

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

Nadine Brisson

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

### **Résumé**

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

### **Introduction**

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

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

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

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

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

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

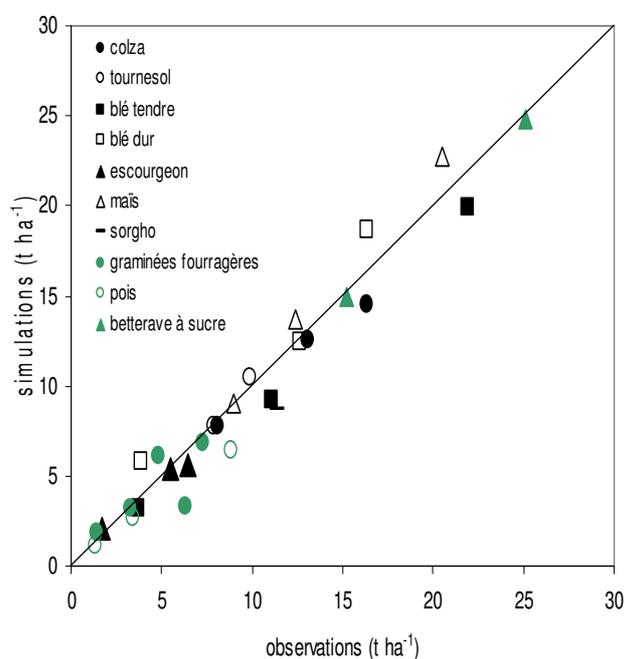
### *1.1. Modéliser la contrainte*

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

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

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

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



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

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

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

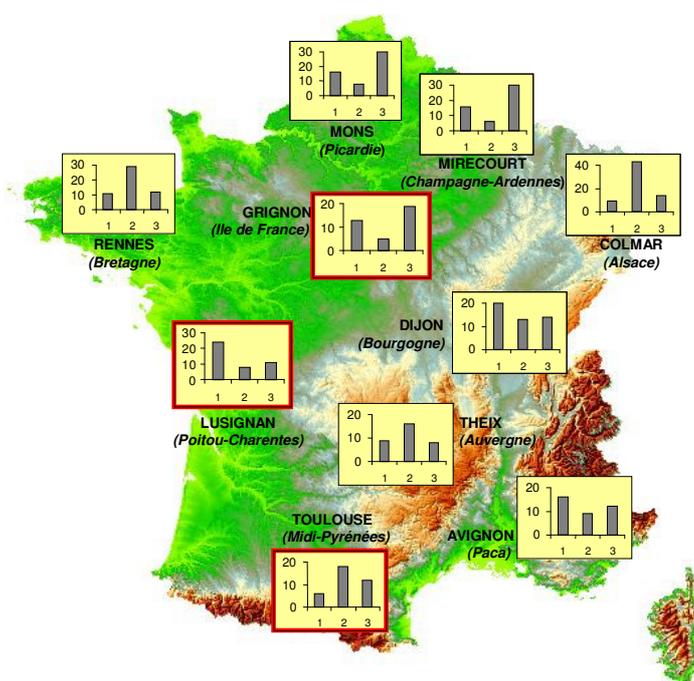
En simulant cet ensemble de techniques, on s'aperçoit que selon les situations pédoclimatiques ce sont les effets positifs ou les effets négatifs qui prédominent. De façon plus stratégique, l'agriculteur peut réaliser ses choix de culture, de date de semis ou de variétés de façon à échapper au déficit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

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

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

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

### 2.1. Protocoles de simulation



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

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

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

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

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

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

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

Tableau 1 : Rotations retenues pour les trois régions test.

### 2.2 Analyse des simulations « pédoclimatiques »

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

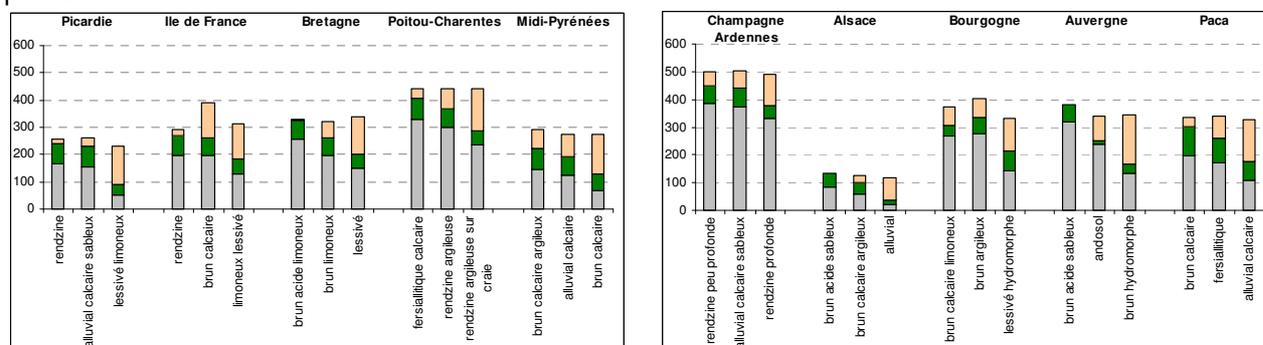


Figure 3 : Moyenne du cumul annuel drainage + ruissellement (mm) pour les trois surfaces étudiées, par type de sol (en abscisse), les sols étant regroupés par région. Les valeurs sont présentées de façon emboîtée (sol nu en beige, prairie irriguée en vert foncé et prairie pluviale en gris) mettant en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

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

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

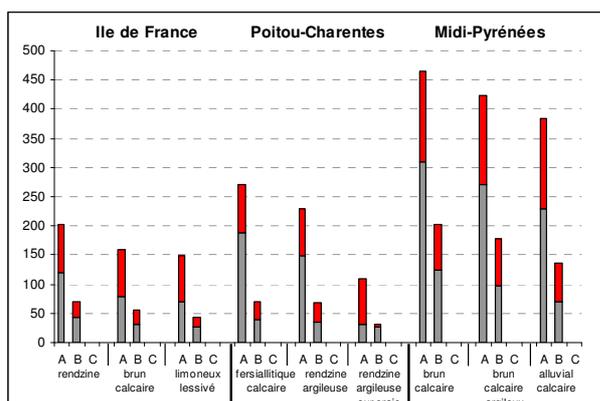
Picardie	Ile de France	Bretagne	Poitou-Charentes	Midi-Pyrénées	Champagne-Ardennes	Alsace	Bourgogne	Auvergne	PACA
-9	102	84	209	-82	161	-124	131	171	-178

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

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

### 2.3 Analyse des simulations « agricoles »

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



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

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

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

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

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

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

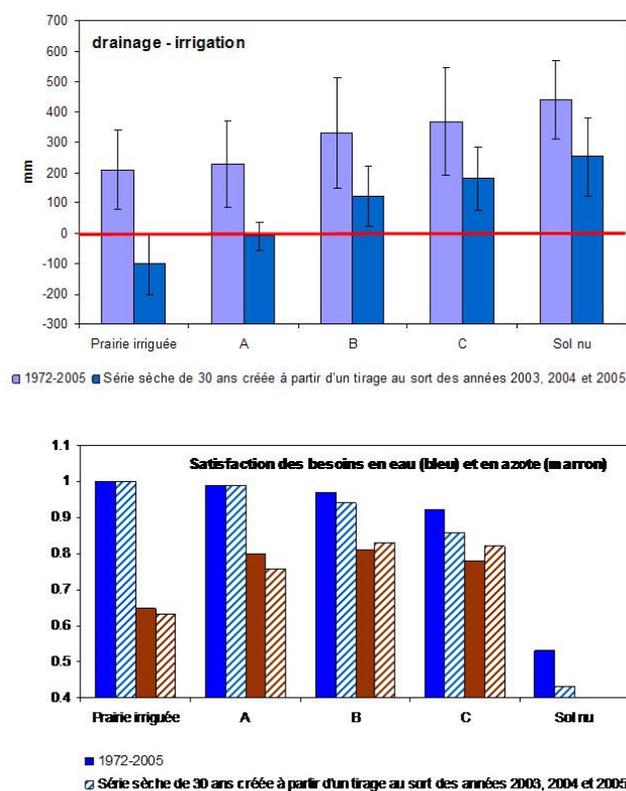
Région	Ile de France	Poitou-Charentes	Midi-Pyrénées
Sol t ha <sup>-1</sup>	sol limoneux lessivé	rendzine argileuse sur craie	sol alluvial calcaire
14-15	◀ betterave		
13-14			
12-13			
11-12			
10-11			
9-10			◀ maïs
8-9		◀ maïs	
7-8	◀ maïs		
6-7	◀ blé	◀ blé	◀ blé
5-6			
4-5			◀ sorgho

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

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

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

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



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

## Conclusion

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

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

### Références bibliographiques

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

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

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

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

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

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