du Sud-Ouest à partir de résultats expérimentaux plus récents. On distingue ainsi 4 groupes de cultures selon leur **sensibilité au défaut d'alimentation en eau**, soit, par ordre décroissant de tolérance au déficit d'alimentation en eau : 1) tournesol ; 2) sorgho et blé ; 3) pois et soja ; 4) maïs.

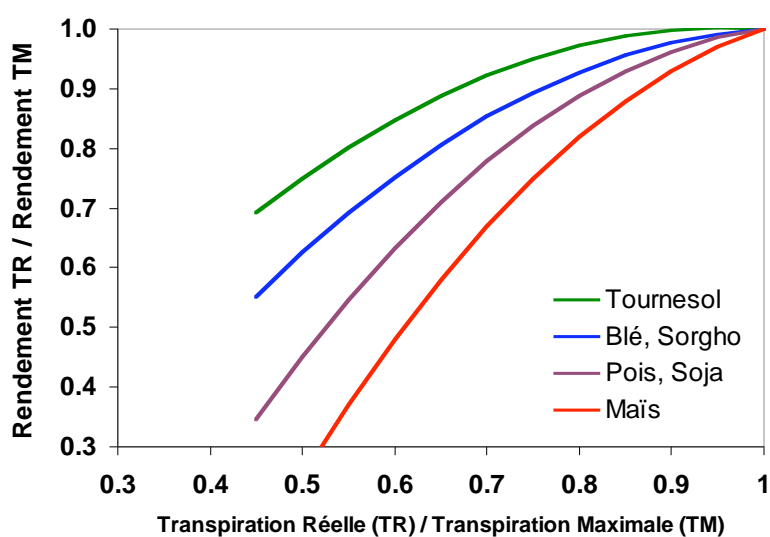


Figure 1. Réponse du rendement de 4 types de cultures au niveau de satisfaction du besoin en eau (Debaeke et Nolot, 2006)

D'autres travaux ont étudié la réponse du rendement des cultures à des doses croissantes d'irrigation, montrant ainsi une réponse maximale pour le maïs mais une meilleure réponse pour le sorgho aux plus faibles doses d'irrigation (par exemple : Stone et al., 1996, au Kansas). Les résultats sont plus concluants encore si l'on prend en compte la consommation d'eau (pluie + sol + irrigation) et non la dose d'irrigation (Cabelguenne et al., 1982).

A partir de ces travaux, on peut conclure à des différences d'**efficacité de l'eau consommée** (kg de grain produit par mm d'eau consommée) selon les cultures, tout en se rappelant que le classement entre cultures varie avec le taux de satisfaction du besoin en eau. Le Tableau 1 présente des résultats issus de 3 publications indépendantes déjà anciennes. Les plantes en C4 sont les plus efficaces : en premier lieu le maïs (13-16 kg de grain par mm d'eau consommé) puis le sorgho (13-15). L'efficacité du tournesol et du soja est nettement plus faible, le blé ayant une efficacité intermédiaire.

Les **besoins en eau d'irrigation** varient évidemment selon les sols et les climats. Cependant, dans les régions où l'irrigation de complément est pratiquée, c'est le maïs qui reçoit les plus forts volumes d'irrigation, car les apports sont justifiés chaque année et les doses fluctuent entre 150 et 300 mm : cycle estival, réponse croissante à l'eau d'irrigation et période critique autour de la floraison expliquent ces pratiques.

Tableau 1. Consommation d'eau et efficacité en eau pour quelques grandes cultures

a) Consommation en eau de 5 grandes cultures d'été (Hattendorf et al., 1988) – Kansas (USA)

	Maïs	Soja	Tournesol	Sorgho	Haricot
Consommation d'eau (mm)	565	541	545	484	424
Efficacité de l'eau pour la production de biomasse (kg/mm)	35.6	16.2	20.5	32.4	15.8
Efficacité de l'eau pour la production de grain (kg/mm)	13.4	5.5	4.2	13.0	4.9

b) Consommation en eau de 3 grandes cultures d'été : non irrigué *versus* irrigué à la satisfaction du besoin (Stone et al., 1996) – Kansas (US) – 14 ans (1974-1987)

	Maïs		Sorgho		Tournesol	
Irrigation (mm)	0	420	0	420	0	245
Consommation d'eau (mm)	351	644	359	663	355	576
Efficacité de l'eau pour la production de grain (kg/mm)	8.3	15.2	15.2	11.7	6.0	5.4

c) Consommation en eau de 4 grandes cultures d'été irriguées (Cabelguenne, 1981) – 11 ans, Toulouse

	Maïs	Soja	Tournesol	Sorgho
Irrigation ETM (mm)	215	175	180	155
Consommation d'eau (mm)	520	520	490	450
Réponse moyenne à l'irrigation (q/ha)	+31	+8	+7	+19
Efficacité de l'eau pour la production de grain (kg/mm)	16.3	6.4	6.1	14.0

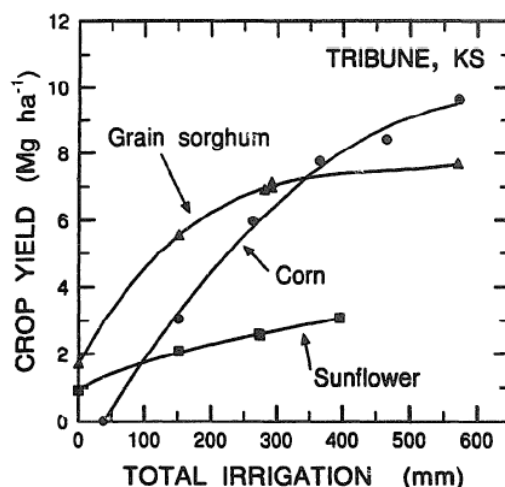
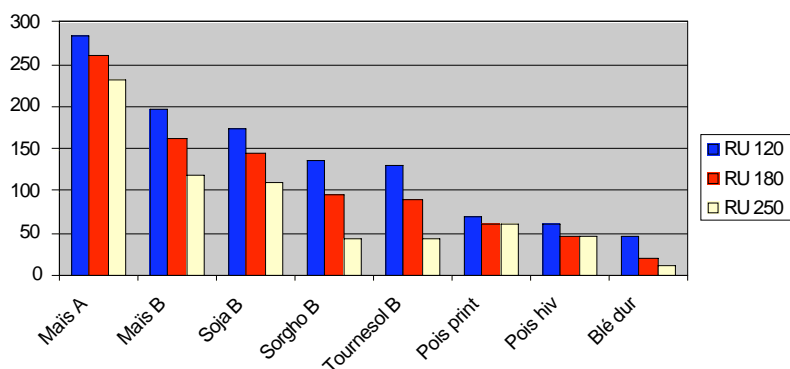


Figure 2. Réponse du maïs, du sorgho et du tournesol à l'irrigation (Stone et al, 1996)

La Figure 3 illustre le besoin moyen en irrigation dans la région toulousaine (20 années climatiques : 1984-2004), pour 3 types de sol variant par leur réserve utile. Comme le maïs valorise bien l'irrigation, tant sur le plan agronomique qu'économique, la satisfaction maximale du besoin en eau est recherchée (230-280 mm selon les types de sol : conduite A). Dans la pratique, il est plus difficile d'atteindre ce niveau d'irrigation pour des raisons hydrauliques, organisationnelles et réglementaires. Teyssier (2006) montre en effet que les apports d'irrigation sur le maïs-grain en Midi-Pyrénées varient entre 100 mm et 210 mm pour la période 2001-2005, ce qui traduit plutôt une conduite B.

Pour les autres cultures, en partie pour des raisons de pathologie mais aussi d'économie, on ne cherche pas à satisfaire le besoin en eau. Dans le Sud-Ouest, il est en général justifié d'irriguer les cultures d'été chaque année (soja, sorgho) : ce n'est pas le cas pour le blé d'hiver, où la fréquence est de l'ordre d'1 année sur 4.



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

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

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

Source : Debaeke et Nolot, 2006

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

On distingue ainsi des **cultures efficaces en eau** (comme le maïs), des **cultures tolérantes à la contrainte hydrique** (comme le sorgho ou le tournesol) et des **cultures économes en eau d'irrigation** (comme les céréales d'hiver qui exigent moins fréquemment de l'irrigation, et des apports limités à des périodes où la concurrence pour les usages de l'eau est plus faible).

Une évaluation du besoin en irrigation ne peut se restreindre à la parcelle. Dans le Tableau 2, nous avons tenté d'évaluer les quantités d'eau d'irrigation mobilisées par les différentes cultures à l'échelle nationale : on tient compte ici de la surface irriguée et du volume moyen d'irrigation. Etant donné l'imprécision sur les volumes d'irrigation, seul l'ordre de grandeur de la consommation nationale doit être retenu.

Tableau 2. Utilisation de l'eau d'irrigation pour différentes espèces de grande culture

	Blé d'hiver	Colza	Pois	Maïs grain	Sorgho	Soja	Tournesol	Betterave	Pomme de terre
* Surface (x 1000 ha)	5 248	1 176	429	1 764	59	78	728	409	162
* Taux global d'irrigation (%)	0,5**	0	14,5	44,5	3 ⁺	40,5	2	7,5	36
Volume moyen d'irrigation (m ³ /ha)	400 ⁺	0	650 [°]	1 300 [°]	600 ⁺	900 ⁺	600 ⁺	800 ⁺	800 [°]
Consommation irrigation (Mm3)	10	0	40	1 020	1	28	9	25	47
Période d'irrigation	Avril-Mai	-	Mai	Juin-Août	Juillet	Juillet-Août	Juillet	Juillet-Août	Juin-Juillet

* : SCEES 2000 (Agreste, 2001); ° : SCEES 2001 (Agreste, 2004) ; ⁺ estimation (ordres de grandeur) ; ** en forte progression

Le maïs est ainsi la culture la plus consommatrice d'eau pour l'irrigation : les quantités d'eau mobilisées pour l'irrigation sont plus de 6 fois supérieures à l'ensemble des autres grandes cultures réunies (volume/ha et surfaces sont supérieurs). La mobilisation des ressources est estivale.

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

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

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

Blé et pois mobilisent l'irrigation en avril-mai, lorsque les autres demandes sont plus faibles. Colza, tournesol et soja sont les cultures les moins efficaces pour la production de grain. Cependant si l'on raisonne en équivalents énergétiques, ces cultures oléagineuses expriment une efficacité plus proche de celle des céréales en C3.

Le colza n'est pas irrigué en raison de son cycle anticipé (esquive) et de son enracinement profond ; l'irrigation pourrait être justifiée à la levée dans les régions méridionales.

2.2.1.2. Cas des systèmes pas ou peu irrigués

Ces situations correspondent à 80-90% de la surface agricole utile dans les régions où l'irrigation est la plus pratiquée, à savoir Aquitaine, PACA, Alsace, Midi-Pyrénées et Poitou-Charentes (Agreste, 2001).

La solution d'ajustement la plus immédiate est déjà pratiquée par les agriculteurs. Elle concerne la modification de la composition de l'assolement, avec une augmentation des cultures esquivant la contrainte hydrique (semis d'hiver) ou tolérant la sécheresse estivale (cultures d'été comme le tournesol ou le sorgho). Ces ajustements, qui font l'objet de nombreux articles dans la presse agricole depuis 2003, ont été examinés dans le Chapitre 1.2. du présent rapport.

La littérature scientifique abonde en références sur les stratégies d'adaptation à la contrainte hydrique, qu'il s'agisse de systèmes non irrigués ou bénéficiant d'une irrigation de complément (cf. synthèses de Loomis, 1983 ; Connor et Loomis, 1991 ; Turner, 2004 a-b ; Debaeke et Aboudrare, 2004 ; Passioura, 2006). Ces travaux sont souvent menés dans des régions semi-arides où le déficit hydrique est structurel (Australie, Chine, Inde, USA...) (Robinson, 2003). La transposition des solutions techniques ne peut se faire directement, bien que les concepts de base restent valables. Force est de constater que très peu de travaux européens abordent les stratégies d'adaptation à la sécheresse. Les études sur l'irrigation de complément sont plus nombreuses en particulier en France (INRA, ARVALIS-Institut du végétal, Cetiom, Cemagref) et en Italie.

Analysons ici les 5 options qui peuvent être mises en œuvre en l'absence d'irrigation.

2.2.1.2.1. Modifier le positionnement du cycle cultural pour s'ajuster à la ressource disponible (quantité, répartition)

Cette option passe par plusieurs voies : (i) un changement marqué du cycle cultural, (ii) le choix de précocités variétales ou (iii) de dates de semis permettant une esquive de la sécheresse par un décalage du cycle (en général une avancée du cycle).

. Choix de cultures semées à l'automne ou en fin d'hiver (colza, blé, orge) au lieu de cultures d'été semées au printemps (avril-mai).

Les cultures d'hiver (céréales à paille, colza), dont la phase de croissance active se déroule durant les périodes de demande évaporative modérée mais dont la durée de végétation est plus longue, consomment sensiblement autant d'eau que les cultures d'été (maïs, sorgho) **non irriguées** à cycle plus court mais à demande évaporative plus forte¹. Les phases sensibles (début floraison et premières phases de croissance du grain) des cultures d'hiver sont avancées par rapport aux périodes où le risque de déficit hydrique est le plus fort.

Ainsi, sous climat méditerranéen, les cultures sont semées à l'automne ou en hiver et reçoivent des précipitations variables mais généralement suffisantes pour assurer les besoins de la culture jusqu'à l'anthèse (Ludlow et Muchow, 1990 ; Turner, 2004b). Des fluctuations de la disponibilité en eau peuvent provenir du degré de remplissage hivernal de la réserve du sol. Le rendement des cultures (céréales ou légumineuses d'hiver) est limité par la sécheresse et les hautes températures post-anthèse (responsables d'échaudage physiologique).

¹ Cependant si l'on tient compte de la période de sol nu (interculture) où l'évaporation du sol se manifeste, l'évapotranspiration est plus importante pour une culture d'été

Pour une même espèce, l'alternative automne-hiver *versus* printemps est parfois possible. Il peut s'agir d'un changement de type variétal (par exemple, pois d'hiver photopériodique ou non au lieu du pois de printemps ; blé de type hiver plutôt que alternatif...). Ce changement de période de semis permet ainsi de s'affranchir de l'irrigation pour des cultures comme le pois dans le Sud-Ouest (Encadré 1).

Encadré 1. Pois d'hiver versus pois de printemps : supprimer l'irrigation de complément ?

La sélection de variétés de pois photopériodiques, tolérantes au froid et aux maladies, est une alternative à l'irrigation du pois de printemps. Les semis d'hiver étaient déjà pratiqués dans le Sud-Ouest mais les variétés étaient moins productives et nécessitaient une protection phytosanitaire accrue. Sans irrigation, le différentiel de rendement entre printemps (irrigué) et hiver (non irrigué) est de 9 q/ha sur le dispositif expérimental de Toulouse-Auzeville.

Résultats Auzeville 1995-2002 (Nolot & Debaeke, 2003)

	Rendement (q/ha)	Eau d'irrigation (mm)	Pesticides (€/ha)	Marge brute (€/ha)
Pois de printemps (irrigué)	47	45 (25-75)	112	622
Pois d'hiver (irrigable)	48	25 (0-60)	117	669
Pois d'hiver (non irrigué)	38	0	91	475

Cette option pourrait même s'appliquer à l'avenir à des cultures d'été à condition que l'on dispose de variétés plus tolérantes au froid pour envisager un semis d'automne-hiver (Encadré 2). Ainsi, en Espagne du Sud ou au Maroc, le semis d'automne-hiver du tournesol est possible comme l'ont montré Gimeno et al. (1989) et Boujghagh (1990). La consommation d'eau (ETR) a augmenté alors de 30% et l'efficacité d'utilisation de l'eau (WUE) de 79% pour les semis d'hiver. Des variétés plus tolérantes au froid doivent cependant être recherchées et une révision complète de l'itinéraire technique est à opérer (désherbage et fertilisation N, protection contre les maladies). Ceci pose un défi majeur pour la sélection et pour l'agronomie.

Encadré 2. Le semis de tournesol d'hiver

Le tournesol est maintenant cultivé le plus souvent dans des milieux où la ressource en eau est très variable (sol, pluie). Sa localisation en zone Sud le prédispose à de fréquents déficits hydriques dès la floraison. En dépit de son bon comportement face à la sécheresse (enracinement profond, ajustement de la surface foliaire...) et de ses possibilités d'esquive (semis précoce, cycle court), il subsiste une importante fluctuation inter-annuelle du rendement et de la teneur en huile.

Etant donné la concurrence croissante pour l'utilisation de l'eau, il est peu probable que le tournesol puisse bénéficier de l'irrigation à l'avenir. Ceci restera vrai même dans le cadre d'une remise à plat des soutiens actuels aux cultures irriguées. Il convient donc de réfléchir aux voies d'amélioration de la productivité du tournesol dans le cadre de contraintes hydriques marquées.

Plusieurs voies d'amélioration de la conduite technique du tournesol peuvent être envisagées pour s'adapter à la contrainte hydrique : sélection et emploi de variétés résistantes à la sécheresse, aptes à maintenir un niveau de rendement satisfaisant en présence de déficits hydriques (Feres et al., 1986) ; contrôle du développement végétatif par les techniques culturales appliquées au semis du tournesol (densité de peuplement, écartement, fertilisation azotée). On vise ici à augmenter la part d'eau transpirée après floraison par un indice foliaire modéré avant la floraison afin de retarder l'épuisement des réserves du sol et d'augmenter l'indice de récolte (Sadras et Connor, 1991 ; Debaeke et al., 2000).

L'avancée de la date de semis du tournesol est l'une des techniques possibles en zone méditerranéenne pour esquiver le déficit hydrique de fin du cycle. Plusieurs travaux étudient l'intérêt d'une anticipation

d'1 à 2 mois par rapport aux pratiques actuelles (mars-avril). Il pourrait en résulter une augmentation du rendement et une baisse du rapport oléique/linoléique (Flagella et al., 2002).

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 et d'hiver par rapport aux semis de printemps (par ex. : Gimeno et al., 1989 ; Boujghagh, 1990 ; Rinaldi et al., 1996 ; Anastasi et al., 2000). Cette avancée des dates de semis est entrée dans la pratique en Espagne du Sud et au Maroc. Outre l'esquive des risques de sécheresse, l'avancée des dates de semis présente un intérêt environnemental par le maintien d'une couverture hivernale (fuite de nitrates, érosion).

*Sur la base des travaux précédents qui couvrent plusieurs régions, années et variétés, le gain de rendement (en l'absence d'irrigation, toutes choses égales par ailleurs) est de **5 à 12 q/ha** pour un semis de décembre par rapport au semis de mars classique dans ces régions.*

Le rendement huilier et, dans certains cas, la teneur en huile sont améliorés par les semis d'automne et d'hiver. Par contre, les teneurs en acide oléique peuvent chuter en raison de conditions thermiques moins favorables en fin de cycle (Anastasi et al., 2000).

*La période de floraison est avancée de **30-40** jours par rapport aux semis classiques.*

Le comportement hydrique du tournesol est nettement amélioré pour 4 raisons principales (Soriano et al., 2004) : a) une augmentation de l'évapotranspiration, liée à la durée du cycle plus longue, à la plus forte pluviométrie et à un enracinement plus efficace en profondeur ; b) une augmentation du rapport transpiration/évaporation liée à un indice foliaire plus élevé 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'esquive du déficit hydrique pendant la période post-floraison. L'efficacité de l'eau est ainsi améliorée tant pour le grain que pour la biomasse totale. Même si le stock d'eau à la floraison peut être plus faible en raison du fort indice foliaire, la floraison se déroule dans des conditions de plus faible demande évaporative.

Le principal problème concerne la tolérance des variétés aux basses températures. Dans les situations étudiées, les situations gélives sont peu représentées (températures minimales entre 2 et 10 °C) sauf dans les travaux espagnols où des gels de -7 à -9 °C ont été rencontrés. Il est peu mentionné de problèmes de mortalité de plantes sous l'action du froid. Par contre, la période de levée particulièrement longue expose les semences et les jeunes plantules à des risques de prédation et de fonte. Le taux de levée est de ce fait plus faible avec une irrégularité des dates de levée.

La couverture plus lente du sol rend les plantes plus sensibles à la compétition par les adventices. Ce point n'est pas étudié car il s'agit souvent de situations expérimentales contrôlées. Il en va de même pour les dégâts d'oiseaux qui peuvent être plus importants tant à la levée qu'à la maturité.

La possibilité d'avancer la date de semis du tournesol est aujourd'hui une alternative qui mérite d'être étudiée dans le Sud de la France : dans un premier temps, il s'agit de sélectionner pour la tolérance au froid puis d'adapter l'itinéraire technique (désherbage, fertilisation) à ce nouvel ensemble de contraintes.

. Le choix d'une date de semis anticipée au sein d'une même saison (octobre-déc. ou mars-mai)

En conditions méditerranéennes, le **semis précoce d'automne** (dès que les pluies ont débuté) augmente le rendement potentiel car le stock d'eau disponible est supérieur, la floraison anticipée et la répartition de la transpiration entre pré- et post-anthèse optimisée (Turner, 2004b). Le risque provient alors des maladies et du gel tardif qui peut affecter la montaison des céréales. Par contre, les légumineuses (à durée de floraison indéterminée) pourraient tolérer davantage des basses températures survenant de manière intermittente (Turner et al., 2001). Oweis et al. (2005) montrent cependant que la variabilité des résultats pour la féverole en semis précoce (Syrie) reste toujours supérieure à ce qu'on peut espérer avec une irrigation de complément. Il existe une plage optimale à déterminer probablement par modèle : Winter et Musick (1993) montrent au Texas que le semis trop précoce d'un blé d'hiver à l'automne décale fortement la période de consommation d'eau, entraînant une chute du rendement. A l'inverse, un semis trop tardif réduit la capacité d'extraction de la culture par défaut d'enracinement.

En ce qui concerne les cultures semées au printemps, les résultats peuvent être contradictoires :
- comparant 2 dates de semis pour le maïs non irrigué au Kansas (USA), Norwood (2001) montre que les meilleurs rendements et les meilleures efficacités d'utilisation de l'eau sont obtenus pour des semis de début mai (et non de mi-avril), avec des variétés tardives et de fortes densités de peuplement. Les raisons invoquées sont de plus faibles indices foliaires et des croissances racinaires réduites pour des semis effectués en conditions thermiques moins favorables. La consommation d'eau augmente cependant avec la tardivité de la variété.

- à l'opposé, en Israël, Blum (1972) obtient de meilleurs rendements pour le sorgho avec des semis de mi-mars (*versus* mi-avril) car les semis précoces consomment ici moins d'eau pendant les premières phases du cycle (indice foliaire plus faible, plus lent développement racinaire) ce qui permet un maintien prolongé de la surface foliaire. C'est une stratégie de rationnement qui est ici valorisée.

La détermination de la meilleure date de semis par rapport à la gestion de la ressource en eau n'est pas immédiate car bien d'autres facteurs sont concernés : développement des maladies, des adventices, des ravageurs, sensibilité au froid... Semer tôt en automne se justifie dans les situations où le retour des pluies permet le démarrage de la végétation : anticiper sur ce retour permet de valoriser rapidement l'eau disponible. Dans nos conditions, étant donné la faible avancée de la date d'épiaison que l'on peut en attendre et le fort taux de recharge hivernal, la date de semis à l'automne aura peu d'impacts directs sur la gestion de l'eau sur le plan de l'esquive (par contre, si la croissance du blé est très modifiée par la date de semis, les besoins en eau des semis précoces pourraient être supérieurs).

Au printemps, un semis anticipé peut être justifié à condition que le sol se soit suffisamment réchauffé pour permettre une implantation régulière. Dans le cas contraire, un semis plus tardif permettant une couverture rapide est plus indiqué pour valoriser la ressource en eau.

Cependant, la date de semis est difficile à gérer à l'échelle d'une exploitation (étalement des périodes de semis en fonction de l'organisation des chantiers et du climat) : elle est souvent plus subie que choisie, tout au moins sur une partie de l'exploitation.

. Le semis de variétés plus précoces, aptes à esquiver le stress de fin de cycle et généralement moins exigeantes en eau (couverture rapide du sol, indice foliaire maximal plus faible sauf si augmentation concomitante de la densité de semis)

Faut-il choisir ou non des variétés précoces en conditions hydriques limitantes (irrigation limitée, sécheresse édaphique...) au risque de diminuer le potentiel de production ? C'est une question qui est largement traitée par la littérature, principalement sous climat méditerranéen à sécheresse terminale (Woodruff et Tonks, 1983 ; Gonzalez et al., 1999 ; Debaeke et Aboudrare, 2004).

Les variétés précoces utilisent moins d'eau en raison d'un cycle plus court et d'un indice foliaire réduit. En année favorable, elles sont donc moins productives. A l'inverse, si leur biomasse est réduite, l'indice de récolte peut être amélioré en conditions sèches de fin de cycle.

Blum (1993) met bien en évidence l'interaction entre disponibilité en eau et durée de cycle optimale pour le blé : en présence de stress hydrique (rendement <30 q/ha), la corrélation entre rendement et durée de la phase levée-épiaison (indicateur de précocité) est négative alors qu'en conditions de bonne alimentation en eau (rendement >60 q/ha), ce sont les variétés tardives qui ont l'avantage. Lorsque le stress est modéré, le rendement moyen des variétés testées n'est pas relié à la durée de cycle.

On retrouve de telles relations dans le Sud-Ouest pour le sorgho (Debaeke et al., 2006) : en présence d'irrigation, avantage aux variétés tardives ; en l'absence d'irrigation, peu de différences entre variétés, avec un avantage pour les variétés précoces dès que l'année est plus sèche ou le sol plus superficiel. Les conclusions de Wade et Douglas (1990) en Australie sont similaires, d'où la prescription de variétés à cycle "intermédiaire" si l'on cherche une stabilité du rendement.

De nombreuses études par simulation ont permis de tester les scénarios optimaux en fonction de la variabilité climatique subie. Ainsi, par exemple, à l'aide de simulations avec le modèle de culture STICS, on montre bien l'intérêt des variétés de blé précoces en climat méditerranéen semi-aride ou sub-humide, alors que la réponse est plus aléatoire en climat océanique sub-humide (Debaeke, 2004).

Wahbi et Sinclair (2005) montrent également la supériorité de l'orge (plus précoce) sur le blé en conditions semi-arides.

Cependant les variétés précoces et tardives peuvent aussi différer par d'autres caractères que la durée de cycle et la position des stades sensibles. Gimenez et Fereres (1986) concluent que les variétés tardives de tournesol sont un meilleur choix que les variétés précoces dans le Sud de l'Espagne car leur enracinement plus profond leur permet de valoriser des réserves en eau profondes (c'est le cas dans les sols de vallées à nappe perchée). Blum (1993) remarque que les variétés tardives de blé et de sorgho ont un système racinaire plus développé et plus persistant, facilitant la récupération de la plante après un stress. De la même manière, Deblonde et al. (1999) montrent pour la pomme de terre (en Belgique) que les variétés tardives supportent mieux des contraintes hydriques précoces (modérées). Par contre, la possibilité d'une esquivance par des variétés précoces n'a pu être confirmée en présence de contraintes hydriques de fin de cycle, celles-ci étant trop modérées sous le climat en question.

En conclusion, la période optimale pour positionner un cycle de culture dépend étroitement de la variabilité climatique et de l'intensité de la contrainte hydrique. En conditions méditerranéennes semi-arides, le meilleur choix est généralement de privilégier l'esquivance par des variétés à floraison précoce alors qu'en conditions plus océaniques (à pluviométrie mieux répartie) la réduction de potentiel est probablement plus pénalisante que le risque de limitation sévère par le stress hydrique.

La décision finale dépend là encore de l'attitude de l'agriculteur par rapport au risque économique et climatique.

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

Ceci passe principalement par le choix de cultures aptes à prélever l'eau en profondeur ou tolérant mieux le défaut d'alimentation en eau par des mécanismes d'adaptation (réduction de la surface foliaire, ajustement osmotique...). Parmi les cultures candidates, citons le sorgho et le tournesol

Le sorgho est une espèce biologiquement proche du maïs, dont l'enracinement est particulièrement efficace en profondeur et qui maintient son activité photosynthétique et transpiratoire pour une gamme étendue d'états hydriques du sol (Krieg et Lascano, 1990);

Le tournesol possède également un système racinaire très efficace en profondeur et s'adapte à la ressource en eau disponible en diminuant sa croissance végétative au profit de la phase de remplissage des graines (Blanchet et Merrien, 1990 ; Unger, 1990)

La littérature abonde en articles consacrés à ces deux espèces qui offrent une alternative intéressante au maïs en situation de pénurie d'eau. Les caractéristiques écophysologiques qui sous-tendent la tolérance du tournesol et du sorgho par rapport au maïs sont bien explorées (Bremner et al., 1986 ; Rachidi et al., 1993). La Figure 1 illustre la sensibilité de ces cultures à la contrainte hydrique, maïs et tournesol ayant des comportements très opposés. Dans les régions à déficit hydrique estival, il est généralement montré que le rendement du sorgho dépasse celui du maïs en l'absence d'irrigation (Cabelguenne et al., 1982 ; Debaeke et Hilaire, 1997 ; Norwood et Currie, 1997 ; Sinclair et Muchow, 2001).

En outre, tournesol et sorgho mobilisent peu d'intrants chimiques et minéraux et ont en commun un bon profil environnemental (Cetiom, 2001 a-b) : peu de reliquats azotés, possibilités de binage mécanique, peu de maladies nécessitant des traitements chimiques (tolérance variétale)...

L'amélioration génétique du sorgho a beaucoup progressé. Par ailleurs le réchauffement climatique favorise cette culture thermophile. Sur le plan agronomique, 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 (Encadré 3).

Depuis 1990, les surfaces de tournesol ont baissé de 47% en raison des rapports de prix (ex. concurrence avec le blé dur dans le Sud, disparition dans la sole irriguée). Par contre, les sécheresses

récentes ont confirmé la capacité de cette culture à maintenir un rendement satisfaisant dans les situations de contrainte hydrique.

Les freins à la diversification par les cultures d'été en système non irrigué sont d'ordre :

- socio-économique : prix des oléagineux (tournesol) depuis l'Agenda 2000, marchés encore insuffisants pour le sorgho et relatif désintérêt des coopératives (potentiel actuel de 100 000 ha au niveau débouchés, surfaces actuelles de 60 000 ha, en hausse depuis 2 ans) (Encadrés 4-5).
- technique : défauts de productivité pour le tournesol (facteurs limitants difficiles à contrôler : ex. dessèchement précoce lié au phoma), difficultés de désherbage chimique pour le sorgho (depuis l'interdiction de l'atrazine)

Encadré 3. Place du sorgho dans les assolements du Sud de la France

(d'après J.L. Verdier, site www.ARVALISinstituteduvegetal.fr)

Un observatoire technico-économique mené pendant 3 ans (2002-2004) par ARVALIS dans 3 régions, Midi-Pyrénées, vallée du Rhône et Poitou-Charentes (21 producteurs), indique que le sorgho est compétitif dans les assolements par rapport aux grandes cultures d'été dominantes (maïs et tournesol). 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%. 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 110 q/ha, avec un écart de rendement entre sorgho et maïs jusqu'à 20 q/ha. Par ailleurs, dans le contexte de la nouvelle PAC, le sorgho est une réponse à la diversification des rotations.

En Midi-Pyrénées (et Poitou-Charentes), un intérêt par rapport au tournesol. Dans le plus gros bassin de production, le sorgho est majoritairement présent dans les assolements à dominante blé - tournesol des coteaux argilo-calcaires (terreforts) où il est généralement cultivé sans irrigation. Malgré un niveau de charges opérationnelles équivalent à celui du tournesol, le sorgho dégage une meilleure marge brute. Dès lors qu'il est irrigué, malgré des charges opérationnelles plus importantes, la marge brute s'en trouve encore améliorée. Dans le contexte de l'étude, pour atteindre un niveau de marge brute de 400 €/ha, il faut environ 26 q en tournesol, 55 q en sorgho sec et 60 q en sorgho irrigué.

En Rhône-Alpes, une alternative au maïs en conditions d'eau limitantes. En vallée du Rhône (deuxième bassin), le sorgho est en concurrence avec le maïs irrigué. Malgré un niveau de charges nettement plus élevé en maïs, la productivité du maïs assure une marge brute supérieure à celle du sorgho irrigué. En revanche, le sorgho devient compétitif face au maïs là où les écarts de rendement entre les 2 cultures ne dépassent pas 20 q/ha. Le sorgho irrigué, dont les besoins en eau sont plus faibles que ceux du maïs, peut donc être une alternative intéressante au maïs irrigué dans certaines situations où l'irrigation est limitante et où le rendement du maïs plafonne à 110 q/ha.

	Midi-Pyrénées			Vallée du Rhône	
	Sorgho irrigué	Sorgho sec	Tournesol sec	Sorgho irrigué	Maïs irrigué
Charges* (€/ha)	347	228	227	389	637
Rendement (q/ha)	77	59	25	89	127
Marge brute (€/ha) (PAC 2006)	525	433	371	613	788

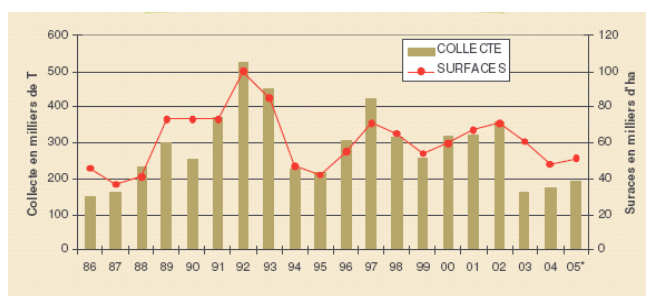
*hors coûts de l'irrigation – Si l'on intègre les coûts de l'irrigation, le différentiel de marge avec le maïs se réduit. Nolot et Debaeke (2003) montrent également l'intérêt du sorgho sec (en sol profond) dans un système sans primes différentielles.

Encadré 4. Marchés et débouchés du sorgho

(source : P. Gatel, AGPB, site www.ARVALISinstitutduvegetal.fr ; Coupiac, 1998)

Après avoir chuté de façon significative depuis 2002, les surfaces de sorgho grain en France amorcent une remontée en 2005, pour s'établir autour de 50 000 ha. Elles avaient atteint le double en 1992, mais la réforme de la PAC a eu un effet négatif. Excepté l'accident de 2003, les rendements ont progressé de 1 q/ha par an au cours des 10 dernières années. Cette progression s'explique par le progrès génétique et l'adaptation des variétés, mais également par l'augmentation de la part du sorgho irrigué (1/4 des surfaces environ). La France est le premier producteur de sorgho de l'union européenne avec environ 50% de la production. L'essentiel des débouchés sur le marché intérieur reste l'alimentation animale. Avec une demande communautaire, principalement en provenance d'Espagne, toujours supérieure au marché intérieur, les utilisations sont bien ajustées à la collecte. Le marché national du sorgho se porte mieux avec un prix qui rejoint celui du maïs en 2005, alors qu'habituellement il est inférieur de 8 à 10%. Ce marché, plutôt porteur actuellement, laisse espérer une augmentation des surfaces, d'autant que le sorgho a une carte à jouer dans le cadre du plan gouvernemental sur les énergies renouvelables puisqu'il est à la fois source d'amidon (bioéthanol) et source de biomasse (thermique et production d'électricité).

Figure 4. Collecte et surfaces du sorgho grain en France (source : Arvalis)



Encadré 5. Le tournesol : une culture qui s'adapte à la ressource en eau disponible et bénéficie de nouveaux débouchés

Les années 2003 et 2004 ont encore souligné les capacités du tournesol à s'adapter aux conditions sèches. Si ses besoins en eau optimaux sont couverts par 420 mm sur l'ensemble de son cycle (pluies et réserves en eau du sol), son système racinaire lui permet également de bien exploiter les réserves disponibles dans chaque horizon. Plus que la quantité, c'est la répartition de cette eau au cours du cycle qui importe : en cas de léger déficit en début de cycle, la plante s'adapte en diminuant sa croissance végétative au profit de la phase de remplissage des graines.

L'huile de tournesol est la première huile alimentaire consommée en France. Ses caractéristiques intrinsèques - apport d'acides gras essentiels et richesse en vitamine E, puissant anti-oxydant - participent à l'image positive de la culture. L'arrivée sur le marché, ces dernières années, de variétés oléiques agronomiquement performantes, offre de nouveaux débouchés :

- en alimentation humaine, les huiles oléiques sont incluses dans les huiles combinées, type ISIO 4 ;
- en tant que culture énergétique, le tournesol oléique, en raison de son indice d'iode bien inférieur à celui du tournesol classique, contribue, en complément du colza, à la fabrication du diester. Sa culture est possible soit sur jachère, soit sur la SCOP où elle bénéficie alors de l'aide aux cultures énergétiques de 45 €/ha ;
- en tant que culture industrielle, les variétés à haute teneur en acide oléique offrent des applications prometteuses, surtout dans le domaine des biolubrifiants. Cet usage est lié à la stabilité thermique élevée des huiles très riches en acide oléique (plus de 90%). Ces variétés peuvent alors être cultivées sur jachère.

Les tourteaux de tournesol constituent par ailleurs une source de protéines qui contribue à réduire l'important déficit protéique européen.

2.2.1.2.3. Choix de variétés intrinsèquement tolérantes à la sécheresse sans changement majeur du cycle cultural

La recherche de variétés tolérantes à la sécheresse est un objectif de sélection majeur à l'échelle mondiale. Il est plus difficile d'évaluer si ce progrès a bénéficié au matériel végétal utilisé dans les conditions françaises. Une évaluation serait opportune notamment pour le maïs, car les références sur les périodes sensibles datent des années 70-80.

Dans les faits, l'offre variétale ne distingue pas explicitement des variétés tolérantes ou non à la sécheresse (au-delà de la précocité). La tolérance intrinsèque des variétés commercialisées n'est pas bien établie : les variétés ne sont pas sélectionnées sur ce critère de tolérance mais sur leur productivité moyenne dans le cadre d'un réseau expérimental couvrant les zones de production pour un petit nombre d'années (les essais conservés étant ceux qui ont une bonne potentialité, les essais ayant subi la sécheresse se caractérisant pas une faiblesse puissance statistique sont logiquement rejetés). Depuis quelques années, le GEVES prévoit 2 conduites (avec et sans irrigation) dans les sites d'évaluation en vue de l'inscription des variétés de sorgho, ce qui peut permettre d'identifier des interactions génotype-milieu-conduite valorisables pour le conseil.

Les catalogues variétaux ne mentionnent pas explicitement de variétés tolérantes à la sécheresse. Une exception concerne les recommandations faites pour le choix de céréales (blé tendre, blé dur) adaptés aux petites régions agricoles (Braun et al., 2006). La tolérance des variétés à gros grains est bien établie pour une sécheresse de post-floraison. Le blé dur serait moins tolérant que le blé tendre à des déficits hydriques précoces. Pour le tournesol, la conclusion est encore que les variétés les plus productives en conduite irriguée le sont également en l'absence d'irrigation (Merrien et Champolivier, 1995).

2.2.1.2.4. Augmenter la disponibilité initiale en eau pour la culture

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 préconisé un travail minimum avec mulch de résidus pour limiter l'évaporation et faciliter l'infiltration en réduisant le ruissellement, maintenir le sol sans végétation pour limiter les pertes par transpiration, enfin introduire une jachère (plus ou moins longue) pour stocker et conserver l'eau. Ainsi, la pratique du semis direct avec paillis participe à l'économie de l'eau en permettant d'éviter des irrigations au semis (Scopel, 1994).

La littérature est très abondante sur ce sujet (USA, Australie, Proche Orient et Maghreb) et relève de ce que l'on appelle l'aridoculture (Cooper et Gregory, 1987 ; Unger et al., 1991 ; Gerik et Freebairn, 2004).

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 (Muchow et al., 1994) : on parle alors de 'culture flexible' en fonction de l'eau stockée dans le sol.

Le choix de la culture précédente, l'inclusion ou non d'une jachère et la pratique du travail du sol (avec ou sans mulch) sont des éléments déterminants pour prévoir le stock d'eau au semis de la culture et le rendement de la culture dans les zones semi-arides. Des exemples sont donnés pour le blé d'hiver au Colorado (Nielsen et al., 2002), le blé et le sorgho au Kansas (Norwood, 1994), le tournesol au Maroc (Aboudrare et al., 2006).

Si la fréquence des sécheresses d'automne-hiver devait augmenter dans nos conditions, 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 est élevée sauf en sols profonds et/ou après des précédents à forte extraction en profondeur (tournesol, par exemple) (Debaeke et Cabelguenne, 1994).

On pourrait penser que la pratique des cultures intermédiaires pièges à nitrates contribue à dessécher davantage le profil de sol au printemps : cependant, selon Justes et al. (2002), l'effet positif sur la

réduction de l'évaporation du sol (et sur l'infiltration) compense le supplément de transpiration lié au couvert pourvu que celui-ci soit détruit assez tôt.

Les effets peuvent être variables d'une année sur l'autre et selon le type de sol. Ainsi Wagner-Riddle et al. (1994) en Ontario montrent qu'une destruction tardive du couvert de seigle (1-2 semaines avant semis) peut réduire la quantité d'eau au semis du soja ou augmenter la disponibilité en eau selon les années, selon que l'effet transpiration ou mulch l'emporte. Les effets sur le rendement du soja ne sont pas significatifs cependant. Munawar et al. (1990) au Kentucky obtiennent des effets plus pénalisants sur le rendement du maïs (non irrigué) pour des destructions du seigle peu avant le semis, en raison principalement du dessèchement du profil pendant la phase d'installation du maïs.

Maximiser le stock au semis de la culture n'est pas toujours le meilleur objectif en matière d'efficience de l'eau, en particulier si l'on plante une culture comme le tournesol qui s'accommode très bien d'une sécheresse modérée tôt dans le cycle pour mieux s'ajuster à la sécheresse estivale plus sévère (Aboudrare et al., 2006). Dans le Sud de l'Italie, Rinaldi (2004) a déterminé par simulation avec le modèle CERES-blé que la date de semis optimale pour semer le blé dur était atteinte pour 40-60% de remplissage de la réserve utile et non pour un profil recombé. Ajoutons à cela 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 sur la levée, l'enracinement, le drainage et l'élaboration du rendement en cas de sécheresse printanière ou estivale.

2.2.1.2.5. Réduire les besoins en eau de la culture par une gestion optimale du couvert foliaire

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). Ceci 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 sélectionner des variétés à indice foliaire modéré ou à faible conductance stomatique (Richards, 2006).

Dans le même temps une fermeture rapide du couvert peut être recherchée pour réduire l'évaporation du sol et contrôler les adventices (Soltani & Galeshi, 2002). Là encore la stratégie optimale résulte de la confrontation de cette stratégie à la fréquence des événements de sécheresse.

La **densité de peuplement** (en interaction avec l'écartement entre rangs) modifie la consommation d'eau des cultures. Le rapport évaporation / transpiration tend à diminuer dès lors que la fermeture du couvert est plus précoce (densités élevées, écartements réduits). Cependant, lorsque l'eau disponible dans le sol est limitée, on recommande en général de réduire la densité de plantes pour augmenter la quantité disponible par plante. Anderson (1984) en Australie montre que la densité optimale pour le triticale est de 80 à 190 plantes/m² selon les rendements accessibles (21-69 q/ha selon la pluviométrie). Cependant, Turner et al. (1994) concluent que la réduction de la densité de peuplement du blé pour diminuer l'eau consommée en non irrigué n'est pas toujours la meilleure stratégie car le rendement peut être fortement réduit : plus forte sensibilité à une mauvaise levée qu'en irrigué, sensibilité du tallage tardif lié aux faibles densités... Van den Boogard et al. (1996) montrent bien que l'effet de réduction de l'évaporation du sol par une augmentation de la densité de peuplement chez le blé peut aussi être supprimé par un supplément de consommation au cours de la saison, ce qui ne donne pas de poids très évident à la densité de peuplement.

A Toulouse, on montre qu'à même précocité, en sol profond, la densité optimale est de 74 000 plantes/ha pour un tournesol irrigué et 63 000 plantes/ha sans irrigation d'appoint (Debaeke et Nolot, 2000). De même, l'intérêt de réduire la densité de peuplement en sorgho pour s'ajuster à la disponibilité hydrique a été confirmée : la densité de semis préconisée en sol moyennement profond non irrigué est réduite de 25 à 40% (selon la précocité de la variété) par rapport aux conditions bien irriguées (ITCF, 2002) (Tableau 5).

Tableau 5. Adaptation de la densité de semis du sorgho grain à la précocité et à la disponibilité en eau (densités de semis recommandées en milliers de grains par hectare)

Groupe de précocité	Sols moyennement profonds en sec	Sols profonds en sec ou moyennement irrigués	Sols bien irrigués
Très précoce	350	400	450
Précoce	270	340	400
Demi-précoce	200 à 220	250 à 270	310 à 340
Tardif	160	210	260

Source : ITCF, 2002

Connor et Loomis (1991) ont discuté le choix de l'écartement entre les rangs au semis. Ils concluent ainsi que si la culture dépend pour sa production de l'eau stockée dans le sol au semis, le choix d'écartements larges est approprié car l'évaporation sera faible (en l'absence de pluies significatives) et la consommation de l'eau stockée sera progressive. A l'inverse, si on peut espérer une pluviométrie significative au cours du cycle, il est préférable de choisir des écartements étroits. On se place en général dans ce cadre pour les systèmes de culture français.

Cependant le choix d'une densité de plantes et d'une largeur d'interrang peut interférer avec les objectifs du désherbage (semis dense pour contrôler les adventices, large interrang pour intervenir mécaniquement) : il est en effet vital de préserver l'eau pour la fin de cycle en évitant une consommation précoce par les mauvaises herbes.

De la même manière, l'augmentation de la **fertilisation azotée** favorise le rapport Transpiration/Evaporation, en particulier en céréales (Anderson, 1985 ; Cooper et Gregory, 1987). L'apport d'azote (et dans certains cas de phosphore) peut augmenter la longueur racinaire et la profondeur d'enracinement et donc l'extraction d'eau (Gregory et al., 1984 ; Brown et al., 1987). A l'inverse, des doses excessives d'azote, responsables d'une croissance précoce et d'un fort indice foliaire en période végétative contribuent également à l'épuisement précoce de la réserve en eau avec des conséquences négatives pour le remplissage du grain (Cantero-Martinez et al., 1995). C'est le concept de 'haying-off' qui est développé par les Australiens (Herwaarden et al., 1998) et qui est toujours lié à une utilisation excessive d'azote (précédent légumineuses responsable d'une forte croissance précoce du blé, par exemple). La sensibilité intrinsèque de la plante au stress hydrique serait augmentée en cas de forte teneur en azote des tissus (Fischer, 1981).

L'application d'azote doit donc bien se conformer à un objectif de rendement atteignable (selon les disponibilités en eau) à l'aide de bilans prévisionnels qui tiennent compte explicitement du facteur hydrique pour calculer l'efficacité de l'azote (Westfall et al., 1996 ; Nolot et Debaeke, 2001). Ainsi, en zone méditerranéenne, le blé d'hiver ne répond pas à la fertilisation N si la pluviométrie est inférieure à 450 mm au cours du cycle (Lopez-Bellido et al., 1996).

L'époque d'application doit être guidée par l'humidité du sol. En région plus aride, tout ou partie de l'azote est appliqué au semis et enfoui pour prévenir les pertes gazeuses et maximiser son utilisation. Cette application unique n'est pas toujours la solution optimale pour s'ajuster à la pluviométrie saisonnière (Nordblom et al., 1985). Le risque de lessivage hivernal doit être considéré pour des applications au semis des cultures d'hiver. Des applications fractionnées sont recommandées, la dose appliquée au début de la montaison permettant de s'ajuster à la pluviométrie hivernale qui fixe le rendement accessible. Si l'hiver est sec, on doit craindre des pertes d'azote par volatilisation surtout en sols calcaires (Vlek et al., 1981 ; Harmsen, 1984). L'efficacité de capture de l'azote à la récolte varie de 20 à 80% selon le type d'engrais, la date et la méthode d'application de l'azote, le type de sol et le climat de l'année (Garabet et al., 1998).

Dans nos conditions, les apports en végétation (3^e apport sur blé ou fractionnement sur tournesol) seront rarement limités par la pluviométrie. Cependant, l'incorporation de l'azote par le binage est une méthode pratiquée pour augmenter sa disponibilité pour la culture.

L'apport d'azote sur céréales reste une stratégie à recommander en zone semi-aride même en l'absence d'irrigation, car les effets positifs liés à l'augmentation de l'indice foliaire et à sa durée l'emportent *in fine* sur la sur-consommation d'eau que cela provoque (Latiri-Souki et al., 1998). Là

encore, le bénéfice final dépendra de la fréquence et de l'intensité de la sécheresse et des quantités et périodes d'application de l'azote.

Du fait d'effets contradictoires², seul un modèle de simulation sol-plante-itinéraire technique prenant en compte la variabilité climatique et l'intensité des contraintes, permettra d'évaluer les stratégies de rationnement (et d'esquive) pour nos conditions de milieu, car l'expérimentation classique ne peut prendre en charge l'extrême variabilité inter-annuelle et intra-saisonnière des précipitations, la gamme très large des scénarios culturels à tester et les interactions qui en résultent (Sivakumar et Glinni, 2002).

2.2.1.2.6. Conclusion pour les systèmes non irrigués

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

- petites terres à cailloux, à faibles réserves en eau (RU < 100 mm), parfois pentues (rendzines en région Centre, groies superficielles de Poitou-Charentes, argilo-calcaires superficiels en Midi-Pyrénées...). Seules les cultures d'hiver (colza, blé ou orge) sont envisageables. Un travail du sol superficiel avec mulch est recommandé pour conserver l'eau (évaporation, infiltration). La sensibilité de ce système de culture à la sécheresse reste cependant forte. De plus, la monoculture de type hiver et les résidus en surface favorisent le développement des adventices et des pathogènes qui se conservent sur les pailles.
- sol moyennement profonds, à réserve utile de 120-180 mm (terrefort moyen en Midi-Pyrénées, groies profondes en Poitou-Charentes...). L'introduction de cultures d'été tolérantes à la sécheresse comme le tournesol ou le sorgho permet de diversifier la succession, de répartir les pointes de travail et les risques climatiques.
- sols de vallées profonds, à réserve utile supérieure à 200 mm. On peut y cultiver du maïs sans irrigation (pour l'ensilage) ou d'autres espèces valorisant bien une forte disponibilité en eau (soja). Les possibilités de diversification y sont maximales.

Diversifier davantage les successions de culture par des espèces d'hiver ou des espèces tolérantes à la sécheresse est un impératif pour assurer la durabilité de ces systèmes en sec dans un contexte de sécheresse plus fréquent (répartir les risques, éviter les problèmes parasitaires et le salissement des sols). On peut invoquer ici la notion d'auto-assurance pour l'agriculteur.

Il existe des possibilités de diversification (aspects économiques, débouchés, aspects agronomiques pour la rotation) au-delà du sorgho et du tournesol :

- introduction de légumineuses d'hiver : lupin (sol acide), féverole, pois (sol non caillouteux), pois chiche, lentilles, haricots... (cf. Turner et al., 2001 pour les systèmes méditerranéens)
- lin d'hiver
- autres cultures d'été tolérantes à la sécheresse, par exemple le carthame (cultivé en Espagne et en Italie pour des usages industriels : acide linoléique) ; des essais ont été menés dans le Sud-Ouest de la France.

Cependant ces cultures sont des niches commerciales et leur extension sera limitée.

Le développement des cultures énergétiques est une opportunité pour le colza et le tournesol (filrière biodiesel) que l'on peut considérer comme positive pour l'économie d'eau.

² Par exemple, diminuer l'évaporation précoce par une fermeture rapide du couvert est-elle compatible avec un rationnement de la culture destiné à reporter l'eau disponible pour la période reproductrice ?

Idées principales

- *Diversifier davantage les successions de culture par des espèces d'hiver ou des espèces tolérant la sécheresse est un impératif pour assurer la durabilité des systèmes en sec dans un contexte de sécheresse plus fréquent (répartir les risques, éviter les problèmes parasitaires et le salissement des sols).*
- *Les stratégies d'esquive avec utilisation de variétés très précoces n'auront un intérêt en moyenne que pour des situations à sécheresse terminale ou à très faible réserve utile.*
- *Le rationnement par la densité de semis ou l'azote consistera à éviter les excès végétatifs précoces, ce qui aura également des impacts positifs pour les maladies ; un ajustement du raisonnement des intrants au rendement accessible sans irrigation apparaît suffisant.*
- *On peut classer les stratégies d'adaptation en 4 groupes d'intérêt décroissant (efficacité potentielle et probabilité d'obtenir le résultat voulu par rapport à l'objectif de conservation de l'eau pour la culture) : 1. esquive (cultures d'hiver) ; 2. tolérance (cultures d'été) ; 3. esquive (variétés de cultures d'été précoces) ; 4. évitement (rationnement de la culture), cette dernière étant la plus aléatoire et d'efficacité réduite.*

2.2.1.3. Cas des systèmes fortement irrigués

Les cultures irriguées bénéficient dans la plupart des cas d'une ressource en eau suffisante pour couvrir les besoins en eau des années sèches. Depuis quelques années cependant, le contexte hydraulique évolue et le nombre de petites régions concernées par des ressources en eau limitées augmente :

- les besoins des autres usagers de la ressource en eau deviennent plus importants : eau potable, respect des débits objectifs d'étiage des rivières (dont les seuils ont été relevés depuis quelques années) pour la salubrité et la faune aquatique, tourisme...
- retour d'un cycle de sécheresse à la fois estivale et hivernale (ne permettant pas la reconstitution de la ressource sur certains bassins).

Plusieurs voies peuvent être explorées pour adapter la nature des systèmes de culture et leur conduite à des disponibilités en eau d'irrigation limitées ou pour réaliser des économies d'eau même là où la ressource est aujourd'hui accessible :

- réduire le besoin en eau d'irrigation de la culture, en acceptant une perte de rendement (mais pas obligatoirement de revenu) moins que proportionnelle à la réduction du volume apporté ;
- réduire le volume d'irrigation en ne satisfaisant pas complètement le besoin de la culture ;
- optimiser la valorisation de l'eau disponible en diversifiant les calendriers d'arrosage et les cultures irriguées ;
- optimiser l'efficacité de l'eau apportée dès lors que l'arrosage est justifié.

Pour cela, des indicateurs, méthodes et modèles peuvent être proposés afin d'éclairer la décision des irrigants :

- avant la campagne d'irrigation, sur les choix de culture et les règles d'action concernant l'irrigation ;
- pendant la campagne d'irrigation, sur le déclenchement et l'arrêt de l'irrigation.

2.2.1.3.1. Réduire le besoin en eau d'irrigation par le choix variétal (cas du maïs)

Dans un contexte de dates d'arrêt très précoces de l'irrigation de fin de cycle et d'épuisement progressif de la réserve hydrique (cas du Centre-Ouest), la stratégie d'esquive du stress par avancée des stades les plus sensibles du maïs a été testée récemment (Lorgeou et al., 2005, 2006). Cette stratégie basée sur l'utilisation de variétés à cycle plus court doit également permettre une économie d'eau d'irrigation. Ceci a été montré par simulation sur d'autres espèces (par exemple le blé d'hiver, Debaeke, 2004). Des références expérimentales sur maïs montrent la réduction de la consommation

d'eau pour des variétés plus précoces : -50 à -60 mm pour une variété du groupe 2 par rapport à une variété du groupe 4, pour une baisse de 10% du rendement en moyenne (Marty et al., 1975).

Ce type d'esquive se justifie peut-être moins dans le Sud-Ouest (températures plus élevées, ressources en eau moins limitantes, probabilité de retour des pluies en fin d'été plus grand).

Par ailleurs, l'augmentation des températures depuis 1-2 décades a déjà permis une avancée des dates de semis du maïs d'environ 1 mois (De La Torre et Benoit, 2004).

En Poitou-Charentes (sol de groies), l'emploi de variétés demi-précoces semées assez tôt a, par exemple, permis une esquive de la sécheresse effective en 2005 (la floraison est atteinte dès la fin juin). L'appropriation de cette tactique d'esquive a été très rapide. Les expérimentations sur ce thème se poursuivent pour en confirmer l'intérêt sur plusieurs années et dans différentes régions (**Encadré 6**). Cette adaptation peut présenter des limites là où les sols se réchauffent plus lentement (boulbènes du Sud-Ouest).

Encadré 6. Le semis de variétés de maïs précoces et demi-précoces

La stratégie d'esquive en maïs vise à reporter l'apparition du stress hydrique le plus tard possible dans le cycle de la culture. L'idéal serait de reporter l'apparition du stress 15 jours après la floraison femelle, c'est-à-dire après la phase la plus sensible de formation des grains. Pour avancer la floraison femelle, on peut avancer la date de semis (< 20 avril en Poitou-Charentes, Centre-Ouest), éviter d'utiliser des variétés trop tardives, éviter les hybrides à floraison précoce mais à longue période post-floraison, utiliser des hybrides un peu plus précoces. La perte de potentiel dans ce cas doit être compensée par un gain d'esquive. Pour cette raison, on ne peut choisir des variétés différant trop de la gamme de maturité habituelle. Cette stratégie peut aussi intéresser les systèmes irrigués et réduire ainsi non seulement les volumes d'irrigation mais aussi les frais de séchage et permettre une meilleure implantation des cultures d'hiver suivantes.

Un travail expérimental a été conduit en 2005 pour tester ces hypothèses dans un contexte climatique très propice à l'évitement. L'utilisation de variétés demi-précoces (au lieu de variétés demi-tardives ou tardives) en situation restrictive en eau dès fin juillet (i) est autant voire plus rentable, (ii) permet 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. En 2005, le gain de rendement net (séchage inclus) a été de 4-5 q/ha pour les variétés demi-précoces avec arrêt d'irrigation 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.

Comme les variétés précoces ont progressé en rendement, on peut choisir des variétés de série 13 (demi-précoces) contre 14 ou 15 et plus (tardives), en semant plus dense (autour de 100 000 plantes/ha) et en semant tôt (1^{re} décade d'avril), ce qui est possible sur des sols argileux se réchauffant rapidement. Ceci permet un arrêt plus précoce des irrigations (mi-août), une économie d'1-2 tours d'eau, une économie de séchage, une récolte plus précoce en conditions plus favorables (fin septembre) : la perte de rendement serait de 10-15% par rapport aux variétés tardives.

Si l'objectif est de réduire le recours à l'irrigation, le choix de variétés demi-précoces de maïs paraît justifié : la consommation sera peu affectée jusqu'à la floraison, l'indice foliaire des variétés de maïs différant principalement par le nombre de feuilles ; par contre l'indice foliaire maximal et la durée de surface foliaire seront différentes avec des conséquences positives sur la transpiration. Cependant les possibilités de récupération sont plus limitées si le cycle est court. Si l'irrigation démarre plus tôt, la concurrence avec l'irrigation des cultures de printemps pourrait survenir. Lorgeou et Martin (2005) soulignent la réussite variable de cette stratégie d'esquive et de rationnement selon les régimes pluviométriques, les différences de précocité utilisées et le potentiel de rendement. Là encore, la simulation permettrait de donner des réponses plus nettes que l'expérimentation à condition d'avoir paramétré les modèles sur ces variétés demi-précoces.

2.2.1.3.2. Pratiquer une irrigation restrictive (cas du maïs) (Deumier et al., 2006a)

. Les besoins en eau d'irrigation du maïs en ressource confortable

Pour l'irrigation du maïs-grain, selon une norme couramment admise, on considère que les moyens d'irrigation (débit et volume) doivent permettre de satisfaire les besoins en eau au moins 8 ans sur 10. Quand on dispose de ces moyens, la stratégie d'irrigation, c'est-à-dire le plan prévisionnel d'arrosage, est construit sans craindre a priori une insuffisance de la ressource par rapport aux besoins.

Selon les conditions pédoclimatiques, le niveau des moyens en débit et en volume nécessaire est évidemment différent. Il dépend de la demande climatique et de la contribution possible des réserves en eau des sols.

Le Tableau 6 indique les références disponibles par région et type de sol (valeur de réserve utile). Certaines références ont été acquises à partir d'essais irrigation, d'autres sont le fruit d'une expertise. Elles correspondent à des variétés de précocités normales pour la région considérée (semis fin avril - début mai et maturité en octobre), irriguées par aspersion selon une stratégie visant un haut rendement sans gaspillage.

Tableau 6. Besoins en eau d'irrigation du maïs selon les pédoclimats

Régions	Type de sol	Réserve Utile (mm)	Moyens d'irrigation nécessaires pour couvrir les besoins de 8 ans sur 10		
			Débit (mm/jour)	Exemple dose/fréquence	Volume (mm)
Alsace	Hardt superficielle Plaine de l'Il	40-50	5	30 mm tous les 6 jours	240
		> 140	3.5	35 mm tous les 10 jours	180
Centre	Limons argileux profonds	> 130	3	30 mm tous les 10 jours	180
	Limons moyens	80-130	3.5	25 mm tous les 7 jours	200
	Argilo-calcaires	60-120	4 - 4.5	30 mm tous les 7 jours	240
Poitou-Charentes et Pays de la Loire	Limons profonds	> 150	3 - 3.5	30 mm tous les 10 jours	160 - 190
	Limons moyens	100-150	3.5 - 4	25 mm tous les 7 jours	190 - 220
	Groies moyennes	70-130	4 - 4.5	30 mm tous les 7 jours	230 - 270
Aquitaine	Boulbènes sableuses moyennes	140			170 - 240
	Sables du Marsan	90			190 - 260
	Alluvions de l'Adour	120			190 - 240
	Champagne moyenne	120			260 - 310
Nord Midi-Pyrénées	Boulbènes moyennes à profondes	120-160	4.3	30 mm tous les 7 jours	240
	Boulbènes superficielles	80-120	5	25 mm tous les 5 jours	270
Sud Midi-Pyrénées	Boulbènes moyennes à profondes	120-160	3.8	27 mm tous les 7 jours	200
	Boulbènes superficielles	80-120	4.5	23 mm tous les 5 jours	240
Rhône-Alpes	Graviers prof. (plaine de Lyon)	130-150	4.5	35 mm tous les 8 jours	250
	Graviers sup. (plaine de l'Ain)	70- 80	5	25 mm tous les 5 jours	300
	Graviers superficiels (Drôme)	70-80	5.5	28 mm tous les 5 jours	350 - 400
	Limons sableux terrasses (Drôme)	130-150	4.5	32 mm tous les 7 jours	320

Sources : essais irrigation ARVALIS - Institut du végétal ou expertise avec partenaires

C'est par rapport à ces valeurs de référence, que l'on peut apprécier dans chaque situation l'intensité et le type de restriction auxquels on est confronté et qui nécessiteront une stratégie d'irrigation adaptée.

Les cas de figure et les scénarios de restriction sont en fait très variés : la restriction peut concerner le volume ou le débit ou intervenir à partir d'une certaine date.

Il faut distinguer aussi plusieurs cas :

- le cas où la ressource est strictement individuelle et facile à connaître en début de campagne (lacs collinaires). L'irrigant a la maîtrise du calendrier d'utilisation de sa propre ressource.
- le cas des lacs collinaires collectifs est équivalent au précédent si la répartition des volumes entre préleveurs (et son contrôle) sont stricts et si le volume attribué à chacun peut lui être garanti.

- le cas où la ressource commune est gérée par un acteur extérieur dont les décisions dépendent de son appréciation de l'état initial et de l'évolution de la ressource au cours de la campagne. Cette évolution peut dépendre en partie (mais pas systématiquement) des prélèvements des irrigants. Cela peut se traduire pour chaque irrigant par la révision d'un quota de volume en début de campagne ou en cours de campagne ou la diminution du temps d'accès à la ressource.

Dans les cas de ressources communes, la gestion optimale de la ressource estimée comme insuffisante peut passer par des échanges d'informations entre les irrigants, leurs représentants et le gestionnaire. Dans certains cas, une partie de la stratégie d'irrigation peut avoir une dimension collective, la stratégie individuelle doit alors être en cohérence avec ce niveau collectif.

. Ressource restrictive : cas du volume limité

C'est le cas (i) d'un lac collinaire individuel ou collectif moins rempli qu'à la normale ou bien associé à une surface à irriguer importante sans que le débit soit limitant ; (ii) de la restriction d'un quota de volume dans le cadre de la gestion collective d'un volume limitant ; (iii) d'une gestion volumétrique sur une nappe déficitaire.

Pour définir une stratégie, la première étape consiste à estimer le volume disponible par hectare. Il faut ensuite tenter d'éviter deux risques opposés : celui de l'optimiste qui commencerait à irriguer comme si le volume n'était pas limitant et qui n'a plus d'eau quand les besoins sont encore importants et celui du pessimiste qui, à force de garder de l'eau de peur d'en manquer ensuite, fait souffrir sa culture, perd du rendement et ne consomme finalement pas toute l'eau dont il dispose.

Pour répartir les risques, mieux vaut préférer les doses unitaires modérées et déterminer le nombre d'irrigations possibles. Ainsi pour un volume de 1500 m³/ha (150 mm), 6 irrigations de 25 mm valent mieux que 5 irrigations de 30 mm et mieux que 4 irrigations de 38 mm.

Pour optimiser l'utilisation du volume disponible, il est intéressant d'établir un calendrier prévisionnel en privilégiant les périodes les plus sensibles de la culture et notamment la montaison, la période encadrant la floraison et le début du remplissage des grains (exemple, Tableau 7) :

Tableau 7. Exemple de calendrier d'irrigation restrictive pour le maïs si le volume est limité

Volume disponible	5 juillet	15 juillet	25 juillet (floraison femelle)	4 août	14 août	1 ^{er} septembre Hum. du grain 50%
150 mm	30 mm	30 mm	30 mm	30 mm	30 mm	-

Source : Deumier et al. (2006)

Ce calendrier prévisionnel doit ensuite être adapté en cours de campagne en fonction du climat : suivre l'évolution des stades de la culture, profiter des pluies pour reporter les irrigations et mieux couvrir les périodes sensibles ultérieures.

Le premier indicateur de pilotage est évidemment le volume disponible restant en fonction du stade de la culture. Une estimation satisfaisante des volumes est alors indispensable : contrôle par compteur, vérification des réglages du matériel.

. Ressource restrictive : réduction du débit ou du volume d'irrigation à une certaine date

Cette situation est la conséquence d'une baisse du niveau de la ressource en eau : débit des rivières ou des nappes. Elle est de plus en plus accompagnée de mesures réglementaires : réduction d'un volume alloué à la semaine ou à la décade, interdiction d'irriguer certains jours de la semaine ou une partie de la journée. Ces mesures réglementaires sont souvent prévues avant la campagne d'irrigation (arrêté cadre) moyennant des indicateurs mesurés : débits des rivières ou niveau des nappes.

Ces limitations de débit se produisent le plus souvent en fin de période d'irrigation au mois d'août, la ressource ayant été fortement mise à contribution les semaines précédentes. La date d'apparition de la contrainte et son intensité sont souvent peu prévisibles a priori à cause de la variabilité du climat, des prélèvements et de la connaissance imparfaite de la ressource. Aussi est-il difficile de déterminer un objectif de rendement.

C'est dans cette situation hydraulique que la diversification de la sole maïs avec une stratégie d'esquive peut être intéressante. Planter tôt des variétés plus précoces que la pratique régionale normale permet de raccourcir la période d'irrigation et de mieux échapper aux restrictions de fin de cycle.

Quelle stratégie d'irrigation adopter ?

Pendant la période sans contrainte d'utilisation de la ressource :

Compte tenu de l'incertitude sur la date d'apparition de la contrainte et sur son intensité, l'objectif est généralement de viser un rendement correct qui sera atteint si la contrainte reste modérée. La méthode de pilotage IRRINOV® (Deumier et al., 2005) est bien adaptée pour piloter l'irrigation au mieux durant cette période. En particulier la mesure de la tension en eau du sol permet, en utilisant les seuils proposés par la méthode, de bien gérer le déclenchement des irrigations, la reprise des tours d'eau et la durée d'interruption des irrigations après les pluies. On évite ainsi des irrigations trop précoces et trop élevées qui auraient un effet négatif sur la ressource.

Pendant la période avec restriction d'utilisation de la ressource :

La marge de manœuvre est bien sûr plus limitée. Si la contrainte est modérée, les seuils IRRINOV® restent de bons indicateurs. Si la contrainte est plus forte, elle dicte elle-même le rythme des irrigations. Dans certains cas, il est possible de faire une modulation des apports selon les parcelles ou les positions d'irrigation si celles-ci sont situées sur des sols avec des réserves en eau différentes : on peut diminuer la dose ou espacer davantage les apports sur les positions ou parcelles en sols plus profonds.

S'il reste de l'eau pour irriguer, il est important de bien raisonner l'arrêt des irrigations. Dans ce contexte hydraulique, le stade repère "humidité du grain 50%" (Deumier et al., 2001) sera atteint tôt et la réserve en eau du sol aura été fortement mise à contribution (tensions en eau du sol à 30 cm et 60 cm supérieures à 90 cbar en sol limoneux et à 120 cbar en sol argileux et déficit en eau du sol supérieure à 100 mm).

. Ressource restrictive : une surface irriguée trop élevée par rapport au débit de l'installation d'irrigation

Dans cette situation, l'objectif n'est pas d'obtenir le rendement potentiel du maïs tous les ans. On accepte un rendement réduit en année très sèche et sèche mais on souhaite obtenir un bon rendement en année à déficit hydrique modéré. Le scénario climatique de la future campagne n'est pas connu mais on sait que les besoins en eau de pointe se situent pour le maïs en juillet.

Par exemple, en région toulousaine, le maximum des besoins journaliers médians du maïs est atteint le 20 juillet pour une variété tardive semée le 1^{er} mai (Figure 5), la date de ce maximum variant du 13 juillet au 30 juillet.

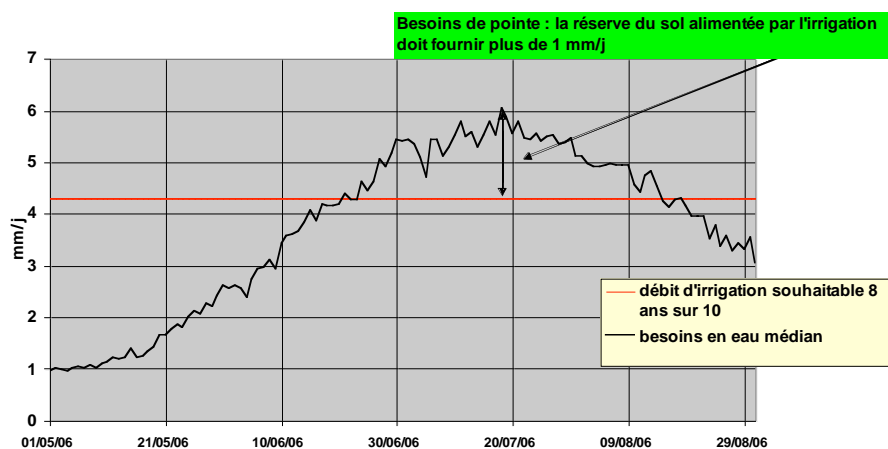


Figure 5. Besoin en eau journalier médian du maïs (kc ETP) et débit d'irrigation souhaitable en sol de brousses moyennes de la région toulousaine (Toulouse-Blagnac, 1986 à 2005) (source : Deumier et al., 2005)

Pour les sols de brousses moyennes, on considère qu'une bonne installation d'irrigation doit pouvoir délivrer 4,3 mm/j pour que la réserve en eau du sol soit suffisante pour écarter les besoins de pointe du mois de juillet en année sèche : le sol doit alors fournir plus d'1 mm d'eau par jour en juillet. C'est pour cette raison que les irrigations doivent commencer tôt en juin, bien avant que le maïs ne manque réellement d'eau.

Ici la capacité d'irrigation de l'installation étant réduite par l'augmentation de la surface irriguée, cette anticipation des apports d'eau par rapport aux besoins devra être encore plus importante et durer plus longtemps.

La conduite d'irrigation dans cette situation est la suivante :

- irriguer tôt dès que la dose d'irrigation peut être stockée dans le sol,
- valoriser les pluies au mieux : pour cela diminuer le temps de pause après une pluie,
- si l'organisation du travail le permet, utiliser des doses d'irrigation modérées de l'ordre de 10-15 mm en pivot, 25-30 mm en enrouleur et maintenir la fréquence.

Les seuils tensiométriques de la méthode IRRINOV® ont été établis pour des ressources en eau et des installations d'irrigation confortables : cependant ces seuils sont valables pour des augmentations de surface de maïs de l'ordre de 15%. Les valeurs seuils diminuées de 10 à 20 cbar permettent de gérer les irrigations pour des augmentations de surface de 25%.

Idées principales

Si le volume ou le débit d'irrigation sont limitants pour le maïs, plusieurs principes peuvent être mis en jeu (en combinaison avec le choix variétal) pour piloter une irrigation restrictive :

- *réduire les doses élémentaires et augmenter le nombre d'apports,*
- *établir un calendrier prévisionnel d'apport en privilégiant les périodes les plus sensibles ; stopper l'irrigation pour une humidité du grain de 50% ; ne pas démarrer trop tôt...*
- *adapter le calendrier au climat en décalant les irrigations après une pluie.*

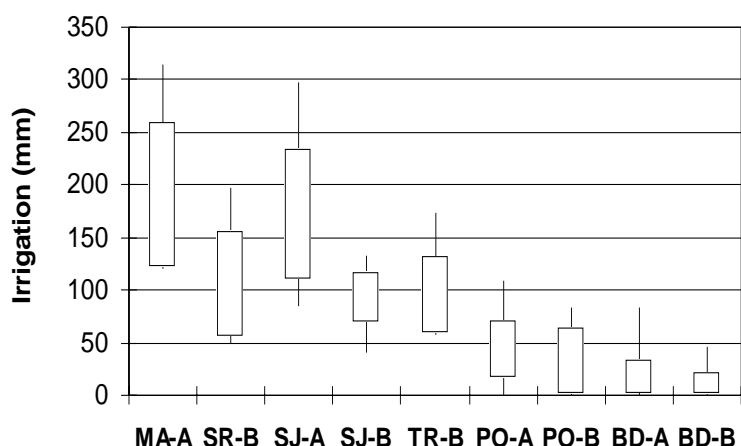
2.2.1.3.3. Allouer la ressource en eau de manière optimale au sein de l'assolement irrigué

L'adaptation aux ressources limitées peut se faire de 2 manières :

- répartir les cultures de l'assolement selon les types de sol en tenant compte de leur tolérance relative à la sécheresse (cas de la sole non irriguée) ;
- ajuster l'assolement à la disponibilité en eau, aux moyens d'arrosage et à la rentabilité des productions ; l'irrigation maximale n'est pas toujours la plus rentable (si l'on tient compte du temps de travail) ; 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 en mai une eau peu utilisée par ailleurs.

Un certain nombre de cultures peuvent également valoriser de plus faibles apports d'eau que le maïs (Jacquin et al., 1993 ; Hergert et al., 1993 ; Balas et al., 1995 ; Bouthier et al., 1995 ; Debaeke et Hilaire, 1997). Les volumes d'irrigation moyens appliqués pendant 8 ans à Toulouse sur la base de règles de décisions tenant compte de la sensibilité de la culture varient en effet de 45 mm (1 an / 4) pour le blé à 200 mm pour le maïs (Nolot et Debaeke, 2003). Le besoin en irrigation diffère ici selon l'objectif de rendement et la disponibilité en eau ($A > B$) (Figure 6).

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



A : irrigation non limitée ; B = irrigation limitée.
 MA : maïs, SR : sorgho, SJ : soja, TR : tournesol, PO : pois, BD : blé dur.

Figure 6. Variabilité des apports d'eau en sol limono-argileux profond en fonction de la culture, de l'année et de l'itinéraire technique (Toulouse, 1995-2002) : écart-types et valeurs maximales (Source : Nolot et Debaeke, 2003)

Irriguer d'autres cultures que le maïs se pose à nouveau aujourd'hui :

- **Céréales à paille** (Bouthier, 2005)

L'irrigation des céréales (blé tendre, blé dur, orge de printemps) peut s'envisager dans 2 contextes :

- objectif d'atteinte régulière de rendements élevés ; c'est le cas des irrigants qui ont diminué les surfaces irriguées en été au profit des irrigations de printemps (céréales, pois). La ressource en eau est en général suffisante au printemps pour les céréales ;
- irrigation d'appoint les années sèches pour préserver un niveau de rendement 'moyen', dans un contexte de disponibilité en eau pour l'irrigation limitée au printemps.

Le volume d'irrigation pour couvrir les besoins des céréales est de 40 à 80 mm en année moyenne et de 60-120 mm en année sèche (1 an / 5), selon une gamme de profondeurs de sols. La période où l'apport est le plus efficace se situe du début gonflement à floraison + 10 jours. Des irrigations peuvent démarrer 15-20 jours après le stade épi 1 cm si l'année est sèche.

Le gain de rendement est de 6 à 8 q/ha pour un apport de 30 mm (Le Magneraud, 1996-2003), avec une meilleure réponse en sol superficiel. En effet en sol profond, les capacités de compensation des stress subis début montaison sont supérieures. La réponse est maximale si la sécheresse est précoce comme en 1997 et en 2003 (8-10 q/ha pour 30 mm apportés), car le manque de pluies affecte l'alimentation azotée (indisponibilité de l'azote de l'engrais) et la consommation d'eau. Contrairement à une idée répandue, la réponse à l'irrigation n'a pas été affectée en 2003 et 2004 par les hautes températures au cours du remplissage du grain.

Des facteurs dépréciant le rendement ou la qualité (verse, fusariose, moucheture...) peuvent être induits par des irrigations entre la floraison et le stade grain laitieux. Le choix variétal et l'adaptation du calendrier d'irrigation peuvent permettre de limiter ces risques.

L'irrigation de complément est une méthode utilisée pour augmenter l'efficacité d'utilisation de l'azote et augmenter la teneur en protéines des céréales dans ces conditions (Fischer et al., 1993). Une augmentation de l'apport d'azote tardif de 10 à 20 kg/ha est nécessaire en irrigué pour maintenir la teneur en protéines des grains (Bouthier, 2005).

- **Tournesol** (Cetiom)

Le tournesol est une des cultures de printemps les plus tolérantes aux conditions sèches grâce à son système racinaire qui lui permet d'extraire efficacement l'eau du sol en profondeur. C'est également

une plante qui répond bien à l'irrigation à partir de la floraison à condition que sa croissance végétative ait été modérée avant la floraison. De début floraison à fin du remplissage de la graine, le tournesol doit consommer 230 mm d'eau pour assurer un rendement de 30 q/ha. C'est pourquoi l'eau d'irrigation est bien valorisée à cette période, quand la réserve en eau du sol est épuisée. Les essais et les observations en culture ont montré des gains moyens de l'ordre de 8 q/ha pour des apports de 100 mm. Une expérimentation menée de 2000 à 2005 par le Cetiom à Satolas (69) a montré que l'irrigation (113 mm) permettait d'améliorer le rendement (+12 q/ha) et la teneur en huile (+2,6%). L'application d'une règle de décision basée sur le développement végétatif et l'état hydrique du sol (sondes Watermark®) permet une augmentation de 5-10 q/ha en Poitou-Charentes dans les conditions de sols superficiels sans excès végétatifs (Lespinas et al., 2004).

Le tournesol irrigué présente deux atouts majeurs particulièrement intéressants lorsque l'eau disponible pour l'irrigation est limitée ou lorsque le calendrier d'irrigation de l'exploitation est chargé : (i) de faibles volumes d'eau requis, 30-100 mm ; (ii) une période d'irrigation peu tardive, centrée sur juillet et début août.

Le choix de la date de début d'irrigation dépend de l'état des réserves en eau du sol et de l'état végétatif du tournesol avant la floraison (Bougel et al, 2001). Il est en effet nécessaire d'éviter l'exubérance des plantes avant la floraison. L'efficacité des arrosages se trouve dans ce cas améliorée. L'irrigation du tournesol est rentable pour l'exploitation dans 2 situations :

- 1) Ressource en eau toujours limitée qui ne permet pas de cultiver du maïs sur toute la surface équipée pour l'irrigation ;
- 2) Interdiction précoce d'irrigation : les exploitations soumises à des arrêts précoces d'irrigation (début à mi-août) peuvent trouver avec l'irrigation du tournesol un moyen de valoriser l'eau à l'époque où elle est disponible.

Dans le contexte de la nouvelle PAC 2006, l'irrigation du tournesol pourrait constituer une opportunité dans certains types de sols et des régions comme le Poitou-Charentes et le Sud-Ouest.

- **Sorgho** (Deumier et al., 2006a)

La capacité d'adaptation du sorgho au stress hydrique est bien connue. Cependant, elle a des limites qui ont été mises en évidence ces dernières années. Des différences de l'ordre de 30-40 q/ha ont été obtenues entre cultures irriguées et non irriguées (années sèches, sols de coteaux). A Toulouse, en sol profond, ce différentiel est de 8-10 q/ha en moyenne (Nolot et Debaeke, 2003).

Comment bien irriguer le sorgho quand la ressource en eau est confortable ? Si la ressource en eau est insuffisante, comment bien positionner les irrigations pour qu'elles soient efficaces ?

. Les périodes de sensibilité du sorgho au stress hydrique (Figure 7)

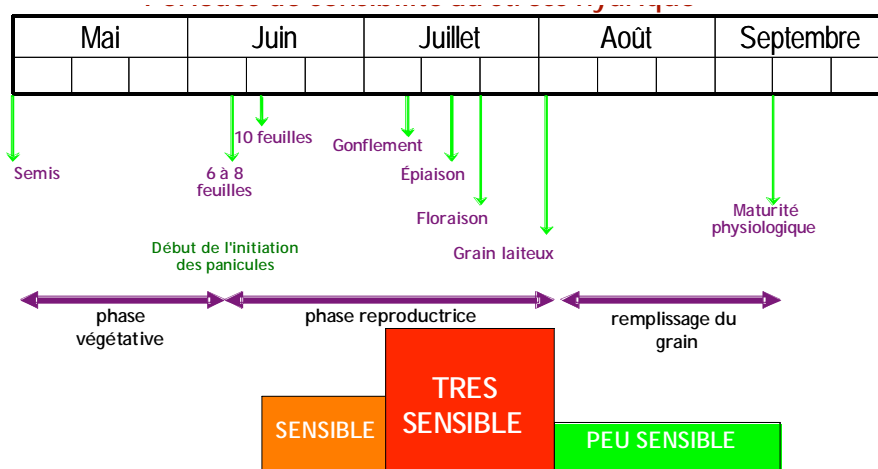


Figure 7. Périodes de sensibilité au stress hydrique du sorgho (Deumier et al., 2006a)

La période la plus sensible au manque d'eau se situe du stade gonflement à la floraison. En cas de stress hydrique pendant cette période, la fertilité des panicules est systématiquement affectée. Avant cette période, pendant la montaison, du stade 8-10 feuilles au stade gonflement, un besoin en eau non satisfait peut limiter la croissance du peuplement, perturber l'épiaison de certaines variétés et affecter la fertilité des panicules. Ce risque est accentué en cas de densité de peuplement trop élevée. La période de remplissage des grains après le stade grain laiteux est peu sensible, et l'enracinement alors à son développement maximum confère à la culture une forte capacité d'extraction d'eau dans le sol.

. Comment irriguer le sorgho pour tendre vers le potentiel de rendement en année sèche (8^e décile)

Le Tableau 8 résume pour 5 zones de production françaises les besoins en irrigation du sorgho en vue d'une production potentielle les années sèches.

Tableau 8. Doses totales d'irrigation permettant d'atteindre le rendement potentiel du sorgho en année sèche (8 ans sur 10)

Région	Sol	Dose totale
Midi-Pyrénées Nord	Terrefort - Boulbènes moyennes	4 fois 35 mm
Lot et Garonne	Terrefort - Boulbènes moyennes	3 fois 35 mm
Poitou-Charentes	Groies moyennes à profondes	4 fois 35 mm
Aude (Ouest-Lauragais)	Terrefort de coteaux	4 fois 35 mm
Drôme	Sol de gravier moyen	4 à 5 fois 35 mm

. Comment irriguer avec 1 à 3 irrigations

Bien que le potentiel de rendement soit rarement atteint, on recherche une efficacité maximale de l'eau par un bon positionnement des irrigations. On cherche à privilégier la période de plus grande sensibilité mais néanmoins à assurer un appoint minimum en cas de fort déficit hydrique avant cette période. En sol de profondeur moyenne, le gain de rendement sera alors de 10 à 15 q/ha pour 35 mm.

Ces substitutions permettent également une forte réduction de l'eau d'irrigation. Dans certains cas, le choix du soja peut permettre également une réduction des irrigations par rapport au maïs.

De nombreux travaux ont été effectués en France par ARVALIS-Institut du Végétal et le Cetiom sur ce thème en s'appuyant sur le logiciel LORA, un optimisateur du choix d'assolement (Jacquin et al., 1993 ; Leroy et al., 1994, 1996...). Les solutions optimales varient selon les contextes hydrauliques, les pédoclimats et les prix. Cet outil est toujours utilisé pour évaluer les conséquences de la PAC sur les systèmes irrigués. Des travaux récents menés en Poitou-Charentes et Vendée par ARVALIS avec LORA ont testé les conséquences de la PAC, 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 n'est intéressante que pour les exploitations ayant un faible quota initial ; des pertes de revenu par rapport à la situation initiale subsistent néanmoins. 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. **Selon les auteurs, la modification des assolements ne suffira pas à elle seule pour une adaptation au nouveau contexte économique et réglementaire en matière de gestion de l'eau.**

Dans le rapport du CGGREF (Lévy et al., 2005), il est montré qu'à l'horizon 2007 :

- en situation de disponibilité en eau d'irrigation peu ou pas limitante et quand les installations d'irrigation sont en cours d'amortissement et dès lors que le rendement du maïs dépasse celui des céréales de 2 t/ha, cette culture procure la meilleure marge brute et sa place dans les assolements reste prépondérante ;
- quand les installations d'irrigation sont amorties, l'intérêt du maïs irrigué peut être remis en cause en cas de contraintes hydrauliques (doses, débits) si le différentiel de rendement avec une céréale non irriguée (blé, sorgho) ne dépasse pas 4,5 à 5 t/ha.

2.2.1.3.4. Optimiser l'efficacité de l'apport d'eau (lorsqu'il est justifié) (Mailhol, 2003)

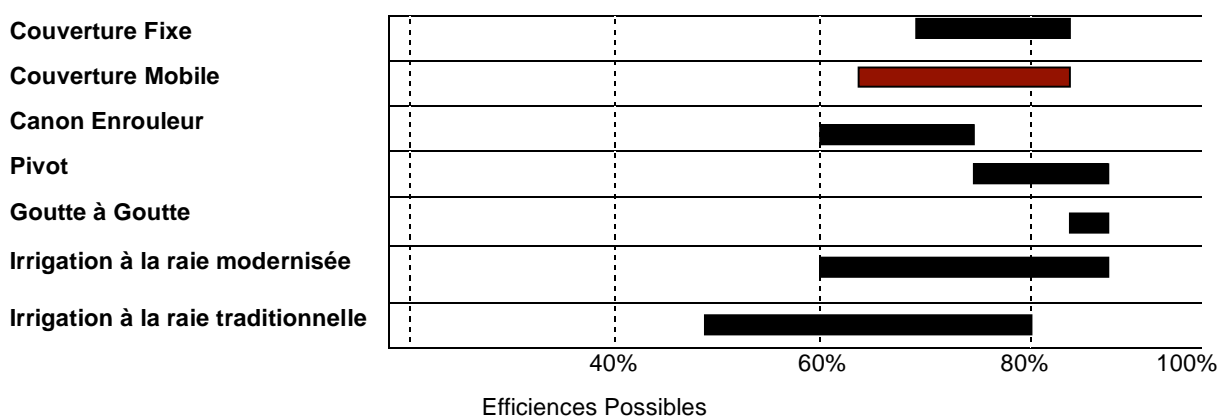
2.2.1.3.4.1. Matériels d'irrigation utilisés et perspectives d'amélioration de leur efficacité

En France, le mode d'irrigation le plus répandu reste l'aspersion (91% des superficies irriguées). Bien adaptée aux caractéristiques du climat, l'aspersion apporte une certaine souplesse pour l'agriculteur.

Les matériels d'irrigation peuvent être classés selon leur efficacité d'irrigation (EI), définie par Burt et al. (1997) comme le rapport entre le volume d'eau utilisable par la plante et le volume délivré à la parcelle. EI est le reflet de ce qui se passe à l'échelle d'un cycle cultural, plutôt que lors d'une irrigation particulière.

Clemmens (2000) compare l'efficacité de différents systèmes d'irrigation (Figure 8).

Figure 8. Efficience de différents systèmes d'irrigation (Clemmens, 2002)



Le canon enrouleur

En France, 50% des surfaces sont arrosées par des canons enrouleurs (Ruelle et al., 2005). Ce type d'arrosage est parfaitement adapté pour une irrigation de complément (mais pas seulement) sur les céréales. L'arrosage en bandes parallèles permet une adaptation à des formes de parcelles variables, les bandes arrosées couvrent de 1 à 4 ha, pour des apports par irrigation de 20 à 40 mm (moyenne proche de 35 mm), le temps nécessaire pour passer d'une position à une autre est en moyenne d'1 heure.

Pour caractériser l'efficacité d'un système d'aspersion on parle plutôt d'uniformité de distribution (UD). Le canon enrouleur a des efficacités maximales atteignant à peine 75% d'après les résultats d'enquêtes menées aux US. L'usage de matériels mal réglés ou usagés en conditions ventées donne lieu à de mauvaises efficacités résultant d'une forte hétérogénéité d'application des doses. La plupart des appareils sont maintenant équipés de régulations électroniques. Ces régulations sont soit montées d'origine soit installées sur des appareils anciens à régulation mécanique ; ils permettent une amélioration de l'uniformité d'arrosage par la régulation de la vitesse d'enroulement, mais surtout une meilleure gestion du temps : on peut prévoir l'heure d'arrivée de l'appareil ce qui limite les pertes de temps lors des déplacements. Les derniers systèmes sont capables d'enregistrer les paramètres de fonctionnement (vitesse, dose, heures) et d'envoyer des alarmes à l'agriculteur par téléphone.

L'investissement reste supportable avec un coût à l'hectare variant de 500 à 800 €/ha (matériel à la parcelle uniquement), pour une durée de vie effective de plus de 20 ans. C'est une des raisons pour laquelle le marché de l'occasion est très dynamique. Le coût à l'hectare est estimé à 75 à 100 €/ha et par an (source CA Loiret) (cf. étude Midi-Pyrénées et colloque de Losse 2004). A cela, il faut ajouter un coût de l'énergie important du fait des pressions requises (6 à 10 bars à l'enrouleur). La même approche en Aquitaine pour une exploitation utilisant un lac collinaire, amène un coût de l'irrigation de 310 €/ha/an, dont 35% dus au matériel.

Le problème est que l'arrosage par canon est assez sensible au vent, délivre des intensités d'irrigation importantes, parfois incompatibles avec une bonne préservation des caractéristiques d'infiltration de la surface du sol.

La portée atteinte par le jet sera fonction de la pression de fonctionnement disponible au canon, sa valeur ne doit pas descendre en dessous de 4 bar, pour atteindre un bon rendement pression/portée vers 5,5 bar. Les appareils ne sont pas toujours bien entretenus et leur fonctionnement s'éloigne souvent des paramètres initiaux retenus pour leur calcul.

Des données acquises sur le terrain par Dubalen (1993) en France ont permis d'identifier les causes majeures des mauvaises performances de l'irrigation dans le cas de l'enrouleur. On constate souvent que ces causes résultent d'une mauvaise utilisation de l'appareil (espacements inadaptés, vitesse irrégulière) et d'une absence de contrôle des doses réellement délivrées (Pereira et al., 2002). Des résultats quelque peu similaires ont été obtenus aux USA par Pitts et al. (1996). Il convient d'ajouter que lorsque la maintenance du matériel ne peut être assurée, ces performances ont tendance à se dégrader comme le montrent Louie et Selker (2000).

Les connaissances accumulées sur le fonctionnement des canons en conditions ventées ont permis de mettre au point le modèle Irriparc® (Granier et al., 2003 ; Deumier et al., 2003) qui simule l'effet des pratiques de l'agriculteur sur la distribution d'eau pour plusieurs saisons climatiques et en tenant compte du vent (vitesse, direction). Cette méthode diffusée par Arvalis-Institut du Végétal et le Cemagref donne des résultats intéressants.

Perspectives d'amélioration :

De nombreux constructeurs ont cherché à améliorer les canons à enrouleurs, en remplaçant le canon par une rampe d'arroseur, ce qui ramène les pressions au niveau de celles utilisées pour les pivots, diminue la sensibilité au vent, mais nuit à la souplesse du système et augmente son coût. Ces dix dernières années, pour résoudre les problèmes d'arrosage en bord de parcelles, des brises jets régulés mécaniquement ont été mis au point, permettant de restreindre l'apport d'eau à la parcelle.

Plus récemment, on a commencé à voir des canons à secteur programmable, qui ouvrent la voie vers des canons asservis à diverses consignes (vent, obstacles, intensité d'apport...). Le problème initial de transfert d'information semble résolu soit par des tubes PE avec treillis métallique, soit par radio. Il s'agit là des premiers pas vers une irrigation de précision, à condition que des outils de pilotage spécifiques soient développés.

Les pivots et rampes frontales

Les surfaces irriguées par pivots et rampes frontales sont de 30% (Ruelle et al., 2005). Ces appareils qui se développent régulièrement depuis une trentaine d'années en France sont dédiés à une parcelle. Ils sont adaptés aux situations d'irrigation indispensable ou de complément. Ils ne réclament que très peu de surveillance au cours de la saison d'arrosage. Des solutions mobiles ont été développées pour éventuellement changer de parcelle, ou arroser une même parcelle en plusieurs postes, mais cela reste une solution provisoire. Au bout de quelques campagnes les appareils sont fixés, les agriculteurs utilisent cette solution pour échelonner l'investissement. Pour la seule irrigation, ces appareils doivent avant tout rester simples pour garder leur intérêt.

Leur développement est principalement le fait de remplacement d'enrouleurs, ce qui pose des problèmes d'excès de pression sur les réseaux anciens. La taille des projets est progressivement réduite du fait que les grandes parcelles ont été équipées en priorité. Dans le Sud-Ouest, la taille moyenne des projets est de 5 travées (moins de 20 ha).

Sur les nouveaux réseaux, la tendance est de baisser les pressions pour réduire les consommations énergétiques : le pivot s'impose alors comme solution d'arrosage à moyenne pression.

L'investissement pour l'équipement sur la parcelle représente 800 à 1500 €/ha, pour un coût d'utilisation de 80 à 110 €/ha et par an (source CA Loiret). Une étude détaillée en Aquitaine a montré que pour des charges d'irrigation de 260 €/ha/an, pour une alimentation par forages, le matériel représentait 40% environ du total sources. Les consommations en énergie sont plus faibles que pour un enrouleur, puisque la pression en tête requise varie de 2 à 5 bars.

Les nouvelles installations incluent un dispositif de fertigation, comme moyen efficace, bien que pas toujours maîtrisé, d'ajuster la fumure du dernier apport d'azote.

Les apports par passage sont de 15 à 30 mm, avec une moyenne autour de 20 mm. En France, la plupart des pivots sont équipés d'un canon d'extrémité, dont le réglage est très rarement réfléchi, bien que des références et des outils existent (au Cemagref par exemple). Le problème majeur rencontré

avec ce type d'appareils est l'intensité de l'application en extrémité, d'autant plus que l'appareil est de grande taille. En effet les arroseurs ayant une portée réduite vont appliquer la dose d'irrigation en un temps bref, donc avec une intensité élevée. Par contre, l'arrosage des pivots est très peu sensible au vent, du fait de la production de grosses gouttes ; il en est de même pour les pertes par évaporation et transport qui se concentrent sur les premières travées, donc sur une surface réduite. Ces pertes possibles sont généralement compensées par une augmentation de la dose apportée sur la zone.

Le contrôle à distance des machines tend à se développer, permettant de limiter considérablement les déplacements pour la surveillance et l'inconfort des interventions en urgence.

Perspectives d'améliorations

La tendance est d'aller vers plus d'asservissement des appareils aux besoins en intrants (eau, engrais, traitement) locaux, pour se rapprocher des concepts d'irrigation de précision. Le problème principal restant à régler est celui de l'établissement de la consigne d'arrosage, qui impose la mise au point de capteurs d'observation et/ou de moyens de simulation, capables de donner l'état de confort hydrique et éventuellement azoté de la culture, et au-delà l'état sanitaire à un pas de temps court (<1h).

Ces perspectives, pour intéressantes qu'elles soient, se heurtent à des problèmes de coûts pour le moment prohibitifs. C'est pourtant un des meilleurs moyens de concilier les impératifs de préservation des ressources de la nouvelle loi sur l'eau et la durabilité des exploitations agricoles.

En première approche, les améliorations les plus accessibles pourraient porter sur l'amélioration de la qualité d'arrosage, permettant de positionner effectivement l'eau dans la zone où elle est nécessaire (apport contrôlé spatialement, contrôle de la dérive et du ruissellement).

Enfin, les capacités de retour assez rapide de ces machines sur un même point de la parcelle, autorisent un pilotage assez fin des apports, bien que ce ne soit pas toujours la priorité de l'agriculteur.

Les couvertures d'asperseurs

En France, 11% des surfaces irriguées le sont en couverture d'asperseurs (Ruelle et al., 2005). Ce système reste le plus adaptable à la forme, la topographie et la nature du sol de la parcelle. La couverture d'asperseurs permet d'obtenir une bonne qualité d'arrosage ($CU > 70\%$), avec des intensités très faibles, compatibles avec tous les types de sols. La sensibilité de la répartition pluviométrique au vent reste toutefois assez importante. L'efficacité chute rapidement en présence de vent en conditions de faible pression et lorsque l'écartement des asperseurs est mal adapté. Des essais effectués au champ chez un échantillon d'agriculteurs par Dubalen (1993) mettent en évidence les causes majeures de faible performance de ce mode d'irrigation : l'espacement des asperseurs et les variations de pression. On observe une tendance à la réduction des surfaces en couverture traditionnelle à grands écartements (18 à 24 m), traditionnellement utilisés pour le maïs, pour aller vers des couvertures à faibles écartements (8 à 15 m) dont la pose et dépose sont automatisables, sur des cultures légumières de plein champ, voire à la micro-aspersion (écartement 2 à 5 m) sur des cultures pérennes ou dans les serres. Les solutions d'automatisation et de commande à distance des postes, permettant de faciliter la conduite des arrosages, sont nombreuses et en développement.

Ce mode d'aspersion peut être utilisé en lutte anti-gel, éventuellement asservi à un capteur de température. Le même principe avec une station météo peut permettre de déclencher un arrosage et de régler sa durée.

Perspectives d'améliorations :

La couverture intégrale du fait de sa souplesse autorise la mise en œuvre de méthodes de pilotage de l'irrigation très élaborées. Celles-ci restent encore trop peu utilisées bien qu'elles soient connues. De l'avis des techniciens, leur vulgarisation est à améliorer individuellement, en particulier en lien avec les opérations d'avertissement collectives. Le degré d'automatisation actuel ne permet qu'une commande globale des secteurs.

L'automatisation est une solution pour réduire les pertes par drainage ou ruissellement. En effet, cela permet aux irrigants de réduire la durée des positions d'arrosage : avant automatisation, les durées de position sont souvent de 12 heures (2 fois 12 h par jour) avec des doses unitaires de 35 mm à 48 mm, et l'automatisation permet des durées plus courtes (3 fois 8 h, 4 fois 6 h et même 6 fois 4 h) et des doses unitaires modérées (13 à 30 mm) plus conformes aux capacités de rétention des sols. Ce

dispositif permettrait d'économiser au minimum 20 à 25 mm (CR d'une expérimentation d'un dispositif de couverture intégrale automatisée – CA 31 mars 1999).

On commence à parler, en particulier en arboriculture, d'apports adaptés à chaque arbre ou plutôt groupe d'arbres, de pilotage en temps réels des apports de fertilisants (oligo-éléments), voire de pesticides (produits de contact). Ces dernières pratiques, si elles sont théoriquement possibles en plein air, imposent une prise en compte des facteurs climatiques pour éviter toute dérive ou contamination des environs et une clarification de la législation.

Les pratiques de chimigation autorisées, dans la plupart des pays européens, pourraient apporter des solutions intéressantes aux problèmes liés aux traitements terrestres classiques (dérive réduite, absence d'aérosols, positionnement du produit sur le feuillage ou au sol, limitation des passages d'engins...).

L'irrigation localisée (micro-irrigation)

L'irrigation localisée représente 3,8% des surfaces irriguées (97500 ha). C'est la technique la plus économe en eau sous climat aride pour un objectif de production donné, son niveau d'efficacité pouvant atteindre 90%. Elle permet de limiter les contacts entre l'air et l'eau, donc l'évaporation, bien que celle-ci reste réduite sous nos climats. Comparé à un système en aspersion également parfaitement maîtrisé et supposé apporter une pluviométrie des plus homogènes, la pratique de l'irrigation localisée permettrait de réduire les pertes par évaporation et supprimer les pertes par dérive donc de réaliser une économie d'eau de l'ordre de 15 à 20% (Mailhol, 2005), car elle permet de positionner l'eau près de la plante. Dans la réalité des conditions françaises, la mauvaise prise en compte des pluies réduit fortement cet avantage par ailleurs réel en climat aride. La majeure partie des installations est couplée à des dispositifs de fertigation. La micro-irrigation est utilisée sur les cultures maraîchères de plein champ comme sous serre ainsi qu'en arboriculture fruitière.

En France, la conception des dispositifs est plutôt orientée vers une assurance de couverture des besoins, y compris dans des situations difficiles, plutôt qu'une économie d'eau, l'eau restant un facteur de production d'un coût peu élevé pour ce type de spéculation.

Au Maghreb, cette technique connaît un fort développement en raison de subventions conséquentes accordées aux agriculteurs par les gouvernements. Il est cependant encore trop tôt pour dire si ces mesures incitatives s'avèreront efficaces ou non vis-à-vis de l'objectif recherché qui est d'induire des économies d'eau. Difficultés liées à l'acquisition de cette nouvelle technique d'une part (Slatni et al., 2004) et absence de pénibilité du travail (contrairement aux techniques traditionnelles) peuvent engendrer des effets opposés à ceux espérés dans certains contextes.

Etant donné l'investissement que ces systèmes représentent (1500 à 3000 €/ha), les agriculteurs sont préoccupés par leur durabilité, souvent remise en cause par les problèmes de colmatage. C'est une des raisons pour laquelle les systèmes jetables se développent. Leur intérêt technique est bien compréhensible, mais on peut se demander quel est leur poids en terme de production de CO₂, bien qu'ils soient construits en matériaux recyclables.

Les systèmes de filtration utilisés permettent une bonne protection des installations à condition qu'ils soient bien adaptés aux caractéristiques de l'eau et des distributeurs. Cet accroissement de durabilité est d'autant plus nécessaire que les systèmes de goutte à goutte sont enterrés. Ces derniers ont montré de très bonnes performances.

Perspectives d'amélioration :

La principale amélioration serait d'abord d'augmenter la durabilité des systèmes de micro-irrigation, pour la rendre équivalente à celle des autres techniques d'irrigation : cela permettrait d'en développer la pratique et d'aller vers une meilleure maîtrise des apports. Pour cela, il y a besoin de travailler à la fois sur les problèmes de filtration et sur la mise au point de goutteurs insensibles au colmatage.

La diffusion de systèmes de détection de dysfonctionnement serait aussi une voie d'amélioration intéressante. Ces dispositifs existent déjà (pressostats, compteurs réagissant à des variations de débit...) mais sont peu répandus. Plus généralement, l'amélioration passera par tout système capable d'informer l'agriculteur d'un problème éventuel sur un secteur d'arrosage.

2.2.1.3.4.2. Retour sur quelques problèmes liés à l'aspersion

a) Eviter les pertes d'eau par évaporation : il y a peu à gagner

En conditions habituelles, les pertes nettes par évaporation s'avèrent être largement inférieures à 10% durant les irrigations (pour des doses de 30-40 mm) (Huber et Dubois de la Sablonnière, 1992 ; Ruelle et al., 2004). Calculs sommaires, approches basées sur une modélisation mécaniste des phénomènes en jeu (thèse M. Hendawi, 2006), et données de la littérature convergent sur le sujet. Hendawi (2006) fait état d'un niveau de pertes (estimées au pas de temps horaire) plafonnant à 6% dans des conditions de journées extrêmes pour des prairies irriguées de la plaine de Crau ($T_{max} = 32^\circ$, $HR = 26\%$). Ce travail conclut que plus que la perte par évaporation, c'est le vent et ses effets sur la qualité de l'apport sur lequel il convient de se focaliser.

Outre l'importance du vent, Huber et Dubois de la Sablonnière (1992) signalent également le caractère déterminant de la température de l'eau d'irrigation sur les pertes par évaporation. Les pertes peuvent être minorées, dans les situations climatiques extrêmes en évitant les irrigations autour du midi solaire. Lors d'une journée sans passage nuageux, la période contribuant pour 50% à l'ETref est approximativement la plage horaire 11-15 h (heure solaire) en juillet et l'effet du vent ne doit pas être sous-estimé. En effet, il ne faut pas oublier que les pertes en eau deviennent élevées en conditions ventées, ce qui peut se produire de jour, mais aussi de nuit. En conditions expérimentales il est d'usage de ne pas irriguer lorsque la vitesse du vent atteint 2 m/s soit 7,2 km/h pour conserver une très bonne homogénéité des apports.

b) Réduire l'hétérogénéité spatiale des arrosages

La régularité médiocre des apports d'eau en particulier à cause du vent et de l'hétérogénéité des sols conduit parfois les irrigants à appliquer des doses d'irrigation "confortables" pour sécuriser les rendements. Ainsi, près de 50% de la surface d'une parcelle irriguée peut recevoir des doses différentes des doses souhaitées par l'agriculteur.

Les enjeux du réglage des matériels d'aspersion en particulier pour un canon enrouleur (diamètre de la buse, pression à la buse, angle du jet, écartement entre deux passages successifs, orientation de ces passages par rapport aux vents dominants et l'angle de secteur) sont importants. Ils peuvent être évalués en mesurant l'impact des hétérogénéités d'irrigation sur le rendement et la qualité des cultures, les pertes d'eau par drainage. Une expérimentation conduite sur maïs en 1991 situe les enjeux des réglages (Deumier et al, 2003). La répartition de l'eau d'irrigation a été mesurée entre deux positions d'un canon enrouleur. On observe alors un surdosage conséquent dans la zone de recoupement des jets (Figure 9). L'été 1991 ayant été particulièrement sec, l'effet sur le rendement du maïs a été très marqué.

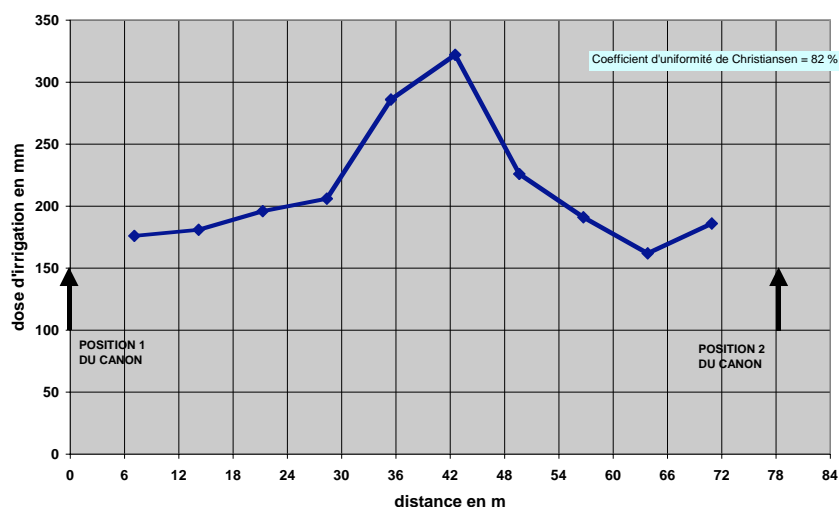


Figure 9. Dose d'irrigation totale entre deux passages de canon enrouleur (ITCF-Ecospace Schering-1991)

En reconstituant a posteriori les répartitions d'eau d'irrigation pour différents écartements entre passages du canon, il a été possible d'évaluer l'effet de ces répartitions sur :

- le rendement de la culture du maïs,
- la quantité d'eau inutile pour le maïs ou perdue par drainage (Tableau 9).

On constate que par exemple pour un coefficient d'uniformité (CUC) de 80% la perte de rendement est de 8 q /ha et l'eau inutile ou perdue représente environ 30 mm, soit environ une dose unitaire d'irrigation.

Tableau 9. Effet de l'écartement entre deux passages de canon sur le CUC*, le rendement du maïs et l'eau inutile ou perdue (ITCF-Ecospace Schering - 1991)

	écartement entre deux passages de canon en m						répartition idéale
	63 m	71 m	78 m	85 m	92 m	99 m	
CUC	72.3	80.4	85.9	90.9	83.3	76.3	100
rendement q/ha	108.9	112.3	114.6	116.7	113.5	110.6	120.5
eau inutile ou perdue m ³ /ha	430	300	220	140	260	370	0
% dose totale	14	10	7	5	8	12	0

* CUC = Coefficient d'Uniformité de Christiansen défini dans le paragraphe "le logiciel IRRIPARC"

Des outils récents permettent d'homogénéiser et de maîtriser les doses sous le canon pour limiter le gaspillage (par exemple, le logiciel IRRIPARC, Granier et al., 2003). Des études régionales conduites dans 4 régions françaises ont eu pour objectif de proposer les réglages des canons enrouleurs pour mieux contrôler l'hétérogénéité à l'échelle des parcelles agricoles. L'effet de ces réglages sur la répartition de l'eau a été simulé avec le logiciel IRRIPARC. L'analyse des résultats permet alors de proposer des fiches de réglages adaptées à chaque contexte local : canon, culture, sol, vent (vitesse, direction), climat (Deumier et al, 2003). Ces études ont été conduites en étroite collaboration avec les acteurs locaux du conseil, de la distribution du matériel d'irrigation et des agriculteurs.

2.2.1.3.4.3. Irrigation de précision

L'irrigation de précision peut permettre une meilleure utilisation de la ressource en eau d'irrigation. Mais l'intérêt de cette technique n'apparaîtra de façon bien nette que dans certains cas :

- si les parcelles irriguées sont suffisamment grandes pour justifier de mettre en œuvre des appareils permettant de différencier spatialement les apports d'eau ;
- si la variabilité pédologique à cette échelle est suffisamment forte pour faire apparaître des différences de réserve utile importantes ;
- si l'on dispose d'un équipement d'irrigation capable de maîtriser correctement l'homogénéité d'apport d'eau (pivot) ;
- si la ressource en eau est limitée ;
- s'il existe des risques de pollutions par lessivage des nitrates.

En Beauce, où tous ces facteurs se trouvent réunis, certains agriculteurs se montrent intéressés par des systèmes permettant de différencier spatialement les apports d'eau. D'autres régions dans le Centre-Ouest de la France (Charente par exemple) peuvent aussi être concernées.

L'étude conduite en 2000 sur une parcelle de maïs à Villamblain dans le Loiret (Zanolin, 2003) illustre bien l'intérêt de l'irrigation de précision tant sur le plan environnemental que sur le plan de la valorisation de l'eau. Ce travail a permis de montrer comment on peut raisonner l'utilisation optimale d'une quantité d'eau limitée. Sur une parcelle constituée essentiellement de 2 types de sols (argilo-limoneux profond à forte réserve utile, et calcosol superficiel), on cherche à satisfaire au mieux les besoins en eau de la culture sur les sols les moins profonds : on assure ainsi un développement végétatif suffisant pour que la plante puisse prélever l'azote présent dans le sol, et on diminue ainsi le risque de lessivage ; par contre, on peut plus facilement diminuer les apports d'eau sur les sols profonds puisque la réserve du sol assure plus longtemps l'alimentation hydrique de la plante.

Par exemple, au cours de l'année 2000, en se basant sur un quota d'eau de 1350 m³/ha, les simulations effectuées (sur la base du modèle STICS) ont montré que la meilleure conduite différenciée permettait d'obtenir les résultats suivants :

	Irrigation	Rendement	Drainage	Lessivage d'azote
Sol profond	90 mm en 3 apports	10.9 t/ha	171 mm	20 kg N/ha
Sol superficiel	180 mm en 6 apports	11.0 t/ha	307 mm	78 kg N/ha

Un apport d'eau homogène (135 mm) aurait pénalisé les zones à faible réserve sans permettre d'augmenter sensiblement le rendement des zones de sols profonds. Par contre, la réduction des apports d'eau en sol profond s'est faite en fin de végétation, ce qui a permis de bien contrôler le drainage en automne et de minimiser le lessivage d'azote au moins sur cette zone de la parcelle.

Mettre en œuvre une irrigation de précision peut permettre de limiter les apports d'azote, mais ceci impose de pratiquer la fertigation au moins pour le dernier apport. Le bénéfice environnemental est certain, tant du point de vue des transferts que du point de vue de la production de CO₂ grâce à la réduction du nombre de passages de tracteur et des doses d'engrais. L'économie d'eau potentielle est importante en valorisant au mieux les capacités de stockage du sol, minimisant l'humidité résiduelle dans le sol en fin de campagne, ce qui accessoirement peut faciliter les travaux de récolte et réduire la compaction. Il faut maintenant développer le matériel capable d'effectuer un apport différencié et les méthodes de pilotage et de simulation nécessaires. Etant donné l'effort de recherche requis, il semble difficile d'espérer une vulgarisation avant 2010.

2.2.1.3.5. Utiliser des outils d'aide à la décision tactiques pour apporter la quantité nécessaire et suffisante au bon moment

- **Les indicateurs de l'état hydrique de la plante** (Merrien et al., 1995 ; Katerji, 1997)

Des outils de détection de la contrainte hydrique perçue par la plante ont été développés pour aider au pilotage de l'irrigation. On peut citer plusieurs méthodes :

- mesure de la température de surface du couvert (par thermographie infra-rouge),
- mesure du potentiel hydrique foliaire (par chambre à pression),
- mesure de la variation du diamètre des organes végétaux (type Pepista).

Ces méthodes sont pertinentes sur le plan physiologique et rendent bien compte de la contrainte subie par la plante. Cependant elles sont complexes à mettre en œuvre, relativement coûteuses et peu représentatives de la variabilité spatiale. De ce fait, elles ne sont pas utilisables ni utilisées en grande culture.

Des méthodes empiriques basées sur l'appréciation visuelle de l'état de turgescence (enroulement des feuilles, par exemple) peuvent être mises en œuvre dans la mesure où la relation avec un critère quantitatif est possible (Downey et Miller, 1971).

La mesure de l'état hydrique du sol pour piloter les irrigations est davantage pratiquée en grande culture, par la pose de sondes tensiométriques ou capacitatives (Tron et al., 2000). La diminution du potentiel hydrique au-delà d'un certain seuil peut être interprétée comme le signal d'un changement dans les conditions d'alimentation hydrique de la culture. Les tensiomètres sont des matériels simples et peu coûteux ce qui a facilité leur diffusion. Ces sondes sont nécessaires à la mise en œuvre de méthodes comme IRRINOV® (cf. plus loin).

- **Le bilan hydrique**

Dans beaucoup d'études, on considère que le simple suivi de la réserve en eau du sol fournit des éléments pour apprécier le confort hydrique des plantes. La détermination directe à la parcelle de la teneur en eau du sol (par gravimétrie ou sonde) n'étant pas réalisable en pratique, des modèles simples ont été développés pour prévoir l'évolution de la disponibilité en eau du sol (Choisnel, 1985 ; Leenhardt et al., 1995 ; Mailhol et al., 1996). Le bilan hydrique reste un outil de base pour les

avertissements irrigation délivrés par les Chambres d'Agriculture. On présente ici le cas du BHYP utilisé en Haute-Garonne (Deumier et al., 2005).

BHYP (bilan hydrique prévisionnel) permet à chaque agriculteur de suivre le bilan hydrique de ses îlots d'irrigation. Le BHYP est envoyé en juin aux agriculteurs et est réactualisé mi-juillet. Il se présente sous la forme d'un graphique que l'irrigant complète jour après jour en notant les pluies et les irrigations (Figure 10). Il est relativement facile d'utilisation et coûte 23 € HT par an.

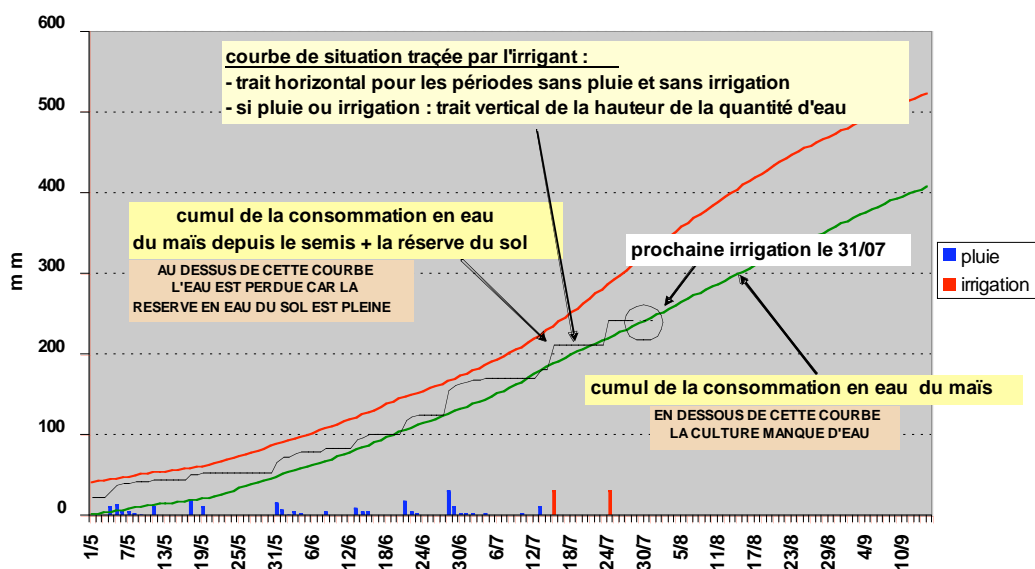


Figure 10. Exemple de BHYP (Deumier et al., 2005)

Des innovations pourraient être apportées pour une mise à disposition de l'information aux irrigants en temps plus utile pour l'action (bilan hydrique "assisté" par mesures de surface foliaire obtenues par télédétection, site internet...). La généralisation de la micro-informatique permet théoriquement à tout agriculteur un suivi du bilan hydrique de ses parcelles.

• La méthode IRRINOV®

La méthode IRRINOV® a été mise au point par ARVALIS - Institut du végétal et des partenaires régionaux : Chambres d'Agriculture et organismes économiques. Elle propose :

- de déterminer au champ les stades repères de la culture qui permettent de délimiter la période d'irrigation,
- un rythme d'irrigation par milieu (sol et climat), c'est-à-dire une dose d'irrigation unitaire et une fréquence d'apport nécessaire et suffisant pour couvrir les besoins en eau de la culture au moins 8 ans sur 10,
- des seuils de tension en eau³ du sol dépendant du stade des cultures qui permettent de moduler le rythme standard proposé en fonction du climat et du besoin des plantes, et qui prend en compte la durée du tour d'eau,
- un site pilote avec 6 sondes Watermark® pour mesurer la tension en eau du sol et 1 pluviomètre, et les procédures pour bien positionner et bien utiliser le site de mesure. (Figure 11).

Toutes les règles de conduite sont dans les guides d'utilisation de la méthode ; les guides sont régionalisés et concernent les cultures suivantes : maïs, céréales, pois et pomme de terre. Ils sont accessibles sur le site www.ARVALISinstitutduvegetal.fr et auprès des partenaires régionaux. La Figure 12 indique la liste des guides disponibles par région en 2005.

³Tension en eau du sol : succion à exercer par les racines des plantes pour extraire l'eau du sol. Unité : kPa ou cbar

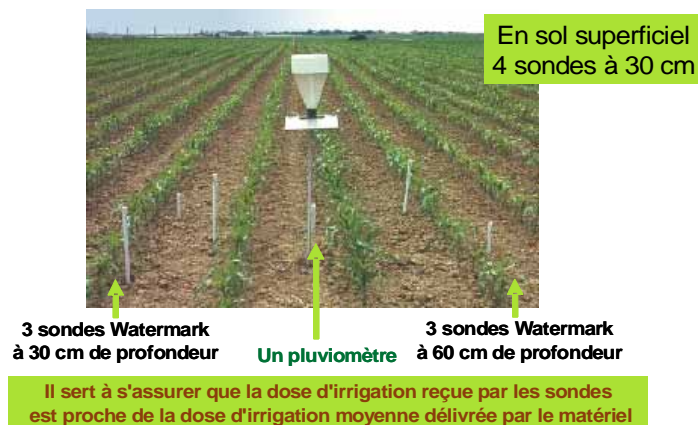


Figure 11. Un site de mesure IRRINOV® pour le maïs

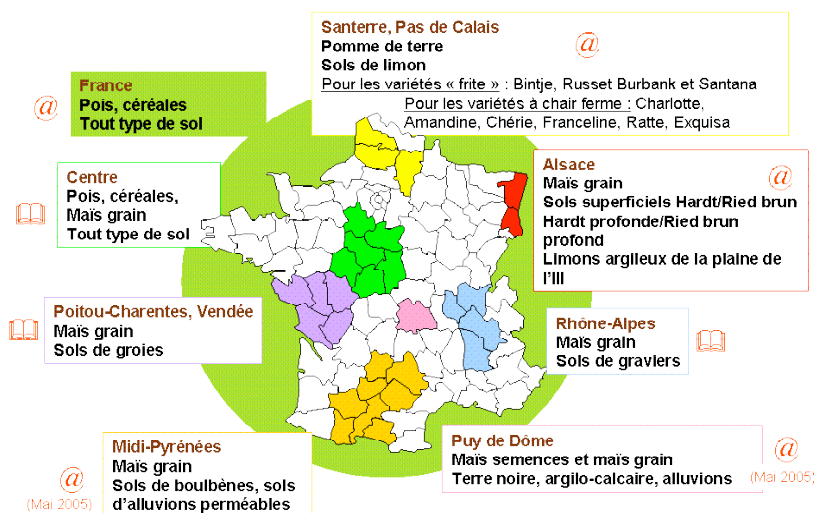


Figure 12. Carte IRRINOV®

La méthode IRRINOV® est adaptée aux contextes de ressource en eau confortable. Pour l'utiliser, l'irrigant doit disposer d'une ressource en eau et de moyens d'irrigation (matériel et main d'œuvre) lui permettant de couvrir les besoins en eau des cultures au moins 8 ans sur 10. Elle n'est donc pas adaptée aux ressources en eau restrictives.

La méthode a été paramétrée par milieu (sol et climat) à partir d'essais irrigation pluri-annuels. Chaque année, la comparaison de plusieurs régimes d'irrigation a permis de déterminer :

- le rythme d'irrigation optimal (fréquence d'apport) et la dose totale optimale,
- la dynamique optimale d'utilisation de la réserve en eau du sol, c'est-à-dire l'évolution des tensions en eau du sol au cours du cycle cultural.

L'analyse fréquentielle climatique pluri-annuelle permet de classer les années d'essais selon leur degré de "sécheresse" et de les situer dans une série climatique plus large que celle des années d'essais. On peut alors déterminer la valeur des deux paramètres précédents adaptés aux années sèches, particulièrement au 8^e décile

Pour le maïs par exemple (Figure 13), les seuils tensiométriques sont faibles en début de cycle, modérés autour de la floraison et plus élevés en fin de cycle. Les seuils faibles permettent de ne pas trop mettre à contribution la réserve en eau du sol au début du cycle et donc de garder de l'eau pour participer à la couverture des besoins de pointe du maïs en juillet. En effet, les capacités d'irrigation des installations d'irrigation sont très souvent insuffisantes pour couvrir à elles seules les besoins de pointe du mois de juillet.

Après la floraison, les seuils plus élevés permettent une contribution du sol plus importante car l'enracinement de la plante est maximal et les besoins en eau plus faibles. La mise en œuvre progressive de la réserve en eau du sol s'inspire des propositions développées par Peyremorte et Tron (1989).

Depuis le début de sa diffusion en 2000, la méthode a été adoptée par environ 800 agriculteurs irrigants de grandes cultures. Par ailleurs, le projet IRRINOV® est l'occasion de formaliser des règles de décision d'irrigation avec des partenaires de la recherche et du conseil. Aussi est-elle souvent utilisée comme référence pour rédiger les avertissements irrigation.

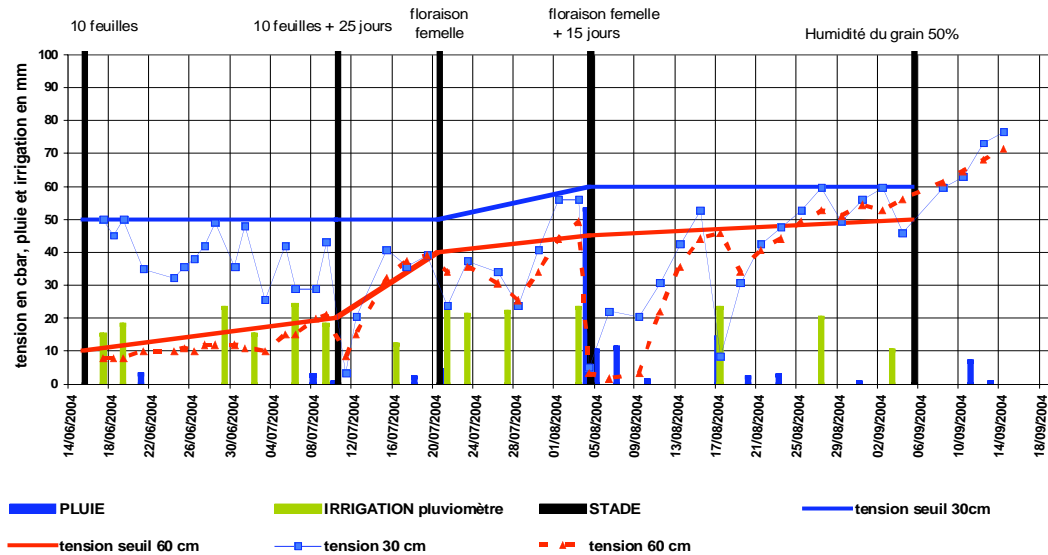


Figure 13. Evolution des tensions en début de tour d'eau par rapport aux seuils tensiométriques de la méthode - Utilisation par un agriculteur sur maïs en sol de boulbènes superficielles de Midi-Pyrénées en 2004 (source : Deumier et al., 2005)

2.2.1.2.6. Utiliser des outils d'aide à la décision stratégiques

Depuis quelques années des logiciels informatiques ont été conçus pour aider les techniciens et les agriculteurs à raisonner et à prendre des décisions stratégiques dans la gestion de l'irrigation (Deumier et al., 2006b) :

- LORA : pour raisonner l'assolement sur le périmètre irrigable,
- IRMA : pour raisonner les règles de conduite et d'organisation des chantiers d'irrigations,
- MODERATO : pour simuler les stratégies de conduite de l'irrigation du maïs en contexte limitant.

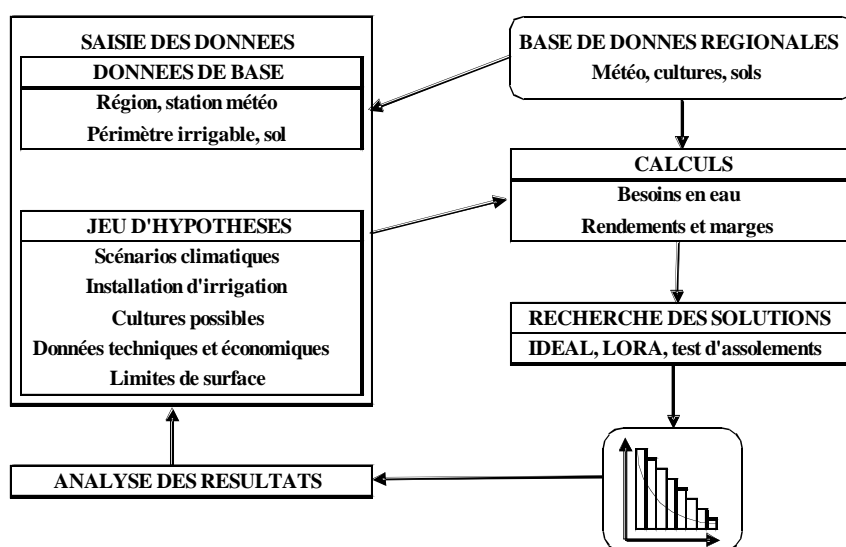
Encadré 4. Le logiciel LORA : raisonner l'assolement sur le périmètre irrigable

LORA est un instrument d'aide à la décision pour le choix de l'assolement sur le périmètre irrigable de l'exploitation agricole (Jacquin et al., 1993 ; Leroy et Jacquin, 1994).

Compte tenu du milieu (réserve en eau des sols et climat) et du contexte technique et économique de l'exploitation (rendements, prix des produits, aides compensatoires, coût des inputs et notamment de l'eau), LORA recherche un assolement de cultures irriguées et cultivées en sec :

- qui maximise la marge sur le périmètre irrigable ;
- est compatible avec les ressources de l'installation d'irrigation en terme à la fois de volume et de capacité d'irrigation par décade liée au débit disponible et à la disponibilité de la main d'oeuvre ;
- tient compte de la variabilité climatique à travers un ensemble de scénarios basés sur un historique climatique.

Figure 14. Structure du logiciel LORA



Pour rechercher l'adéquation entre les besoins en irrigation de cet assolement et les ressources, LORA envisage plusieurs niveaux de conduite d'irrigation : conduite "bien irrigué" et conduites "restrictives". Il mobilise alors des modèles agronomiques (bilan hydrique et fonction de production) pour évaluer pour chaque conduite et chaque culture, les niveaux d'apport correspondant et les conséquences sur les rendements (Leroy et Jacquin, 1994).

LORA propose des solutions (assolement IDEAL adapté à chaque année climatique, assolement LORA optimisé sur l'ensemble des scénarios climatiques) mais permet également de tester l'assolement de l'agriculteur et de comparer les résultats au niveau économique et au niveau de l'utilisation des ressources. On peut aussi comparer les niveaux de conduite de l'irrigation par culture selon les scénarios climatiques.

En faisant varier certaines hypothèses, on peut alors évaluer l'intérêt et les risques associés à différentes solutions d'assolement. L'analyse de ces solutions donne également une idée des volumes d'eau disponibles pour chaque espèce, et permet ainsi une première approche de la stratégie d'irrigation inter-espèces sur la sole irrigable de l'exploitation.

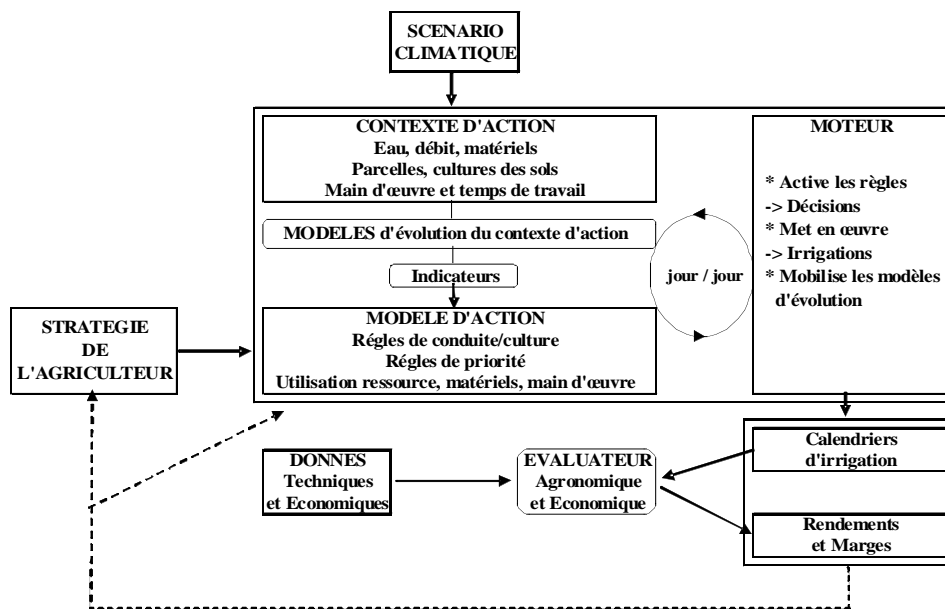
Ce logiciel est actuellement utilisé dans plusieurs régions (Aquitaine, Midi-Pyrénées, Poitou-Charentes...) pour étudier avec les irrigants les évolutions possibles des systèmes irrigués (découplage PAC dès 2006, Loi sur l'Eau 2006, nouvelle tarification EDF...) (Jacquin et al., 2004 ; Lévy et al., 2005...).

Encadré 5. Le simulateur IRMA : raisonner les règles de conduite et d'organisation des chantiers d'irrigation

Ce simulateur d'irrigation a été conçu par l'INRA et ARVALIS - Institut du végétal (Deumier et al., 1995 ; Leroy et al., 1996 ; Labbe et al., 2000)

Son objectif est d'apporter une aide à l'élaboration d'une stratégie d'irrigation pour l'ensemble des cultures irriguées du périmètre irrigable, en tenant compte des caractéristiques précises de l'installation d'irrigation et des contraintes de l'exploitation. Il permet de raisonner les règles de conduite d'irrigation et les règles d'organisation des chantiers d'irrigation (Figure 15).

Figure 15. Les principes du simulateur IRMA



Il est fait l'hypothèse que l'agriculteur utilise un ensemble de règles de décision plus ou moins implicites pour piloter l'irrigation au cours de la campagne et gérer ses ressources. Ce corps de règles de décision régit l'organisation des chantiers d'irrigation compte tenu des cultures irriguées, des caractéristiques physiques et agronomiques des parcelles irriguées, du débit et du volume d'eau disponible, de la structure du réseau d'irrigation de l'exploitation, des caractéristiques des équipements et du temps de travail. Une série d'entretiens et un travail de suivi de campagnes d'irrigation auprès d'agriculteurs ont amenés à structurer ces règles de décision de la façon suivante :

- des règles de constitution de blocs d'irrigation regroupant les positions d'irrigation (de tout ou partie d'une ou de plusieurs parcelles) gérées de façon homogène ;
- des règles de conduite des irrigations par bloc pour décider des doses et des dates de déclenchement, de retour et d'arrêt des irrigations. Ces règles de la forme "si condition alors action" mobilisent un ensemble d'indicateurs relatifs aux conditions climatiques, à l'état hydrique du sol, aux stades phénologiques des cultures, à l'état actuel ou prévu des ressources... ;
- des règles de gestion des priorités entre les différents blocs d'irrigation précédemment définis ;
- des règles d'utilisation de la ressource en eau, des débits et des équipements sur les différents blocs, compte tenu des caractéristiques et des contraintes propres à l'exploitation ou imposées par l'environnement ;
- des règles de gestion du temps de travail de l'agriculteur.

Ce modèle décisionnel est confronté à différents scénarios climatiques. Pour chacun d'eux, il reconstitue des calendriers d'irrigation pour l'ensemble des parcelles irriguées.

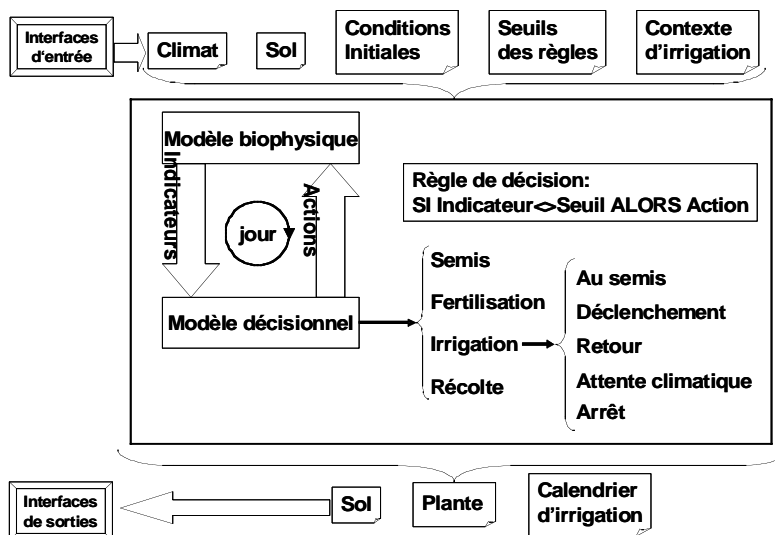
Une base de modèles agronomiques permet d'évaluer tout au long de la simulation l'état des indicateurs utilisés dans les règles de décision, ainsi que les conséquences des calendriers d'irrigation simulés sur l'état hydrique du sol, la satisfaction des besoins en eau des cultures et son effet sur les rendements. Des hypothèses économiques sur le prix des cultures, le coût de l'eau et des autres intrants permettent alors d'évaluer les marges brutes par culture et pour l'assolement, pour chaque scénario climatique envisagé.

L'objectif de ce simulateur est de faire réfléchir l'irrigant sur les règles qu'il mobilise pour gérer sa campagne d'irrigation, d'évaluer leurs cohérences avec ses objectifs et ses stratégies d'irrigation en les confrontant à différents scénarios climatiques.

Encadré 6. MODERATO : simulateur de stratégie de conduites de l'irrigation du maïs en contexte limitant

MODERATO est un outil informatique issu d'une collaboration entre l'INRA Agronomie Toulouse, et ARVALIS – Institut du végétal (Bergez et al., 2001 ; Bergez et al., 2002). Son objectif est de simuler l'application d'une stratégie d'irrigation (ensemble de règles de décision d'irrigation paramétrées visant un objectif donné pour un ensemble de contraintes énoncées) sur une série climatique et sur un sol donné. Il est aussi utilisable en diagnostic, c'est-à-dire pour analyser un calendrier d'irrigation simulé ou observé pour une année particulière, l'évolution de l'état hydrique du sol et du fonctionnement biophysique de la culture. Il est destiné à être utilisé par des techniciens et des chercheurs.

Figure 16. Les principes de fonctionnement de MODERATO



La stratégie de conduite de l'irrigation (maïs) est décrite sous forme de règles de décision représentant de manière simplifiée mais réaliste les décisions de l'agriculteur. Ainsi l'irrigation est représentée par un enchaînement de cinq règles de décision élémentaires : (i) irrigation pendant la période semis-levée, (ii) démarrage de la campagne d'irrigation, (iii) reprise de chaque nouveau tour d'eau, (iv) attente en cas de pluie, (v) décision de fin des irrigations. La règle pour la reprise d'un nouveau tour d'eau inclut des variations de la dose et de la fréquence de retour en fonction du stade de développement de la culture (4 périodes) et selon le volume d'eau restant. Chaque règle fait intervenir un ou plusieurs indicateurs qui déclenchent la décision s'ils atteignent un certain seuil. Ces indicateurs sont calculés par le modèle biophysique et peuvent être soit simples (un nombre de jours) soit plus complexes (une fraction de réserve en eau du sol transpirable). Dans le cadre préétabli de ces règles, l'utilisateur peut tester différentes valeurs de seuils pour les indicateurs et en analyser les conséquences sur les calendriers d'irrigation, les quantités d'eau utilisée, les rendements, les marges.

C'est à l'échelle d'un bloc d'irrigation que sont représentées les décisions de conduite de l'irrigation. On appelle bloc d'irrigation l'unité de surface arrosée par un même matériel et une même ressource. Il est considéré comme homogène du point de vue du sol. La prise en compte du débit et du temps de fonctionnement du matériel permet de tenir compte du temps nécessaire pour arroser l'ensemble des positions du bloc d'irrigation (tour d'eau). Pour ce faire, l'outil simule le fonctionnement de la première et de la dernière position d'irrigation, ainsi que de la médiane, en relation avec le corps de règles de décision choisi. Il est alors possible d'étudier l'hétérogénéité consécutive au temps d'irrigation (Bergez et Nollet, 2003).

Les contraintes d'équipement sont traduites sous la forme : i) du débit disponible par unité de surface ; ii) du temps d'utilisation de l'installation d'irrigation en heures par jour et iii) des jours éventuels de la semaine sans possibilité d'irriguer. La combinaison de ces éléments permet de calculer une "capacité d'irrigation" en mm par jour. Les contraintes de ressources en eau sont prises en compte par la fixation éventuelle d'un volume d'eau alloué pour la campagne par unité de surface, par des restrictions éventuelles de débit de la ressource pendant la période d'irrigation et par des restrictions éventuelles de droit de prélèvement certains jours de la semaine.

Le modèle biophysique décrit le fonctionnement du système sol-plante pour le maïs en intégrant l'action de la contrainte hydrique sur la mise en place de la surface foliaire, l'accumulation de biomasse, et la mise en place du rendement (Wallach et al., 2001). Il s'agit d'un modèle biophysique dynamique basé sur le concept général

d'interception – conversion du rayonnement au cours du cycle de la culture dont le développement dépend des sommes de températures.

Les données d'entrée ont été choisies pour permettre une utilisation pour le conseil. Il s'agit de données climatiques sur 1 à n années (Tmin, Tmax, rayonnement global, évapotranspiration potentielle (ETP), pluie), de caractéristiques du sol permettant de calculer la réserve utile (profondeur, humidités à la capacité au champ et au point de flétrissement permanent, densité apparente, taux volumique de cailloux par horizon), de l'état hydrique initial du sol, de la date de début de simulation et de la description des règles ou du calendrier d'irrigation.

Les sorties permettent de suivre l'évolution journalière de la culture et du bilan hydrique du sol pour chaque année simulée ainsi que de représenter le calendrier d'irrigation résultant de l'application des règles. En simulation de règles sur plusieurs années, les sorties synthétiques permettent de visualiser et d'analyser la variabilité des résultats : quantité d'eau utilisée, rendement de la culture, comparaison au rendement potentiel (sans stress hydrique), eau perdue par drainage...

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

2.2.1.2.7. Entre tactique et stratégique : utilisation des modèles de culture comme outils d'aide à la gestion de l'irrigation et à la négociation entre les irrigants et les autorités administratives

Le logiciel COGITO développé conjointement par AgroTransfert Poitou-Charentes et l'INRA (Levrault et Ruget, 2002) est constitué (i) d'un moteur de modélisation de la culture de maïs (ou de sorgho) permettant de simuler la croissance, le rendement et la consommation d'eau d'une culture donnée dans un contexte pédo-climatique donné (type de sol et série climatique locale) en fonction d'itinéraires techniques déterminés (date de semis, choix variétal, conduite de l'irrigation), et (ii) une interface modèle-utilisateur qui permet de connecter le modèle à des séries climatiques et à une base de données sols puis de gérer les sorties du modèle en terme de graphiques et d'analyses fréquentielles. Dans une première étape, le modèle STICS a été paramétré et validé dans les conditions de Poitou-Charentes à partir de réseaux d'essais (Tayot et al., 1999). Ensuite, l'outil COGITO a été transféré aux conseillers "irrigation" des Chambres d'Agriculture de la Région Poitou-Charentes dans le but de les initier au maniement de l'outil conçu comme une aide au conseil en matière d'irrigation, tant en termes de conduite en temps réel qu'en termes stratégique ou diagnostique hors campagne d'irrigation.

L'outil, dans sa version diffusée permet d'effectuer un certain nombre de simulations de situations concrètes et de scénarios permettant (i) d'éclairer le conseil en irrigation à l'échelle individuelle, (ii) d'organiser une animation collective à l'échelle d'un périmètre ou d'un bassin d'irrigation, ou/et (iii) de servir de base de discussion et de négociation entre les collectifs d'irrigants et les autorités administratives responsables de la gestion des ressources en eau.

En matière de conseil en irrigation, l'outil permet d'effectuer un **diagnostic de gestion de l'irrigation** à l'échelle de l'exploitation individuelle en confrontant pour la campagne écoulée le calendrier des apports d'eau réalisés par l'irrigant à celui qui est proposé par le modèle COGITO. Ainsi l'irrigant peut se rendre compte *a posteriori* de possibles sous- ou sur-irrigations liées à ses pratiques ou au dimensionnement de ses infrastructures. L'outil COGITO fournit également les bases d'une **adaptation tactique** de l'irrigation en cours de campagne, le simulateur permettant de faire un état de la situation de la culture en utilisant les données climatiques passées jusqu'au jour J, et de proposer des hypothèses d'évolution météorologique à partir de cette date, ces hypothèses pouvant être liées à des prévisions plus ou moins fiables. Ces simulations assez lourdes à réaliser au niveau de cas individuels peuvent être faites, dans le cadre d'un service d'avertissement local à l'irrigation, sur des cas types (dates de semis – variétés - types de sol) auxquels chaque irrigant peut se référer. Des conseils plus spécifiques sur les dates de début d'irrigation ou les dates de fin d'irrigation ont montré qu'il y avait à ce niveau une économie d'eau potentielle par rapport à des pratiques d'assurance couramment adoptées en l'absence de tels outils. Enfin, l'outil COGITO permet aux différents acteurs de mieux définir leurs **stratégies en matière d'irrigation** : évaluation fréquentielle des besoins en eau

d'irrigation, dimensionnement de la sole irriguée et/ou des équipements (matériels et réserve collinaire, par exemple), optimisation de répartition spatiale et/ou temporelle d'un volume d'eau limité ou contingenté.

L'outil COGITO, s'il est partagé par l'ensemble des acteurs peut permettre une gestion plus collective des ressources en eau : mise en place d'une gestion volumétrique sur la base de données objectives, estimation plus objective des pertes de rendements liées à des restrictions temporelles d'irrigation, etc., en tant qu'**outil d'aide à la négociation**. A titre d'exemple parmi beaucoup d'autres, la Figure 17 élaborée dans le cadre d'un arbitrage entre un collectif d'irrigants et le service des eaux d'une grande ville, illustre l'effet sur le rendement d'arrêtés d'interdiction d'irrigation plus ou moins précoces. On s'aperçoit par exemple qu'un arrêt d'irrigation après le 15 août ne pénalise pratiquement pas les rendements par rapport à ceux obtenus en gestion volumétrique (plafond à 2700 m³/ha sans date d'arrêt).

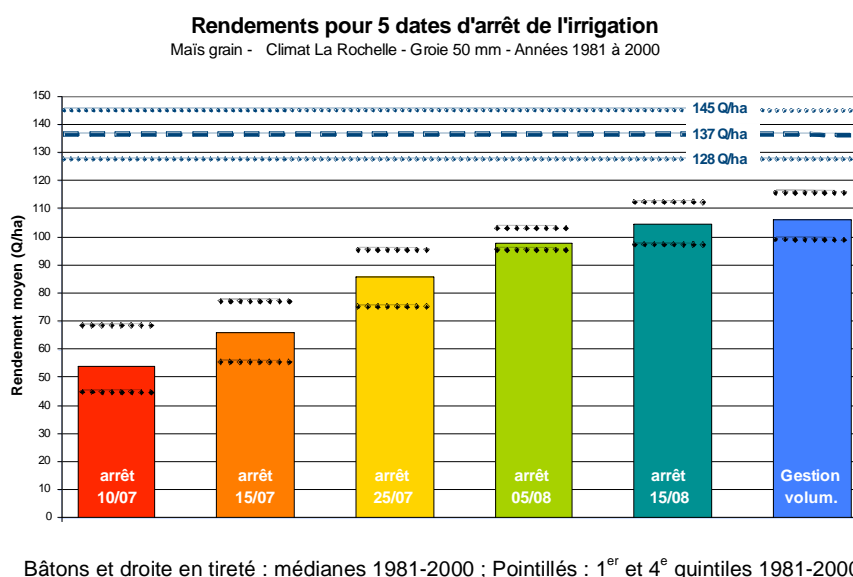


Figure 17. Effet sur le rendement-grain du maïs d'un arrêt de l'irrigation plus ou moins précoce et comparaison au rendement grain en gestion volumétrique (bâton de droite) et au rendement grain potentiel (droites en haut) - Simulations COGITO. (source : F. Levraut, Agrotransfert Poitou-Charentes & S. Hanot, CA 17 – 2003)

Un second exemple (Tableau 10) illustre l'intérêt d'un simulateur tel que COGITO pour comparer les performances de stratégies d'irrigation en conditions sub-optimales.

Tableau 10. Comparaison de 2 stratégies d'irrigation du maïs en début de campagne. Simulations COGITO - Groie 75 mm - Climat Niort - Années 1991 à 2000 (F. Levraut, Agro-Transfert Poitou-Charentes & P. Boucheny, CA 79 - 2001)

Stratégie 1 : suppression du 1er tour d'eau											
	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	moyenne
Irrigation (mm)	210	120	270	210	240	330	210	300	240	270	240
Irrig < 15/07 (mm)	0	0	30	60	30	30	0	60	60	30	30
Ecart de rdt (Q/ha)	-10	-10	-2	-7	-8	-8	-8	-10	-10	-12	-9

Stratégie 2 : réduction des apports antérieurs au 16/07											
	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	moyenne
Irrigation (mm)	230	140	280	210	250	340	230	300	240	280	250
Irrig < 15/07 (mm)	20	20	40	60	40	40	20	60	60	40	40
Ecart de rdt (Q/ha)	-3	-2	-1	-6	-5	-8	-3	-9	-8	-8	-5

Dans une première stratégie, on supprime systématiquement le premier tour d'eau par rapport à une conduite non limitante. Dans une seconde stratégie, on divise par deux les doses des apports antérieurs au 15 juillet par rapport à la même conduite non limitante. Les résultats de rendement sont exprimés en différentiel par rapport au rendement sans contrainte hydrique. La simulation, opérée sur une série de 10 années, fait apparaître la stratégie 2 comme plus pertinente puisqu'à apport d'eau quasi identique, elle minimise nettement la réduction de rendement.

Un tel outil, compte tenu de sa lourdeur relative de manipulation, n'est pas destiné à être proposé comme outil d'aide à la décision pour l'irrigant individuel, même si certains d'entre eux peuvent le manipuler et s'en servir efficacement. Cet outil est surtout destiné aux conseillers en irrigation qui peuvent acquérir par là une possibilité d'adaptation de leurs conseils à différentes situations concrètes en engageant un véritable dialogue avec les irrigants, soit au niveau individuel soit au niveau collectif. Cet outil est aussi destiné à des ingénieurs et techniciens des services administratifs qui peuvent ainsi mieux prendre en compte les contraintes réelles des irrigants en partageant avec eux une même vision objective des problèmes. De plus cet outil a montré de réels atouts sur le plan pédagogique, il devrait pouvoir servir efficacement dans les cycles de formation initiale et/ou professionnelle.

Conclusion sur les outils

L'agriculteur et son environnement de conseil disposent aujourd'hui d'un panel d'outils pour piloter et planifier l'irrigation.

Dans la plupart des cas, les **outils stratégiques** sont pris en main par les ingénieurs du Développement en vue d'une analyse de groupe lors des changements importants de la PAC ou d'accès à la ressource (exemple de LORA, Jacquin et al., 2004). Il peut s'agir également de réviser les règles d'action en fonction d'un nouveau contexte pédoclimatique, économique ou réglementaire afin de mettre à jour le conseil.

Les **outils de pilotage** sont destinés directement aux agriculteurs mais sont encore peu employés malgré leur simplicité. Les irrigants utilisent des règles d'action plus empiriques (Darracq, 1996). Ce constat est valable pour d'autres types de décision mais plus spécialement pour l'irrigation, où la décision tactique est beaucoup plus contrainte par la stratégie que pour d'autres décisions (par exemple l'application d'un fongicide). Les outils fondés sur le bilan hydrique sont plus largement utilisés pour les fonctions d'avertissement à l'irrigation (exemple du BHYP : quand démarrer ? quand arrêter ?) ou d'alerte sécheresse (exemple de Météo-France).

Les outils disponibles sont encore perfectibles tant sur le plan des processus représentés (trop schématiques ou trop restreints au cycle de l'eau) que de leur ergonomie. LORA mériterait ainsi une représentation plus dynamique du besoin en eau des cultures.

Actuellement, des modèles de simulation dynamiques qui permettent d'intégrer les connaissances sur le fonctionnement du système climat-sol-plante sont au cœur des nouveaux outils stratégiques. Ainsi, **Cogito** et **Moderato** sont 2 exemples d'outils pris en main par les ingénieurs du développement pour tester des stratégies d'irrigation (définies ou non par des règles de décision). Ces outils nécessitent encore une validation étendue dans les conditions réelles de l'application.

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

2.2.1.4. Conclusion : Quelles solutions pour les systèmes de grande culture ?

En situation irriguée, la réserve utile du sol est souvent limitante bien que l'on ne puisse strictement superposer les cartes de réserve utile et les cartes d'irrigation à l'échelle du territoire. Un grand

nombre de 'terres à maïs' se situent en sols de vallée, à texture légère : l'irrigation y est souvent plus accessible, elle est généralement nécessaire car les réserves en eau sont assez faibles même si le sol est profond. Dans ces milieux, les alternatives rentables au maïs irrigué dépendront du rendement accessible avec d'autres cultures peu ou pas irriguées. Dans certains sols (boulbènes du Sud-Ouest, par exemple), l'excès d'eau hivernal limite les possibilités de cultures d'hiver.

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

Selon les contextes hydrauliques, les questions de gestion optimale de la ressource en eau d'irrigation se posent différemment à l'échelle de l'exploitation (Puech et al., 1997) :

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

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

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

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

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

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

Les conditions diffèrent également selon que l'irrigant dispose d'une ressource individuelle ou commune à quelques agriculteurs (retenue collinaire, dont le remplissage est connu et l'accès garanti...) ou utilise une ressource gérée par un tiers, susceptible d'imposer en cours de saison des restrictions de prélèvement au vu de l'état de la ressource. S'y ajoutent des contraintes liées à l'équipement d'irrigation de l'agriculteur, qui peut imposer une limitation du débit, des surfaces irrigables, de durée du tour d'eau.

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

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

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

Pour réduire le recours à l'eau d'irrigation, on peut envisager plusieurs scénarios :

1) **Assolement constant, sans réduction a priori de la performance productive du système :** mobiliser les matériels les plus efficaces, pratiquer les conditions d'application les plus efficaces, utiliser les outils d'aide au pilotage pour apporter ce qui convient au bon moment...

On se positionne ici dans une approche d'irrigation **raisonnée**, qui évite les gaspillages, et peut sensiblement améliorer la performance agronomique, économique et environnementale des systèmes de culture.

Là où elle sera pratiquée, l'irrigation devra probablement se conformer à ce cahier des charges pour être durable.

Il n'est pas évident que cette pratique permette des économies d'eau substantielle par rapport à la pratique actuelle (où on peut penser que certains irrigants sont inefficaces par défaut). Un meilleur raisonnement, s'il était appliqué partout, ne conduirait pas à une diminution des quantités d'irrigation de plus de 10%.

2) **Assolement constant, avec une réduction des objectifs de production :** il s'agit alors de réduire le besoin en eau d'irrigation de la culture par des variétés précoces et un ajustement des autres intrants à l'objectif de rendement (densité de semis, azote). Dans le cas du maïs, la baisse de rendement peut être compensée, dans les zones où des restrictions estivales sont fréquentes, par une meilleure efficacité de l'eau et une diminution du coût de séchage. Ceci suppose que l'effort de sélection permette de décorrélérer en partie rendement et précocité. D'après les premiers résultats de Lorgeou et al (2006), les économies d'eau seraient de l'ordre de 15-20% par rapport à la pratique actuelle si l'on généralisait cette pratique.

3) **Assolement modifié, dans le sens d'une moindre dépendance à l'eau d'irrigation :** c'est un scénario qui peut avoir de nombreuses variantes (forte proportion de cultures à irrigation d'appoint, augmentation de la part de cultures non irriguées, augmentation de la part des cultures d'hiver...). Il est clair que ce scénario est le mieux à même de réduire significativement la quantité d'irrigation et, si la proportion de cultures d'hiver et de printemps est forte, de décaler l'utilisation de l'eau vers des périodes moins concurrentielles. Ce scénario est aujourd'hui davantage évoqué dans les zones d'irrigation où le maïs avait pris une forte extension, notamment parce que les coûts de séchage sont de plus en plus élevés, que le prix du maïs a baissé, que la nouvelle PAC nivelle les avantages comparatifs en terme de marges des différentes cultures et qu'une simplification du chantier d'irrigation est souhaité par de nombreux irrigants. Selon la proportion de l'assolement qui sera conduit en irrigation d'appoint, les économies seront variables : la substitution d'un maïs irrigué par un sorgho irrigué permet une économie d'au moins 50% des volumes d'eau, celle d'un maïs irrigué par un blé dur avec irrigation d'appoint une économie d'au moins 60% (cf. Figures 3 et 6). La faisabilité de ces substitutions de cultures doit cependant être étudiée au cas par cas : elle sera limitée

par une baisse trop forte des marges, des problèmes de succession de cultures (blé sur blé) et certains effets sur les filières.

Aussi ces chiffres doivent ils être replacés dans le contexte des contraintes agronomiques et pédoclimatiques.

- Dans les zones à risque d'anoxie et d'ennoyage hivernal, seules les cultures d'été sont souvent envisageables (si l'on ne souhaite pas revenir à la prairie). L'irrigation est alors nécessaire car la réserve en eau du sol n'est pas suffisante.
- Pour des contraintes d'ordre phytosanitaire mais aussi d'organisation du travail et de répartition des risques, on ne peut envisager des systèmes à base uniquement de cultures d'hiver, sauf dans des milieux très contraints où l'irrigation n'est pas possible.
- Si telle ou telle culture apparaît comme une solution possible tant sur le plan agronomique que économique (cas du blé dur vis-à-vis du maïs dans le Sud-Ouest), l'augmentation des surfaces ne peut s'envisager (si elle n'est pas contingentée) sans remise en cause de la rentabilité de la culture (problèmes pathologiques, baisse des prix).

Une régionalisation des solutions doit nécessairement être proposée pour tenir compte :

- des cultures possibles (aire de production),
- des contraintes économiques (quotas, débouchés),
- des contraintes liées à la nature de la ressource et aux usages concurrents.

Remerciements à Jean-Marc Deumier (Arvalis-Institut du Végétal) pour la mise à disposition de la documentation technique.

Références bibliographiques

- 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. *Agricultural Water Management*, 83, 183-196.
- Agreste (2001). Recensement agricole 2000. Résultats régionaux et départementaux.
- Agreste (2004). Enquête sur les pratiques culturales en 2001. *Agreste, Chiffres et Données*, n°159, 253 p.
- 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.
- Anderson W.K. (1984). Plant populations for triticale in a Mediterranean environment. *Field Crops Research*, 8, 281-295.
- Anderson W.K. (1985). Grain yield responses of barley and durum wheat to split nitrogen applications under rainfed conditions in a Mediterranean environment. *Field Crops Research*, 12, 191-202.
- Balas B., Deumier J.M., Merrien A., Lacroix B., Bouthier A. (1995). Boulbènes de l'Astarac. Quel assolement, quelle stratégie d'irrigation ? *Perspectives Agricoles*, 200, 96-103.
- Bergez J.E., Nollet S. (2003). Maize grain yield variability between irrigation stands: a theoretical study. *Agricultural Water Management*, 60, 43-57.
- 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 of Agronomy*, 16, 123-135.
- 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.
- Blanchet R., Merrien A., eds (1990). *Le tournesol et l'eau*. Coll. Points Science, Cetiom, 137 p.
- Blum A. (1972). Effect of planting date on water-use and its efficiency in dryland grain sorghum. *Agronomy Journal*, 64, 775-778.
- Blum A. (1993). Selection for sustained production in water-deficit environments, in : *International Crop Science I*, CSSA, Madison (WI, USA), p.343-346
- Bougel F., Champolivier L., Lespinas L., Merrien A., Reau R., Le Clech B., Paget G. (2001). Irrigation du tournesol : une méthode de pilotage économe en eau. *Oléoscope*, 60, 15-17.

- Boujghagh M. (1990). Effets des semis d'hiver sur deux génotypes de tournesol dans la région du Saiss-Fès. *Helia*, 13 (13), 107-119.
- Bouthier A. (2005). Irrigation des céréales : pour sécuriser rendement et qualité. *Perspectives Agricoles*, 313, 68-71.
- Bouthier A., Bonnifet J.P., Merrien A., Deumier J.M., Lacroix B. (1995). Poitou-Charentes: vers une meilleure gestion de l'eau. *Perspectives Agricoles*, 203, 18-26.
- Braun P., Laconde J.P., Hervillard A.S., Bonnefoy M., Bernicot M.H. (2006). Blé dur : choisir des variétés adaptées à ses contraintes. *Perspectives Agricoles*, 322, 44-51.
- Bremner P.M., Preston G.K., Fazekas de St Growth C. (1986). A field comparison of sunflower (*Helianthus annuus*) and sorghum (*Sorghum bicolor*) in a long drying cycle. I. Water extraction. *Australian Journal of Agricultural Research*, 37, 483-493.
- Brown S.C., Keatinge J.D.H., Gregory P.J., Cooper P.J.M., (1987). Effects of fertilizer, variety and location on barley production under rainfed conditions in Northern Syria. I. Root and shoot growth. *Field Crops Research*, 16, 53-66.
- Burt C.M., Clemmens A.J., Strelkoff T.S., Solomon K.H., Howell T., Eisenhauer D. Bleisner R. (1997). Irrigation performance measures. Efficiency and uniformity. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 123(6), 423-442.
- Cabelguenne M. (1981). *Facteurs technico-économiques de la valorisation de l'irrigation : le cas des grandes cultures d'été dans le Sud-Ouest de la France*. Thèse, Univ.Toulouse-Le Mirail, 214 p.
- Cabelguenne M., Marty J.R., Hilaire A. (1982). Comparaison technico-économique de la valorisation de l'irrigation par 4 cultures d'été (maïs, soja, sorgho, tournesol). *Agronomie*, 2, 567-576.
- Cantero-Martinez C., Villar J.M., Romagosa I., Fereres E. (1995). Nitrogen fertilization of barley under semi-arid conditions, *European Journal of Agronomy*, 4, 309-316.
- Cetiom (2001a). Tournesol et environnement (1^{ère} partie). *Oléoscope*, 60, 9-23.
- Cetiom (2001b). Tournesol et environnement (2^{ème} partie). *Oléoscope*, 63, 9-21
- 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.
- Choisnel E. (1985) Un modèle agrométéorologique opérationnel de bilan hydrique utilisant les données climatiques. In : *Les besoins en eau des cultures*. Conférence Internationale CIID, Paris, 11-14 Sept 1984, INRA, Paris, p.115-132.
- Clemmens A.J. (2000). Measuring and improving irrigation system performance at the field level. In *Proceedings of 2000 National Conference and Exhibition, Irrigation Association of Australia*, May 2000, Melbourne (Australia), pp 190-199.
- Connor D.J., Loomis R.S. (1991). Strategies and tactics for water-limited agriculture in low rainfall Mediterranean climates, in : *Proceedings International Symposium on Improvement and Management of Winter Cereals under Temperature, Drought and Salinity Stresses*, INIA, Cordoba (Spain), p. 441-465
- 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.
- Coupiac J. (1998). Le sorgho : des rendements en nette progression. *Perspectives Agricoles*, 237, 19-25.
- Darracq S. (1996). Identification et modélisation des règles de décision utilisées par les maïsiculteurs en Aquitaine. Mémoire de DAA INA PG, 65 p..
- Debaeke P. (2004). Scenario analysis for cereal management in water-limited conditions by the means of a crop simulation model (STICS). *Agronomie (N° Special STICS)* 24, 315-326.
- 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 Congress, Padova (Italy)*, p. 682-683.
- Debaeke P., Hilaire A. (1997). Production of dryland and irrigated crops under different crop rotations and input levels in Southwestern France. *Canadian Journal of Plant Science*, 77, 539-548.
- Debaeke P., Nolot J.M. (2000). Testing crop management systems for sunflower in South-West France. *Proc. 15th Int.Sunflower Conf.*, Toulouse, C, 1-6
- Debaeke P, Aboudrare A. (2004). Adaptation of crop management to water-limited environments. *European Journal of Agronomy*, 21, 433-446.
- Debaeke P., Nolot J.M., Raffailac 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.
- Debaeke P., Nolot J.M. (2006). Evaluation expérimentale et par modèle de systèmes de culture adaptés à la disponibilité en eau d'irrigation. *Agronomy for Sustainable Development* (soumis)
- Deblonde P.M.K, Haverkort A.J, Ledent J.F (1999). Responses of early and late potato cultivars to moderate drought conditions : agronomic parameters and carbon isotope discrimination. *European Journal of Agronomy*, 11, 91-105.
- De La Torre C., Benoit M. (2004). *Changement climatique et observations à long terme en Unités Expérimentales : évolution des pratiques agricoles et des réponses physiologiques des couverts végétaux*. Document INRA. MICCES-04, 50 p.

- 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., Balas B., Bouthier A. (1995). Boulbènes de l'Astarac. Quel assolement, quelle stratégie d'irrigation? *Perspectives Agricoles*, 200, 96-103.
- Deumier J.M., Balas B., Bouthier A., Lacroix B., Golaz F. (2001). Raisonner l'arrêt de l'irrigation sur le maïs : des indicateurs utiles pour décider. *Perspectives Agricoles*, 270, 70-75
- 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 Conférence ICID*, Montpellier, 14-19 Sept, 2003, 17 p.
- Deumier JM, Boussaguet J., Mailheau M. (2005). Stratégie des agriculteurs, pilotage et ajustement des apports d'eau aux besoins des cultures. *Colloque Cemagref « Eau et agriculture durable »*, SIMA, Paris, 1/03/2005., 8p.
- Deumier J.M, Lacroix B., Bouthier A., Verdier J.L, Mangin M. (2006a). Stratégies de conduite de l'irrigation du maïs et du sorgho dans les situations de ressource en eau restrictive. www.irrinov.arvalisinstitutduvegetal.fr
- Deumier J.M, Leroy P, Jacquin C., Balas B., Bouthier A., Lacroix B., Bergez J.E (2006b). Gestion de l'irrigation au niveau de l'exploitation agricole. *Traité d'irrigation* (à paraître)
- Doorenbos J., Kassam A.H (1979). *Yield response to water*, Irrigation and Drainage Paper 33, FAO, Rome (Italy), 193 p.
- Downey L., Miller J. (1971). Rapid measurements of relative turgidity in maize (*Zea Mays* L.). *New Phytologist* , 3, 555-560.
- 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.
- Dubalen J. (1993). Utilisation des matériels d'irrigation par aspersion. Diagnostic de fonctionnement au champ. *La Houille Blanche* 2/3, 183-188.
- Fereres E., Gimenez C., Fernandez-Martinez J. (1986). Genetic variability in sunflower cultivars under drought. I. Yield relationships. *Australian Journal of Agricultural Research*, 37, 573-582.
- Fischer, R.A. (1981). Optimizing the use of water and nitrogen through the breeding crops. *Plant and Soil*, 58, 249-278.
- Fischer R.A., Howe G.N., Ibrahim Z. (1993). Irrigated spring wheat and timing and amount of nitrogen fertilizer. I. Grain yield and protein content. *Field Crops Research*, 33, 37-56.
- 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 (*Helianthus annuus* L.) hybrids in relation to the sowing date and the water regime. *European Journal of Agronomy*, 17, 221-230.
- Garabet S., Ryan J., Wood M. (1998). Nitrogen and water effects on wheat yield in a Mediterranean-type climate. II Fertilizer-use efficiency with labelled nitrogen. *Field Crops Research*, 58, 213-221.
- Gerik T, Freebairn D. (2004). Management of extensive farming systems for drought-prone environments in North America and Australia. In "New directions for a diverse planet", *Proc 4th Int Crop Science Cong.*, Brisbane (Australia), www.cropscience.org.au, 9 p.
- Gimenez C., Fereres E. (1986). Genetic variability in sunflower cultivars under drought. II. Growth and water relations. *Australian Journal of Agricultural Research*, 37, 583-597.
- 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.
- Gonzalez A, Martin I, Ayerbe L (1999). Barley yield in water-stress conditions. The influence of precocity, osmotic adjustment and stomatal conductance. *Field Crops Research*, 62, 23-34.
- Granier J., Molle B., Folton C., Deumier J.M. (2003). IRRIPARC : I - Modeling spatial water distribution under a sprinkler, in windy conditions. *Proc.54th Conférence ICID*, Montpellier, 14-19 Sept 2003.
- Gregory P.J., Shepherd K.D., Cooper P.J.M. (1984). Effects of fertilizer on root growth and water use of barley in northern Syria. *Journal of Agricultural Science*, 103, 429-438.
- Harmen K. (1984). Nitrogen fertilizer use in rainfed agriculture, *Fertilizer Research*, 5, 371-382.
- Hattendorf M.J., Redelfs M.S., Amos B., Stone L.R., Gwin R.E., Jr. (1988). Comparative water use characteristics of six row crops. *Agronomy Journal* , 80, 80-85.
- Hendawi M. (2006) *Etude des pertes d'eau par évaporation et dérive sur un jet d'aspersion*. Thèse Université Aix-Marseille 2, 217 p
- Hergert G.W., Klocke N.L., Pedersen J.L., Nordquist P.T., Clark R.T., Wicks G.A (1993). Cropping systems for stretching limited irrigation supplies. *Journal of Production Agriculture*, 6, 520-529.
- Herwaarden A.F. van, Farquhar G.D., Angus J.F., Richards R.A., Howe G.N. (1998). 'Haying-off', the negative grain yield response of dryland wheat to nitrogen fertiliser. I.Biomass, grain yield, and water use. *Australian Journal of Agricultural Research*, 49, 1067-1081.
- Huber L., Dubois de la Sablonnière F. (1992). L'irrigation est-elle synonyme de fortes pertes par évaporation pendant les heures chaudes de journées estivales. *Perspectives agricoles* 170, 59-64.

- Isbérie C, Peyremorte P., Bouthier A, Belueau E., Le Doré F. (1995). Les outils de conduite fondés sur la mesure de l'état hydrique du sol. In La conduite de l'irrigation. *De la stratégie au pilotage de l'irrigation*. RNED Hydraulique, AFEID, Cemagref Editions, p 85-99.
- ITCF (1993). *Gérer l'irrigation en grandes cultures*, Brochure Optim'Eau, Mai 1993, 56 p
- ITCF (2002). *Choisir : Sorgho. Variétés – conduites de culture*. ITCF (Paris), 67 p.
- 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 Congress*, Cordoba (Spain), p. 503-504.
- Jacquin C., Deumier J.M., Leroy P. (1993). LORA et la gestion de l'eau dans l'exploitation agricole. *Perspectives Agricoles*, 184, 73-82.
- Jacquin C, Marsac S, Porte-Laborde A, Campagnaud M (2004). Maîtriser les coûts de l'irrigation : incidence de la nouvelle PAC sur la gestion de l'eau dans les exploitations. *Colloque au champ « Eau, source de cultures »*, 11 Juin 2004, Losse (Landes), p. 67-89.
- Katerji N (1997). Les indicateurs de l'état hydrique de la plante. In « *L'eau dans l'espace rural* » (Riou C, Bonhomme R, Chassin P, Neveu A, Papy F, eds), AUPELF-URELF & INRA Editions, pp. 169-177.
- Krieg D.R., Lascano R.J. (1990). Sorghum. In : (B.A.Stewart and D.R.Nielsen eds), *Irrigation of Agricultural Crops, Agronomy Monograph N°30, ASA-CSSA-SSSA*, Madison, WI, USA, p 719-739.
- Labbe F, Ruelle P, Garin P, Leroy P (2000). Modelling irrigation scheduling to analyse water management at farm level, during water shortages *European Journal of Agronomy* 12, 55-67.
- Latiri-Souki K., Nortcliff S., Lawlor D.W. (1998). Nitrogen fertilizer can increase dry matter, grain production and radiation use efficiencies for durum wheat under semi-arid conditions. *European Journal of Agronomy*, 9, 21-34.
- Leenhardt D., Voltz M., Rambal S. (1995). A survey of several agroclimatic soil water balance models with reference to their spatial application. *European Journal of Agronomy*, 4 (1), 1-14.
- Leroy P., Jacquin C. (1994). *Un logiciel pour le choix d'assolement sur le périmètre irrigable d'une exploitation*. 17ème Conf. Rég. Irrigation Drainage ICID/CIID, Varna (Bulgarie), 16-22/05/1994. Vol 2, p 61-72.
- Leroy P., Deumier J.M., Jacquin C. (1996). Water management at farm level. Method and tool to support strategic decisions - In: *Management of Limited Water Resources. Agro-economical Consequences*. Final report of the EU contract no. 8001-CT91-0109.
- Lespinas J.L, Merrien A, Champolivier L. (2004). Contrôler la surface foliaire pour décider d'irriguer le tournesol. *Oléoscope*, 74, 23-24.
- Levrault F., Ruget F. (2001). Cogito, un modèle pour l'irrigation du maïs. In : Malézieux E, Trébuil G, Jaeger M, eds., *Modélisation des agroécosystèmes et aide à la décision*. CIRAD-INRA, 187-202.
- Lévy J.D., Bertin M., Combes B., Mazodier J., Roux A., (2005). *Irrigation durable*. Rapport CGGREF-MAAPR, 38 p. + annexes.
- Loomis R.S. (1983). Crop manipulations for efficient use of water: an overview. In : *Limitations to efficient water use in crop production* (Taylor, H.M., Jordan, W.R., Sinclair, T.R., eds), American Society of Agronomy, Madison (WI, USA), p.345-374.
- Lopez-Bellido L., Fuentes M., Castillo J.E., Lopez-Garrido F.J., Fernandez E.J. (1996). Long-term tillage, crop rotation, and nitrogen fertilizer effects on wheat yield under rainfed Mediterranean conditions. *Agronomy Journal*, 88, 783-791.
- Lorgeou J., Martin B. (2005). Précocité des variétés de maïs grain. *Perspectives Agricoles*, 309, 66-75.
- Lorgeou J., Bouthier A., Renoux JP, Cloute G. (2006). Stratégie d'évitement en maïs grain dans le Centre—Ouest : adapter le cycle aux contraintes hydriques par la précocité. *Perspectives Agricoles*, 321, 62-67.
- Louie M.J., Selker J.S. (2000) Sprinkler head maintenance effects on water application uniformity. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 126, 142-148.
- Ludlow M.M., Muchow R.C. (1990). A critical evaluation of traits for improving crop yields in water-limited environments. *Advances in Agronomy*, 43, 107-153.
- Mailhol J.C (2003). Analyse de la consommation en eau dans les différents contextes d'agriculture irriguée. Etude MEDD, Avril 2003, 33p (http://www.ecologie.gouv.fr/IMG/eau/etude_cemagref_prelevements_2001.pdf)
- Mailhol J.C. (2005). *Contribution à la maîtrise de l'irrigation et de ses impacts*. Mémoire d'habilitation à diriger les recherches, Univ. Montpellier II, 74p +annexes
- Mailhol J.C., Revol P., Ruelle P. (1996). PILOTE: an operational model for identifying crop water stress. In : Sustainability of irrigated agriculture: crop-water-environment models. *Proceedings of workshop at the 16th ICID Congress*, Cairo, Egypt, 17 Sept 1996.
- Marty J.R, Puech J., Maertens C., Blanchet R. (1975). Etude expérimentale de la réponse de quelques grandes cultures à l'irrigation. *Comptes Rendus de l'Académie d'Agriculture de France*, 61 (10), 560-570.
- Merrien A., Champolivier L. (1995). Tournesol : Existe-t-il une réponse variétale à la sécheresse? *Oléoscope*, 26, 22-24.
- Merrien A., Isbérie C, Bouthier A, Peyremorte P., Ruelle P. (1995). Des capteurs pour demain : outils de contrôle de l'état hydrique du végétal. In La conduite de l'irrigation. *De la stratégie au pilotage de l'irrigation*. RNED Hydraulique, AFEID, Cemagref Editions, pp 109-124.

- Muchow R.C., Hammer G.L, Vanderlip R.L. (1994). Assessing climatic risk to sorghum production in water-limited subtropical environments. II. Effects of planting date, soil water at planting, and cultivar phenology, *Field Crops Research*, 36, 235-246.
- Munawar A, Blevins R. L., Frye W. W. (1990). Tillage and cover crop management for soil water conservation. *Agronomy Journal*, 82, 773-777.
- Nielsen D.C, Vigil M.F, Anderson R.L, Bowman R.A, Benjamin J.G, Halvorson A.D (2002). Cropping system influence on planting water content and yield of winter wheat. *Agronomy Journal*, 94, 962-967.
- Nolot, J.M, Debaeke, P. (2001). A generic model to manage N in cropping systems differing by water availability. *11th Nitrogen Workshop*, Reims (France), 9-12 /09/2001, 401-402
- Nolot J.M., Debaeke P. (2003). Principes et outils de conception, conduite et évaluation de systèmes de culture. *Cahiers Agricultures*, 12, 387-400
- Nordblom T.L., Ahned A.H., Miller S.F., Glenn D.M. (1985). Long-run evaluation of fertilization strategies for dryland wheat in Northcentral Oregon: simulation analysis. *Agricultural Systems*, 18, 133-153.
- Norwood C. (1994). Profile water distribution and grain yield as affected by cropping system and tillage. *Agronomy Journal*, 86, 558-563.
- Norwood C.A, Currie R.S (1997). Dryland corn vs grain sorghum in Western Kansas. *Journal of Production Agriculture*, 10, 152-157.
- Norwood C.A. (2001). Planting date, hybrid maturity, and plant population effects on soil water depletion, water use, and yield of dryland corn. *Agronomy Journal*, 93, 1034-1042.
- Oweis T., Hachum A., Pala M. (2005). Faba bean productivity under rainfed and supplemental irrigation in northern Syria. *Agricultural Water Management*, 73, 57-72.
- Passioura J.B. (1977). Grain yield, harvest index and water use of wheat. *Journal of Australian Institute of Agricultural Science*, 43, 117-120.
- Passioura J.B (2006). Increasing crop productivity when water is scarce – from breeding to field management. *Agricultural Water Management*, 80, 170-196.
- Pereira L.S., Oweis T., Zairi A. (2002) Irrigation management under water scarcity. *Agricultural Water Management* 57, 175-206.
- Peyremorte P., Tron G. (1989). Prédominance du contexte physique et humain pour le choix d'une stratégie de pilotage des irrigations. In : *Actes du colloque des Nations Unies sur les méthodes améliorées pour préserver et protéger les ressources en eau et augmenter le rendement des cultures*. Avignon 25-29 /09/1989, 12p
- Pitts D., Peterson K., Gilbert G., Fastenau R. (1996). Field assessment of irrigation system performance. *Applied Engineering in Agriculture* 12, 307-313
- Puech J, Cabelguenne M, Attonaty JM, Leroy P, Amigues JP, Balas B, Perarnaud V (1997). Gestion de l'eau à l'échelle de l'exploitation agricole. In « *L'eau dans l'espace rural* » (Riou C, Bonhomme R, Chassin P, Neveu A, Papy F, eds), AUPELF-URELF & INRA Editions, p. 101-119.
- Rachidi F., Kirkham M.B., Stone L.R., Kanemasu E.T. (1993). Soil water depletion by sunflower and sorghum under rainfed conditions. *Agricultural Water Management*, 24, 49-62.
- Richards R.A. (2006). Physiological traits used in the breeding of new cultivars for water-scarce environments. *Agricultural Water Management*, 80, 197-211.
- Rinaldi M., Rizzo V., Franceso F. (1996). Effects of winter sowing on sunflower yield, oil and plant characteristics in Southern Italy. *Proc 14th Int.Sunflower Conf.*, Beijing (China), 345-350.
- Rinaldi M. (2004). Water availability at sowing and nitrogen management of durum wheat: a seasonal analysis with the CERES-Wheat model. *Field Crops Research*, 89, 27-37.
- Robinson C.A. (2003). Dryland farming. In *Encyclopedia of Water Science*, B.A. Stewart & T.Howell (eds), Marcel Dekker, Inc., New York, 183-186.
- Ruelle P., Mailhol J.C, Itier B. (2004). Evaluation des pertes par évaporation lors des irrigations par aspersion en condition de fort déficit hydrique. *Ingénieries – E.A.T*, n°38, 13-20.
- Ruelle P., Mailhol J.C., Molle B. (2005). Systèmes et stratégies d'irrigation pour une agriculture durable. *Comptes Rendus de l'Académie d'Agriculture de France*, 16 Mai 2005, Paris, 16p.
- Sadras V.O., Connor D.J. (1991). Physiological basis of the response of harvest index to the fraction of water transpired after anthesis: a simple model to estimate harvest index for determinate species. *Field Crops Research*, 26, 227-239
- 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, 334 p.
- Sinclair T.R., Muchow R.C. (2001). System analysis of plant traits to increase grain yield on limited water supplies. *Agronomy Journal*. 93, 263-270
- 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*, Lewis Publishers, 2002, 178-205.
- 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.

- Soriano M.A, Orgaz F., Villalobos F.J, Fereres E. (2004). Efficiency of water use of early plantings of sunflower. *European Journal of Agronomy*, 21, 465-476.
- Stone L.R, Schlegel A.J, Gwin R.E, Khan A.H (1996). Response of corn, grain sorghum, and sunflower to irrigation in the High Plains of Kansas. *Agricultural Water Management*, 30, 251-259.
- Tanner C.B, Sinclair T.R (1983). Efficient water use in crop production: research or re-search. In : *Limitations to efficient water use in crop production* (Taylor, H.M., Jordan, W.R., Sinclair, T.R., eds), American Society of Agronomy, Madison (WI, USA), p.1-27.
- Tayot X., Ruget F., Bouthier A., Lorgeou J., Lacroix B., Pons Y. (1999). STICS en Poitou-Charentes : calibration et validation sur maïs et sorgho. *Perspectives Agricoles*, 243, 87-95.
- Teyssier F. (2006). Consommations d'eau pour irrigation sur 2001-2005 en Midi-Pyrénées. *Agreste Midi-Pyrénées*, Données n°35, 4p.
- Tron G., Isbérie C., Chol P. (2000). *La tensiométrie pour piloter les irrigations : une gestion raisonnée de la ressource en eau*. Educagri Editions, 247 p.
- Turner N.C. (2004a). Agronomic options for improving rainfall use efficiency of crops in dryland farming systems. *Journal of Experimental Botany*, 54, 2413-2425.
- Turner N.C. (2004b). Sustainable production of crops and pastures under drought in a Mediterranean environment. *Annals of Applied Biology*, 144, 139-147.
- Turner N.C., Wright G.C., Siddique K.H.H. (2001). Adaptation of grain legumes (pulses) to water-limited environments. *Advances in Agronomy*, 71, 193-231.
- Turner N.C., Prasertsak P., Setter T.L. (1994). Plant spacing, density, and yield of wheat subjected to postanthesis water deficits. *Crop Science*, 34, 741-748.
- Unger P.W. (1990). Sunflower. In: *Irrigation of Agricultural Crops*. B.A. Stewart and D.R. Nielson (eds). ASA Monograph n° 30, ASA-CSSA-SSSA, Madison, WI, pp. 775-791.
- 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.
- Van den Boogaard R., Veneklaas EJ, Peacock JM, Lambers H (1996). Yield and water use of wheat in a Mediterranean environment : cultivar differences and sowing density effects. *Plant and Soil*, 181, 251-262.
- Vlek P.L.G, Fillery I.R.P., Burford J.R. (1981). Accessions, transformation and loss of nitrogen in soils of the arid region. *Plant and Soil*, 58, 133-176.
- Wade L.J., Douglas A.C.L. (1990). Effect of plant density on grain yield and yield stability of sorghum hybrids differing in maturity (*Sorghum bicolor*). *Australian Journal of Experimental Agriculture*, 30, 257-264.
- Wagner-Riddle C., Gillespie T.J., Swanton C. J. (1994). Rye cover crop management impact on soil water content, soil temperature and soybean growth. *Canadian Journal of Plant Science*, 74, 485-495.
- Wahbi A., Sinclair T.R. (2005). Simulation analysis of relative yield advantage of barley and wheat in an eastern Mediterranean climate. *Field Crops Research*, 91, 287-296.
- Wallach D, Goffinet B, Bergez J.E, Debaeke P, Leenhardt D, Aubertot JN (2001). Parameter estimation for crop models : a new approach and application to a corn model. *Agronomy Journal*, 93, 757-766.
- Westfall D.G., Havlin J.L., Hergert G.W., Raun W.R. (1996). Nitrogen management in dryland cropping systems. *Journal of Production Agriculture*, 9, 192-199.
- Winter S.R., Musick J.T. (1993). Wheat planting date effects on soil water extraction and grain yield. *Agronomy Journal*, 85, 912-916.
- Woodruff D.R., Tonks, J. (1983). Relationship between time of anthesis and grain yield of wheat genotypes with different development patterns. *Australian Journal of Agricultural Research*, 34, 1-11.
- Zanolin A. (2003) *Irrigation de Précision en Petite-Beauce : Mesures au champ et modélisation stochastique spatialisée du fonctionnement hydrique et agronomique d'une parcelle de maïs*. Thèse Université Paris 6.