

## QUELLES STRATÉGIES AGRONOMIQUES POUR UNE GESTION OPTIMALE DE LA RESSOURCE EN EAU DU SOL EN SYSTÈME PLUVIAL ?

par Julie Constantin<sup>1</sup>, Philippe Debaeke<sup>1</sup>, Magali Willaume<sup>2</sup>

### Introduction

Dans un contexte général de diminution de la disponibilité en eau pour l'agriculture (épisodes de sécheresse plus fréquents, Loi sur l'Eau et les Milieux Aquatiques, changement climatique), la conception de systèmes de culture moins sensibles à la sécheresse, valorisant mieux les ressources en eau du milieu ou plus économes en eau d'irrigation présente un intérêt croissant (Amigues et al., 2006). En France, cet enjeu concerne aussi bien les exploitations irriguées soumises à l'évolution actuelle des volumes prélevables que les 'petites terres' superficielles du Centre ou du Sud-Ouest où se pratique l'agriculture pluviale.

Pour mieux valoriser l'eau disponible, on peut tenter d'agir sur la disponibilité hydrique du milieu au cours du cycle cultural -l'offre- ou sur les besoins en eau pour la croissance de la culture -la demande. Puisqu'il est difficile d'agir sur certains déterminants de cet équilibre (climat, propriétés des sols, disponibilité globale de l'eau d'irrigation), le levier génétique est souvent évoqué (sélection et mise en culture de variétés et espèces tolérantes à la sécheresse). Pourtant, d'autres leviers agronomiques sont possibles et actionnables à différentes échelles (itinéraire technique, succession de cultures, choix d'assolement).

En particulier, les pratiques culturales qui jouent sur le développement de la surface foliaire vont influencer sur l'évapotranspiration de la culture, tant en quantité totale qu'en terme de dynamique (Debaeke et Aboudrare, 2004). La gestion du développement foliaire (vitesse, indice foliaire maximal) va bien sûr jouer sur la transpiration qui conditionne la production de biomasse et le rendement des cultures. La vitesse de couverture va également influencer sur l'évaporation du sol, en particulier dans les premiers stades végétatifs. Les besoins en eau de la culture tout comme l'intensité de l'évaporation de l'eau du sol vont aussi varier en fonction de la position du cycle cultural dans le temps. Ainsi, il existe des marges de manœuvre pour ajuster l'offre et la demande en eau de manière dynamique au cours du cycle.

Parmi les leviers actionnables, la stratégie d'esquive agronomique consiste à décaler -par le choix de variétés précoces ou par la date de semis- les stades phénologiques les plus sensibles au déficit hydrique (souvent la floraison) vers une période où la ressource est plus disponible. *A contrario*, la stratégie de rationnement végétatif (ou d'évitement) passe par une diminution de la densité de peuplement et de la fertilisation azotée. Il est ainsi possible de piloter le développement de la surface foliaire pour réduire la transpiration pendant la période végétative, afin de conserver l'eau non consommée pour la phase de remplissage. Ces stratégies sont particulièrement utiles dans les situations où l'eau est abondante au printemps et déficitaire en été. Dans le même temps, une fermeture rapide du couvert peut être recherchée pour réduire l'évaporation du sol et contrôler les adventices, stratégie qui passe par l'utilisation de variétés à croissance précoce, mais aussi par des interrangs étroits, des densités de peuplements élevées, une fertilisation azotée suffisante.

Les interactions entre le choix variétal, la date de semis, le niveau de fertilisation azotée (et son fractionnement) et la densité de semis vont donc permettre de contrôler d'une part la position du cycle

---

<sup>1</sup> INRA, UMR AGIR, BP 52627, 31326 Castanet-Tolosan Cedex, France.

<sup>2</sup> Université de Toulouse, INP, ENSAT, UMR AGIR, BP 52627, 31326 Castanet-Tolosan Cedex, France

cultural et des principaux stades phénologiques, d'autre part la vitesse et la durée de fonctionnement du couvert (Tableau 1).

**Tableau 1** – Effets de la conduite de culture sur les processus écophysologiques qui gouvernent le besoin en eau du peuplement

	Evitement (rationnement)		Esquive
	Vitesse de fermeture	Maintien de la surface verte	Position du cycle cultural
Variété	*	*	**
Date de semis	*	*	**
Densité de peuplement	**	*	
Inter-rang	**		
Fertilisation N	*	**	
Irrigation	*	**	

Du fait de la multitude de combinaisons de pratiques possibles, de la complexité des interactions dynamiques entre techniques, climat et sol, et de la diversité des pédoclimats à explorer, la modélisation s'avère l'outil le plus adapté. Seul un modèle de simulation dynamique représentant avec réalisme les processus en jeu (termes du bilan hydrique, interaction avec l'alimentation azotée) et prenant en compte la variabilité climatique peut permettre d'évaluer les stratégies agronomiques d'esquive et de rationnement pour une gamme large de conditions (sol, climat, conduite).

Pour analyser les résultats de simulation, nous retiendrons le cadre conceptuel de Passioura (1977) qui décompose le rendement des cultures en conditions hydriques limitantes en différents termes relatifs à la disponibilité en eau et à l'efficacité d'utilisation de l'eau prélevée par le couvert :

$$\text{Rendement (Rdt)} = \text{Biomasse aérienne (BA)} \times \text{Indice de Récolte (IR)}$$

$$\text{BA} = \text{Transpiration (T)} \times \text{Efficacité de Transpiration (TE)}$$

Or la transpiration peut être décomposée comme suit :

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

avec  $E_s$  l'évaporation du sol et  $T$  la transpiration de la culture. Cela permet de représenter à la fois la quantité d'eau totale évapotranspirée ( $E_s+T$ ) et la proportion d'eau évaporée par rapport à l'eau transpirée ( $E_s/T$ ).

La décomposition finale du rendement peut donc être exprimée comme suit :

$$\text{Rdt} = [(E_s + T) / (1 + E_s/T)] \times \text{TE} \times \text{IR}$$

Par conséquent, une augmentation du rendement pourra être obtenue par:

- Une augmentation de l'eau totale consommée ( $E_s + T$ )
- Une diminution de la proportion d'eau évaporée ( $E_s/T$ )
- Une maximisation de l'efficacité de transpiration (TE)
- Une optimisation de l'indice de récolte (IR), généralement lié à un bon équilibre de transpiration avant et après floraison.
- La combinaison de plusieurs de ces termes.

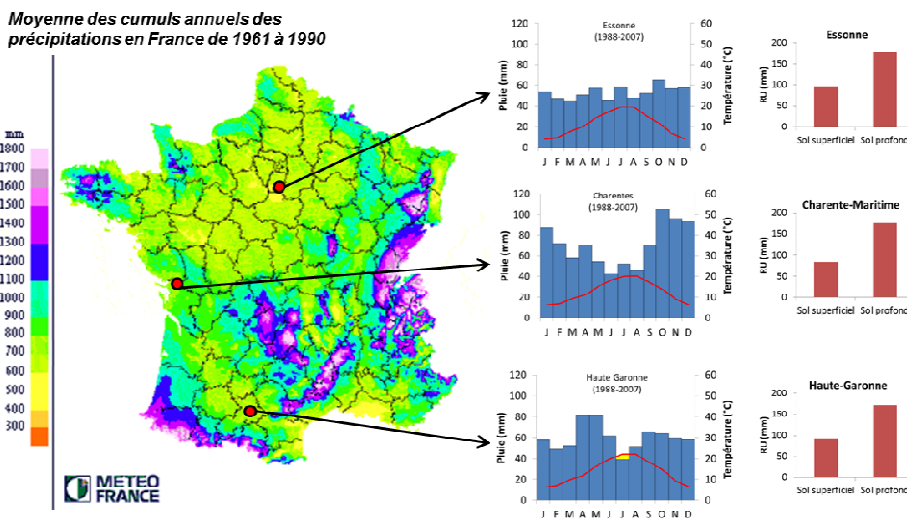
### Matériel et méthodes

Le modèle STICS 8.0 (Brisson et al., 2008) a été choisi pour évaluer les stratégies d'évitement et d'esquive permises par différentes gestions du couvert en conditions hydriques plus ou moins limitantes. En effet, ce

modèle de culture dynamique tient compte (entre autres facteurs) de la disponibilité en eau, en azote, mais également de la température pour simuler les bilans d'eau, d'azote et de carbone du système « sol-plante ». Il permet d'obtenir des informations journalières concernant les stades de développement, l'indice foliaire, la biomasse aérienne (BA), l'évaporation (Es), la transpiration (T), mais également le rendement final (Rdt) et l'indice de récolte (IR) pour de nombreuses espèces cultivées.

Un plan d'expérience numérique a été conçu pour simuler divers itinéraires techniques pour:

- 2 cultures: blé tendre (culture d'hiver) et tournesol (culture de printemps),
  - 2 profondeurs de sol : réserve utile (RU) de 90 mm (sol superficiel) ; RU de 180 mm (sol profond)
  - 3 climats: Essonne, Charente-Maritime, Haute-Garonne
- soit 6 contextes pédoclimatiques avec des contraintes hydriques plus ou moins marquées (Figure 1).



**Figure 1 :** Localisation des sites et caractérisation de leurs pédoclimats: diagramme ombrothermique (1988-2008) et niveaux de réserve utile (RU) retenus.

Pour chaque situation, 24 itinéraires techniques ont été conçus (3 dates de semis x 2 précocités variétales x 2 densités de peuplement x 2 niveaux de fertilisation azotée) afin d'explorer une large gamme de situations agricoles possibles (Tableau 2). Un itinéraire technique « moyen », correspondant aux préconisations les plus courantes nous a servi de référence.

Les simulations ont été effectuées à partir de données climatiques journalières sur 20 ans (1988-2008, données SAFRAN – Météo France). On distinguera dans notre analyse les résultats moyens sur la série climatique (20 ans) et les valeurs relatives à 2006 en Haute Garonne, exemple d'année particulièrement sèche.

	<b>Blé</b>	<b>Tournesol</b>
Semis précoce	1/10	15/3
<i>Semis intermédiaire</i>	<u>20/10</u>	<u>15/4</u>
Semis tardif	15/11	15/5
Variété précoce (°jour)	1470 (base 0°C)	1550 (base 6°C)
<i>Variété tardive (°jour)</i>	<u>1620 (base 0°C)</u>	<u>1720 (base 6°C)</u>
Fertilisation N faible (kg.ha <sup>-1</sup> )	120	0
<i>Fertilisation N élevée (kg.ha<sup>-1</sup>)</i>	<u>220</u>	<u>80</u>
Densité faible (plantes.m <sup>-2</sup> )	150	4
<i>Densité forte (plantes.m<sup>-2</sup>)</i>	<u>300</u>	<u>8</u>

**Tableau 2 :**

Valeurs retenues pour la caractérisation des 24 itinéraires techniques de chaque culture. En italique et souligné, les valeurs relatives à l'itinéraire technique de référence.

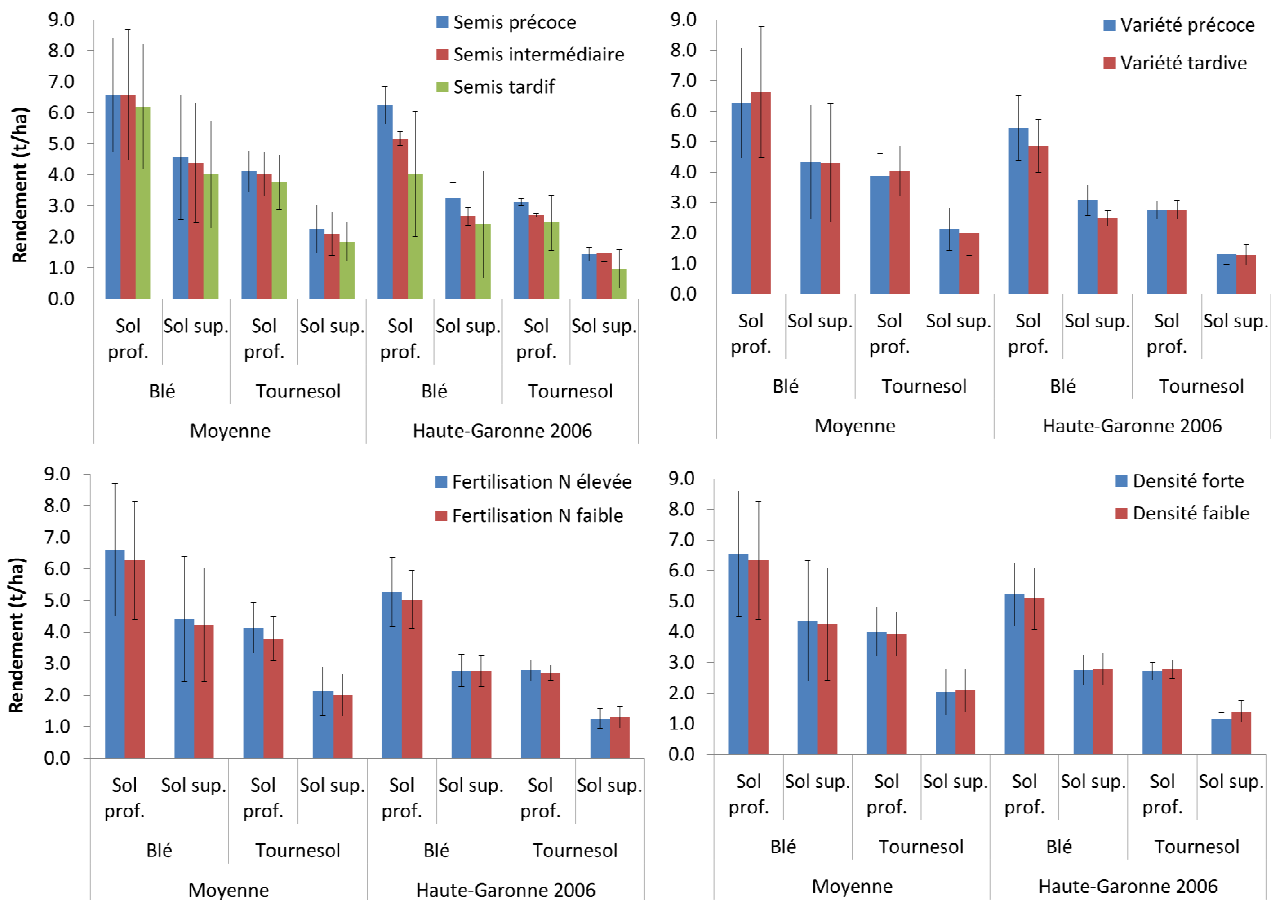
Le nombre total de simulations s'élève donc à 57 600 simulations.

## Résultats

### 1- Impact des choix de pratiques culturales sur le rendement en fonction des conditions pédoclimatiques

Les variations de rendement liées au choix d'itinéraires techniques peuvent être importantes. Par rapport à la situation de référence, en choisissant l'itinéraire technique le plus productif pour chaque année, on peut accéder par la mobilisation des stratégies d'esquive et/ou de rationnement à des augmentations de rendement en moyenne sur 20 ans de 9% à 24% (blé) et de 4% à 37% (tournesol) selon la profondeur de sol et le site considéré. Pour certaines années, la marge de manœuvre est très limitée, mais dans 67% des cas, le gain de rendement permis par le choix de l'itinéraire technique adéquat pour l'année considérée est supérieur à 5%.

**Figure 2.** Effet de la précocité de semis (a), du niveau de fertilisation azotée (b), de la précocité variétale (c) et de la



densité de semis (d) sur le rendement (+/-e.t) des cultures de blé et tournesol, en sols profonds ou superficiels. A gauche, rendements moyens sur 20 ans, à droite rendements simulés sur le site d'Auzeville en 2006 (contrainte hydrique marquée).

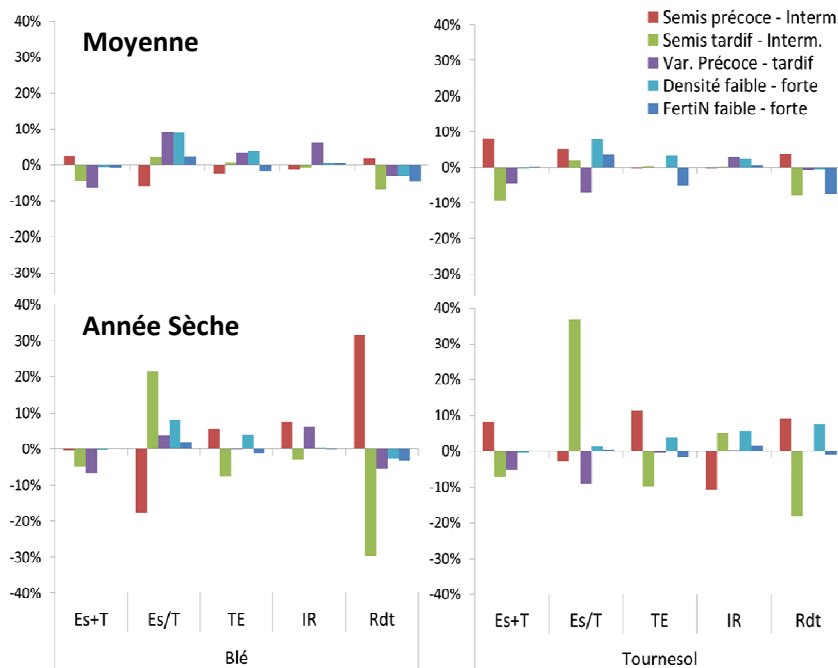
Les semis précoces permettent d'obtenir en moyenne sur 20 ans les meilleurs rendements quels que soient la culture ou le sol considérés (Figure 2a). Cet effet de la date de semis précoce est encore plus notable en sols superficiels ou en situation particulièrement sèche (Haute Garonne en 2006). Par rapport à un semis intermédiaire, les semis tardifs font perdre en moyenne entre 0.30 et 0.48t ha<sup>-1</sup> en blé et entre 0.19 et 0.38t ha<sup>-1</sup> en tournesol selon le site.

Les variétés tardives de blé et de tournesol donnent en moyenne des rendements plus importants que les variétés précoces en sols profonds quel que soit le site (Figure 2b), mais cet avantage n'est plus visible en sols superficiels. En situation sèche, les variétés précoces de blé offrent même de bien meilleurs rendements.

Comme attendu, les situations fertilisées plus fortement ont en moyenne de meilleurs rendements (+0.35t ha<sup>-1</sup> en sols profonds), même si la différence est moins marquée sur sols superficiels (Figure 2c). On note en outre qu'en situation particulièrement sèche (Haute-Garonne-2006), le niveau de fertilisation induit très peu de réponse voire même une inversion pour le tournesol en sol superficiel (-0.04t ha<sup>-1</sup>).

L'impact de la densité de semis sur les rendements simulés est fortement lié aux conditions pédoclimatiques (Figure 2d). Les faibles densités peuvent être avantageuses en situation sèche ou sur sol superficiel, en particulier sur le tournesol. Les fortes densités seront plus adaptées en sols profonds.

Globalement les stratégies d'esquive (choix variétal et date de semis) ont des impacts plus importants que la stratégie de rationnement végétatif (fertilisation N et densité de peuplement). En tournesol, sur sol superficiel, l'intérêt d'une variété précoce semée tôt est clairement mis en avant. Pour un blé en sol profond, une variété précoce semée à forte densité est plus performante, mais le semis doit rester précoce ou intermédiaire.



**Figure 3.** Effets des changements de pratiques sur les termes de l'équation de Passioura (1977). Pour chaque pratique (semis, variété, densité, fertilisation) on représente pour chaque terme la différence (en %) entre pratiques alternatives et valeur de référence. (Es) : évaporation du sol pendant le cycle cultural, T : transpiration cumulée de la culture, TE : efficacité de transpiration, IR : indice de récolte, Rdt : rendement final de la culture. A gauche, on présente les résultats relatifs au blé, à droite au tournesol, en haut en moyenne sur 20 ans, en bas en année sèche (2006).

## 2- Dissection des effets sur le rendement suivant le cadre proposé par Passioura

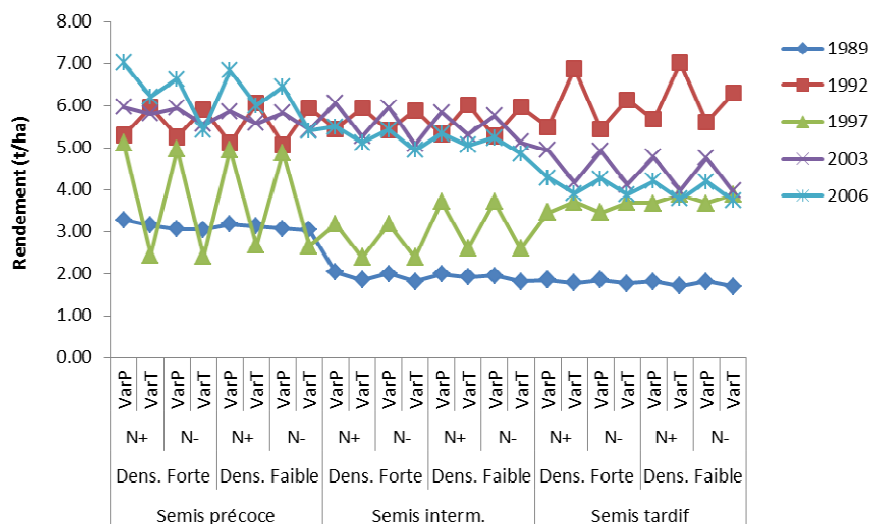
Les différences observées en moyenne sur les différents termes de l'équation de Passioura par rapport à la situation de référence sont faibles (<10%, Figure 3). Modifier les pratiques agricoles par rapport à la référence induit des différences faibles (5-15 mm) dans la majorité des cas. Dans quelques cas extrêmes, une variation maximale de 66 mm de l'évaporation et de 65 mm de la transpiration peut être observée. Dans 91 % des cas en blé (contre 80 % en tournesol), l'augmentation du rendement est liée à une maximisation de l'efficacité de l'eau pour la production de grains ; dans les autres cas, l'évapotranspiration (consommation) est augmentée mais pas l'efficacité.

En année sèche (2006), le semis précoce du blé permet un gain de rendement (~35 %) en lien avec une réduction de la part d'eau évaporée (Es/T), une augmentation de l'efficacité de transpiration et de l'indice de

récolte (Figure 3). Le cycle de la culture est décalé sur des périodes plus favorables avec une meilleure répartition de l'eau avant et après floraison. A l'inverse, un semis tardif, en tournesol comme en blé, occasionne une perte de rendement. La consommation totale en eau de la culture (Es+T) est plus faible en moyenne, mais c'est surtout la proportion d'eau évaporée par le sol (Es/T) qui augmente, particulièrement en année sèche (2006). Le cycle est décalé vers des périodes à plus forte demande climatique, l'eau consommée l'est moins efficacement pour la culture (TE plus faible). En tournesol, l'augmentation du rendement en semis précoce (~10 %) est à relier à une plus forte consommation d'eau, à une meilleure efficacité de transpiration, en dépit d'un plus faible indice de récolte lié à la forte biomasse produite.

### 3- Pas un seul itinéraire technique optimal mais des itinéraires plus ou moins adaptés

Il n'y a pas d'itinéraire technique « type » permettant de répondre favorablement à tous les profils climatiques annuels étudiés. En effet, la variabilité interannuelle des performances de chaque itinéraire technique est très importante. Par exemple, en Haute Garonne sur des sols profonds, l'itinéraire technique le plus performant sur l'année climatique sèche 2006 comportera un semis précoce d'une variété précoce ainsi qu'une densité et une fertilisation azotée élevées. Il ne sera par exemple pas le même que l'itinéraire technique maximisant le rendement en 1992 qui propose un semis tardif de faible densité d'une variété tardive avec une fertilisation azotée forte (Figure 4). De même, le choix du ou des itinéraires techniques optimum dépendra du site et de la profondeur de sol (données non montrées).



**Figure 4** Variabilité interannuelle simulée du rendement du blé (Haute Garonne – sol profond) en fonction de différents itinéraires techniques définis par une combinaison de date de semis (précoce, intermédiaire ou tardive), d'une densité (forte ou faible), d'un niveau de fertilisation azotée (N- faible, N+ forte) et du choix d'une variété (VarP Précoce ou VarT Tardive).

Toutefois, certains itinéraires techniques tirent leur épingle du jeu en fréquence. Quels que soient le site ou la culture, les semis précoces à fortes densités et fertilisation azotée élevées sont souvent très bien classés (Tableau 3). En termes de variétés, pour le tournesol, les variétés précoces obtiennent plus fréquemment de meilleurs résultats en sol superficiel et les variétés tardives en sol profond. Au contraire, pour le blé, les variétés tardives sont plus souvent adaptées, même en sols superficiels.

**Tableau 3** Classement des 10 meilleurs itinéraires techniques obtenant en fréquence sur la série climatique (20 ans) les 3 meilleurs rendements (1, 2, 3). En italique et souligné, l'itinéraire technique de référence pour chaque culture. 31 : Haute Garonne ; 17 : Charente-Maritime ; 91 : Essonne

Semis	Fertilisation	Variété	Densité	Blé						Tournesol					
				Site du 31		Site du 17		Site du 91		Site du 31		Site du 17		Site du 91	
				Sol prof.	Sol sup.	Sol prof.	Sol sup.	Sol prof.	Sol sup.	Sol prof.	Sol sup.	Sol prof.	Sol sup.	Sol prof.	Sol sup.
Précoce	N+	VarT	fort	1	1	1	1	2	1	1	2	1	2	1	2
Précoce	N+	VarP	fort	2		3	1	1	2	3	1		1		1
Précoce	N+	VarT	faible		2					2		2		2	
Tardif	N+	VarT	fort			2									
Précoce	N+	VarP	faible		2				3		2		3		2
<i>Interm.</i>	<i>N+</i>	<i>VarT</i>	<i>fort</i>			3	3	3				2			
Tardif	N+	VarT	faible						3						
Interm.	N+	VarT	faible								2				
Interm.	N+	VarP	fort	3											
Tardif	N+	VarP	fort				3								

En conclusion, nos résultats confirment l'intérêt de la modélisation (STICS) pour explorer la réponse du rendement à la conduite de culture pour une gamme d'environnements hydriques. Mais ils incitent également à penser que les possibilités offertes par la gestion du couvert pour esquisser ou éviter la contrainte hydrique restent assez limitées dans les conditions pluviales de l'agriculture française. Les effets de la gestion du couvert sont en effet ici estimés, et même si cette gestion permet des gains de rendement ou des économies d'eau, ces gains sont de faible ampleur et ne pourrait constituer une réelle substitution à l'irrigation. La date de semis a un poids plus important que la fertilisation ou la densité de semis pour introduire des variations de rendement. En conditions semi-arides, des systèmes bien plus innovants (par ex. « skip-row » de maïs ou sorgho avec une culture intercalaire de légumineuse (Mesfin et al., 2010)) ont été proposés et mériteraient être explorés dans un contexte d'agriculture européenne pluviale soumise à de plus fortes contraintes hydriques.

Enfin, il est important de préciser que les résultats discutés ici ne concernent que le rendement final et les composantes du rendement. Il conviendrait de compléter ces résultats par une analyse économique (marge brute) permettant de relativiser les variations de rendement par les variations de charges liées aux intrants. De même, cette analyse ne prend pas en compte toutes les contraintes biotiques (enherbement, maladies fongiques) pouvant également être impactées par les stratégies agronomiques explorées.

### Références

- (1) AMIGUES J.P., DEBAEKE P., ITIER B., LEMAIRE G., SEGUIN B., TARDIEU F., THOMAS A., 2006. – *Sécheresse et agriculture. Adapter l'agriculture à un risque accru de manque d'eau*. Synthèse de l'expertise scientifique collective, INRA (France), 72 p.
- (2) BRISSON N., LAUNAY M., MARY B., BEAUDOIN N., 2008. – *Conceptual basis, formalisations and parameterisation of the STICS crop model*, Quae Editions.
- (3) DEBAEKE P., ABOUDRARE A., 2004. – Adaptation of crop management to water-limited environments. *European Journal of Agronomy* **21**, 433-446.
- (4) MESFIN T., TESFAHUNEGN G.B., WORTMANN C.S., MAMO M., NIKUS O., 2010. – Skip-row planting and tie-ridging for sorghum production in semiarid areas of Ethiopia. *Agronomy Journal* **102**, 745-750.
- (5) PASSIOURA J.B. 1977. – Grain yield, harvest index and water use of wheat. *Journal of Australian Institute of Agricultural Science* **43**, 117-120.