

Simulation de la réponse variétale du tournesol à l'environnement à l'aide du modèle SUNFLO

Philippe DEBAEKE¹
 Pierre CASADEBAIG¹
 Bertrand HAQUIN¹
 Emmanuelle MESTRIES²
 Jean-Pierre PALLEAU³
 Frédéric SALVI⁴

¹ INRA, UMR AGIR, BP 52627,
 31326 Castanet-Tolosan cedex, France
 <debaeke@toulouse.inra.fr>

² CETIOM c/o ENSAT, BP 32607,
 31326 Auzeville-Tolosane, France

³ CETIOM, Domaine du Magneraud,
 Saint-Pierre d'Amilly, 17700 Surgères, France

⁴ CETIOM, Centre de Grignon,
 BP 4, 78850 Thiverval-Grignon, France

Abstract: Variety assessment could be supported by the use of dynamic crop modelling. The SUNFLO model was developed to simulate the achene yield and oil concentration of sunflower crop with a special attention paid to the description of varietal diversity. For that purpose, a variety was characterized in the model by 12 parameters of phenology, leaf area development, allocation and response to water stress. These parameters were measured either in field conditions (dense stands) or in greenhouse pot experiments. In 2008, two variety trials were carried out by CETIOM in non limiting conditions and a greenhouse experiment was conducted by INRA to calibrate the response of leaf expansion and plant transpiration to soil water depletion. The model parameterized with these 3 experiments on 18 commercial varieties was evaluated for yield in 42 situations of the post-registration network conducted by CETIOM in France in 2008. The yield of a given variety in a given environment was simulated with a mean error of 5 q/ha (relative error = 16%). When averaging a variety over all the environments or an environment over all the varieties, the error was of 3.5 q/ha (relative error = 11%). The model could be used to rank environments (through sunflower crop response) in a variety assessment network and to separate varieties with sufficient phenotypic differences.

Key words: crop model, sunflower, variety assessment, genotypic parameter

La montée en puissance des préoccupations environnementales et des exigences de qualité des produits agricoles, mais aussi l'émergence de cahiers des charges « bas intrants » posent de nouvelles questions à l'évaluation des innovations variétales. Celle-ci ne doit plus seulement porter sur la bonne valeur agronomique et technologique moyenne des variétés et sur la stabilité de leurs performances entre les lieux, mais aussi permettre la valorisation de leurs spécificités pour différents environnements et différentes conduites de culture. Cette nouvelle posture impose de comprendre, de prévoir et de contrôler l'interaction variété × milieu × conduite de culture.

Lorsque les interactions entre la variété et le milieu (sol, climat) sont explicitées dans les réseaux expérimentaux, elles le sont le plus souvent par des modèles statistiques intégrant des variables climatiques (Foucteau *et al.*, 2001 ; Lecomte, 2005). Or, l'utilisation de cette information pour le choix variété-conduite est nécessairement limitée par la gamme des situations expérimentales (climat, variétés, conduites) et par le manque d'interprétation de ce qui constitue la réponse dynamique d'un génotype au milieu transformé par les pratiques culturales. En effet, l'effet site confond le type de sol, le climat de l'année et la conduite de culture choisie par l'expérimentateur.

Des modèles de simulation dynamique ont été développés dès les années 1980 pour rendre compte de la réponse d'une culture aux stress abiotiques majeurs (température, rayonnement, eau, azote) (Hammer *et al.*, 2002). Pour la plupart des paramètres culturels qui sont renseignés dans ces modèles, la question de la variabilité génétique est posée (Boote *et al.*, 2001). Plusieurs exemples récents montrent que les modèles de simulation peuvent être mobilisés utilement pour comprendre et prévoir l'interaction variété × milieu × conduite (Agüera *et al.*, 1997 ; Jeuffroy *et al.*, 2006).

En tournesol, on dispose déjà de plusieurs modèles de simulation de la culture. Certains sont spécifiques au tournesol (Chapman *et al.*, 1993 ; Villalobos *et al.*, 1996 ; Pereyra-Irujo et Aguirrezabal, 2007), d'autres représentent la culture de manière générique (Cabelguenne *et al.*, 1999 ; Todorovic *et al.*, 2009). Cependant, le paramétrage de ces modèles n'est pas adossé à un phénotypage explicite de la variabilité génétique. Par ailleurs, le nombre de paramètres, souvent élevé, rend difficile une mise à jour régulière du paramétrage compatible avec l'innovation variétale.

Pour ces raisons, le modèle de simulation SUNFLO a été développé par Casadebaig (2008). Ce modèle simule de manière dynamique les performances (rendement, teneur en huile

[TH]) des variétés de tournesol en fonction des principales contraintes abiotiques et de la conduite de culture.

L'évaluation des variétés de tournesol est menée :

- en préinscription, principalement par les sélectionneurs ;
- lors des épreuves d'inscription au catalogue sous l'égide du Geves (Geves, 2007) ;
- en postinscription par le CETIOM (Cetiom, 2000).

Un certain nombre de caractères sont mesurés en peuplement dense dans le cadre des épreuves dites de VAT (valeur agronomique et technologique) (Uyttewaal, 2010). C'est pourquoi la méthode de phénotypage retenue pour SUNFLO utilise et complète cette VAT pour paramétrer le flux de variétés inscrites chaque année en tournesol (environ : 20-30).

L'objectif de cet article est de présenter :

- la méthode de phénotypage développée pour SUNFLO ;
- la variabilité phénotypique observée parmi les variétés récentes pour des caractères peu étudiés ;
- le paramétrage de SUNFLO et la qualité de l'ajustement ;
- l'évaluation du modèle SUNFLO sur le réseau de postinscription du CETIOM.

Matériels et méthodes

Modèle SUNFLO

Le modèle SUNFLO 1.0 simule, jour après jour, la progression de l'enracinement, l'élaboration de la surface foliaire et de la biomasse aérienne du tournesol en fonction des contraintes de température, de rayonnement, d'eau et d'azote. La production de biomasse suit l'approche classique de Monteith (1977). Le modèle se base sur une mise en place et une sénescence distribuée de la surface foliaire et non sur une approche « grande feuille ».

Le modèle sépare le cycle en six phases en utilisant le temps thermique (base : 4,8 °C) :

- semis (A0)-levée (A2) ;
- A2-bouton étoilé (E1) ;
- E1-stade F1 (début floraison) ;
- F1-stade M0 (début remplissage des akènes) ;
- M0-stade M3 (maturité physiologique) ;
- M3-stade M4 (récolte).

Chaque changement de stade induit des processus physiologiques différenciés.

L'absorption d'eau et d'azote est évaluée chaque jour et des indices de stress sont calculés pour traduire l'effet de ces deux contraintes sur l'expansion foliaire et l'accumulation de biomasse.

Le rendement est estimé par le biais d'un indice de récolte (IR) s'appliquant à la matière sèche totale produite à maturité physiologique et non pas à partir des composantes du rendement. L'IR et la TH sont estimés par des régres-

sions linéaires multiples comprenant des paramètres variétaux potentiels (IRpot, THpot) et des variables d'état du peuplement estimées par le modèle.

Douze paramètres génotypiques permettent de caractériser les variétés et de différencier leur fonctionnement (tableau 1) :

- quatre paramètres de phénologie ;
- quatre paramètres d'architecture foliaire ;
- deux paramètres de réponse à la contrainte hydrique ;
- deux paramètres d'allocation des produits de la photosynthèse vers les akènes.

La plupart de ces paramètres sont mesurés directement au champ (parcelles VAT) ou en serre. Certains sont calculés à partir des mesures au champ : c'est le cas des stades E1 et M0 et du coefficient d'extinction de la lumière (k).

Le sol est décrit par la réserve utile (mm) sur la profondeur de sol accessible aux racines et par la vitesse de minéralisation potentielle de l'azote (kg N/j normalisé).

Le climat journalier utilisé pour la simulation comprend cinq variables : température maximale et minimale, pluie, évapotranspiration potentielle, rayonnement global.

La conduite de culture est décrite par la date de semis, la densité de levée, les dates et les quantités d'apports d'eau et d'azote. Les dates de levée et de récolte peuvent être forcées dans le modèle.

On se reportera, pour une présentation détaillée des équations du modèle SUNFLO 1.0, aux

travaux de Casadebaig (2008) et de Casadebaig *et al.*, (2010).

Phénotypage au champ

En 2008, les paramètres de phénologie, d'architecture et d'allocation ont été mesurés pour 18 variétés de tournesol (11 oléiques : Atomic RMO, Aurasol, ES Ethic, ES Magnific, Extrasol, LG5450 HO, NK Countri, NK Ferti, NK Sinfoni, Pacific, Ultrasol, et sept classiques : ES Biba, Heliagras, Inosix, LG5665M, Melody, Pegasol, Vellox) dans deux plateformes expérimentales du CETIOM situées à Montesquieu-Lauragais (Haute-Garonne) et Chambon (Charente-Maritime).

À Montesquieu-Lauragais (site M), le sol est un terrefort de vallée, profond, de texture argilocalcaire (30 à 51 % d'argile selon la profondeur ; 14 % CaCO₃). Le reliquat d'azote minéral au semis était de 174 kg N/ha sur 0-120 cm. La réserve utile estimée est de 220 mm ne justifiant pas d'irrigation de complément.

À Chambon (site C), le sol est de type groie superficielle (30 cm), argilocalcaire (26 % d'argile, 33 % de CaCO₃). Le reliquat d'azote était de 60 kg N/ha sur 0-30 cm. Le sous-sol composé de roches calcaires fissurées permet une colonisation racinaire plus profonde. La réserve utile estimée est de 80 mm. De ce fait, deux irrigations de 35 mm ont été réalisées entre les stades F1 et F4.

Tableau 1. Paramètres variétaux du modèle SUNFLO et méthodes de caractérisation.

Processus	Signification	Nom	Unités	Mesure champ (peuplement dense)	Mesure serre (pots)	Calcul	Base de données VAT
Phénologie	Durée « levée-stade E1 »	TT_E1	°C.Jours	Possible	Non	Oui	Non
	Durée « levée-stade F1 »	TT_F1	°C.Jours	Oui	Non	Non	Oui
	Durée « levée-stade M0 »	TT_M0	°C.Jours	Difficile	Non	Oui	Non
	Durée « levée-stade M3 »	TT_M3	°C.Jours	Oui	Non	Non	Non
Architecture	Nombre de feuilles (total)	NFT	s.u	Oui	Possible	Non	Non
	Rang de la plus grande feuille	n_SFimax	s.u	Oui	Possible	Non	Non
	Surface de la plus grande feuille	SFimax	cm ²	Oui	Possible	Non	Non
	Coefficient d'extinction du rayonnement	k	s.u	Difficile	Non	Oui	Non
Réponse à la contrainte hydrique	Seuil de réduction de l'expansion foliaire	a_LE	s.u	Non	Oui	Non	Non
	Seuil de réduction de la transpiration	a_TR	s.u	Non	Oui	Non	Non
Allocation	Indice de récolte potentiel	IRpot	s.u	Oui	Non	Non	Non
	Teneur en huile potentielle	THpot	%	Oui	Non	Non	Oui

A2 : stade levée ; E1 : stade bouton étoilé ; F1 : stade début floraison ; M0 : stade début remplissage ; M3 : stade maturité physiologique ; s.u. : sans unité ; VAT : valeur agronomique et technologique.

Le site M a pour objectif de maximiser la surface foliaire à la floraison par un peuplement dense et une bonne alimentation hydrique et azotée ; le site C, plus rationné avant floraison, est propice à maximiser l'IR et la TH par des irrigations encadrant la floraison.

Les essais au champ sont du type blocs complets de Fisher à trois (C) et quatre (M) répétitions. La taille des parcelles élémentaires est de 30 m² (M) et 39 m² (C), correspondant à six rangs de tournesol. Le semis a été réalisé à forte densité le 8 avril 2008 à Montesquieu-Lauragais et le 24 avril 2008 à Chambon, puis les essais ont été démarrés. Le peuplement moyen est de 6,3 plantes/m² à Montesquieu mais seulement de 4,4 plantes/m² à Chambon, en raison de dégâts d'oiseaux. L'apport d'azote est de 53 kg N/ha à Montesquieu et de 60 kg N/ha à Chambon. Les essais sont protégés chimiquement pour éviter la concurrence des adventices, les attaques de limaces et de phomopsis.

Les stades phénologiques sont régulièrement notés (en particulier A2, F1 et M3). À la floraison, les variables suivantes sont mesurées pour cinq plantes par bloc (soit 15 plantes par variété) : nombre total de feuilles (NF), surface (longueur × largeur × 0,7, SF_{imax}) et rang (n_SF_{imax}) de la plus grande feuille depuis la base, et hauteur des plantes (pour l'estimation de k).

Au stade M3, 2 × 5 plantes sont prélevées pour la mesure de l'IR qui est le rapport du poids sec d'akènes sur la matière sèche totale aérienne. Le rendement (grain propre et sec) est déterminé à partir de la récolte au stade M4 des quatre rangs centraux et la TH est déterminée par RMN au laboratoire du CETIOM à Ardon.

Phénotypage en serre de la réponse à la contrainte hydrique

Le protocole proposé par Casadebaig *et al.*, (2008) a été mis en œuvre en 2008 à Auzeville. Chacune des 18 variétés est cultivée en pots de 15 L remplis d'un mélange 50 % terre argilolimonieuse/40 % terreau/10 % sable. Une série de cinq pots par variété est soumise à un dessèchement progressif du sol à partir du stade huit feuilles, pendant que les cinq autres pots sont maintenus à l'humidité, à la capacité au champ. L'objectif du suivi est de déterminer les valeurs de déficit hydrique du sol pour lesquelles l'expansion foliaire et la transpiration sont inférieures à 95 % de la valeur du témoin bien irrigué.

En 2008, la faible demande évaporative en serre a permis d'étendre la durée d'expérimentation sur trois semaines. La température de la serre était de 22 ± 2 °C et l'humidité relative de 39 ± 9 %.

Les longueurs (L) et largeurs (l) des feuilles impaires de chaque plante sont mesurées un jour sur deux permettant de calculer la surface (S_i) des feuilles et d'estimer la surface foliaire totale de chaque plante (SFT_j) à partir de l'équation : $SFT_j = 1,91 \times \sum_i S_i + 14,17$.

L'expansion foliaire du jour correspond à l'accroissement de surface par rapport au jour précédent. L'expansion foliaire normalisée (NLE) correspond au rapport entre l'expansion foliaire de la plante stressée et la moyenne des expansions foliaires des témoins bien alimentés.

Les pots sont pesés tous les jours à heure fixe. À partir de ces mesures, la perte de poids journalière est calculée pour chaque individu. Puis, la valeur de transpiration de chaque plante est déterminée par le rapport entre cette variation de poids et la surface foliaire de l'individu mesurée la veille. La transpiration normalisée (NTR) correspond au rapport entre la transpiration de la plante en stress et la moyenne de transpiration des cinq plantes témoins.

L'intensité du stress hydrique subi par la plante dépend de la quantité d'eau disponible dans le sol. Cette contrainte est évaluée par la fraction d'eau transpirable du sol (dite FTSW, *fraction of transpirable soil water*). Cette valeur est indépendante du sol, mais dépend de la transpiration de la plante (Sinclair, 2005). Elle correspond au rapport entre la quantité d'eau accessible à la plante à la date de mesure et la quantité maximale d'eau accessible à la plante. Cette dernière est calculée par la différence entre le poids du pot à saturation et le poids du pot lorsque la transpiration de la plante stressée est égale à 10 % de la moyenne des plantes irriguées.

Les courbes de réponse des génotypes à la contrainte hydrique sont tracées à l'aide d'un modèle non linéaire d'équation :

$$y = \frac{2}{1 + e^{ax}} - 1$$

avec $y = \text{NTR}$ ou NLE ; $x = \text{FTSW}$

Le paramètre d'ajustement « a » est le paramètre génotypique de réponse à la contrainte hydrique à intégrer dans le modèle SUNFLO (a_LE pour l'expansion foliaire ; a_TR pour la transpiration).

Évaluation du modèle

Le réseau national « variétés oléiques » et « variétés classiques » (postinscription) conduit par le CETIOM en 2008 a été choisi pour évaluer la capacité du modèle à classer les variétés et les environnements.

Quarante-deux sites correspondant à 79 essais répartis sur la zone de production du tournesol (11 régions) ont été renseignés. Les régions Centre et Poitou-Charentes (huit sites chacune)

sont les mieux représentées. Chaque situation est décrite par la profondeur du sol accessible aux racines. On dispose d'informations précises sur la conduite de culture. Le reliquat azoté n'est pas connu précisément dans toutes les situations ; une valeur par défaut est alors fixée (60 kg/ha). Le poste météorologique le plus proche est retenu pour renseigner le climat journalier : selon les cas, cela se traduit par une distance essai-poste météo de 0 à 45 km.

Les valeurs simulées pour les 18 variétés ont été confrontées aux valeurs observées pour trois variables du protocole VAT : la date de floraison, le rendement et la TH. Dans cet article, seules les évaluations portant sur le rendement seront présentées. On désignera par le terme « erreur absolue » la racine du carré moyen des écarts entre valeurs simulées et valeurs observées du rendement ; l'« erreur relative » (%) correspond au rapport de l'erreur absolue au rendement moyen observé (*encadré 1*).

Résultats

Variabilité des paramètres phénotypiques au champ

En 2008, les conditions climatiques peu contraignantes, notamment sur le plan hydrique, ont permis d'obtenir des peuplements exubérants, en particulier à Montesquieu-Lauragais.

Le *tableau 2* présente les valeurs de phénotypage obtenues pour les 18 variétés. Le site de Montesquieu-Lauragais (M) a été privilégié pour le phénotypage de l'architecture foliaire. En effet, à Chambon, le faible peuplement et la faible profondeur de sol ont limité fortement la croissance des variétés d'où une hauteur de plantes plus faible et une surface foliaire réduite à la floraison (2,9 *versus* 4,4). Le rang de la plus grande feuille en moyenne plus faible à Chambon (11 à C *versus* 18 à M) traduit bien la survenue de stress plus précoces avant floraison. En revanche, on présente dans ce *tableau* les valeurs comparées d'IR et de TH qui attestent d'un meilleur fonctionnement en postfloraison sur le site de Chambon qui a été irrigué.

Sur le site de Montesquieu, les variétés diffèrent par la date de floraison (11 jours d'écart entre la plus précoce et la plus tardive), par le nombre de feuilles (23-29), par la position de la plus grande feuille (14 à 20) et par l'indice foliaire à F1 (3,3 à 5,7) mettant en évidence des différences phénotypiques peu évaluées.

On distingue ainsi plusieurs types de variétés : – selon la précocité : les variétés précoces à la floraison sont en général plus courtes, à plus

Encadré 1 Phénotypage au champ et paramétrage du modèle

Le modèle SUNFLO s'appuie sur le phénotypage des variétés au champ, en peuplement dense. Pour cet objectif, on recherche des sites et des conduites qui permettent d'obtenir des conditions potentielles, c'est-à-dire sans l'intervention de facteurs limitants majeurs (autres que le rayonnement et la température). On fait l'hypothèse qu'un nombre réduit de sites expérimentaux, bien contrôlés, semés à date conventionnelle, peut suffire au paramétrage initial du modèle.

Ainsi, le site M, en sol profond, a pour objectif de maximiser la surface foliaire à la floraison par un peuplement dense et une bonne alimentation hydrique et azotée ; le site C, plus rationné avant floraison (sol superficiel, peuplement moins dense), est propice à maximiser l'indice de récolte et la teneur en huile par des irrigations encadrant la floraison. Le site M permet de paramétrer le fonctionnement préfloraison des variétés (surface foliaire) et le site C de paramétrer leur fonctionnement en post-floraison (remplissage des achènes).

Le modèle SUNFLO a besoin de ces paramètres de croissance potentielle pour décrire la réponse d'une variété en l'absence de contraintes. Appliqué aux parcelles du réseau, le modèle affectera la croissance potentielle en fonction des stress hydriques et azotés repérés dans les différents sites. On rappelle ici que les contraintes parasitaires ne sont pas prises en compte par le modèle.

Néanmoins, les valeurs potentielles obtenues en 2008 dans les sites M et C mériteront d'être confirmées à partir d'une année supplémentaire afin d'évaluer la stabilité interannuelle du paramétrage pour des conditions différentes de rayonnement et de température.

Tableau 2. Variables mesurées sur les plateformes CETIOM en 2008 pour 18 variétés commerciales.

	Date F1 (floraison)	Date M3 (maturité)	Hauteur (cm)	NFT	Rang plus grande feuille	Surface plus grande feuille (cm ²)	Indice foliaire	IR	Teneur en huile (%) aux normes
	M	M	M	M	M	M	M	M-C	M-C
Atomic RMO	11-juil	30-août	177	25,2	16,3	513	4,7	0,34-0,39	44,0-45,0
Aurasol	08-juil	27-août	167	26,4	17	418	4,1	0,38-0,42	45,4-47,0
ES Biba	07-juil	25-août	158	24,2	16,4	434	3,9	0,38-0,45	46,4-47,4
ES Ethic	10-juil	26-août	179	27,5	15,9	387	4,1	0,38-0,44	47,4-47,9
ES Magnific	07-juil	27-août	165	23	16,6	415	3,4	0,41-0,40	45,2-45,6
Extrasol	10-juil	27-août	169	27,8	19,8	475	4,6	0,40-0,41	45,9-47,1
Heliagras	11-juil	28-août	180	28,3	18,1	471	4,6	0,40-0,39	49,5-50,7
Inosix	10-juil	28-août	173	28,1	17,8	421	4,3	0,40-0,38	45,8-49,1
LG 5450 HO	04-juil	26-août	151	22,5	14,7	405	3,5	0,41-0,44	45,4-47,8
LG 5665 M	11-juil	29-août	175	27,6	18,3	521	5,3	0,36-0,42	44,7-45,9
Melody	11-juil	29-août	176	28,7	17,4	537	5,5	0,38-0,42	44,6-44,8
NK Countri	11-juil	01-sept	176	28	18,8	563	5,4	0,33-0,36	43,8-43,5
NK Ferti	15-juil	29-août	157	28,5	18,4	453	4,5	0,37-0,43	45,1-47,7
NK Sinfoni	10-juil	28-août	166	28,1	17	428	4,3	0,40-0,43	46,7-47,7
Pacific	10-juil	30-août	158	23,5	17,5	420	3,6	0,35-0,39	44,5-45,6
Pegasol	08-juil	26-août	165	25,3	17,4	412	4	0,41-0,44	44,9-47,2
Ultrasol	15-juil	28-août	167	29,2	20,6	564	5,4	0,33-0,32	44,4-45,5
Vellox	11-juil	26-août	177	29,3	19,2	476	4,7	0,40-0,44	48,6-51,6
Moyenne site M	10-juil	27-août	169	26,7	17,6	462	4,4	0,38	45,7
Moyenne site C	09-juil	> 4/09	147	28	10,8	381	2,9	0,41	47,1

M : Montesquieu-Lauragais ; C : Chambon ; NFT : nombre de feuilles (total) ; IR : indice de récolte.

faible nombre de feuilles et à plus faible surface foliaire ; leur plus faible biomasse aérienne permet d'atteindre une valeur d'IR supérieure ;

– selon l'architecture foliaire : certaines variétés mettent en place plus rapidement leur surface foliaire comme ES Ethic pour laquelle la plus

grande feuille est atteinte pour 58 % du NF ; à l'inverse, la variété Pegasol met en place sa surface foliaire plus tardivement (69 %).

Variabilité de la réponse à la contrainte hydrique

L'expérimentation en serre a permis de tracer, pour chaque variété, l'évolution de NLE et NTR en fonction de FTSW. À partir de ces courbes, les deux paramètres de réponse à la contrainte hydrique (a_{LE} et a_{TR}) ont été calculés par ajustement non linéaire. Les valeurs de ces paramètres sont consignées au *tableau 3*. Concernant la réponse de l'expansion foliaire, les ajustements ont pu être réalisés pour l'ensemble des géotypes avec une bonne précision ($r^2 = 0,936 \pm 0,030$). Ainsi, les deux variétés NK Countri et ES Ethic auraient tendance à limiter leur expansion foliaire pour des contraintes hydriques plus faibles que Ultrasol. Cependant, les tendances génotypiques pressenties ne sont pas significativement différentes dans cette expérimentation. Ainsi, les variétés commerciales récentes seraient très proches les unes des autres en ce qui concerne la réponse de l'expansion foliaire à la contrainte hydrique. Une variabilité plus marquée avait été observée

Tableau 3. Valeurs des paramètres de réponse à la contrainte hydrique pour les 18 variétés.

	a_NLE	a_NTR
Atomic RMO	-3,72	-9,82
Aurasol	-3,44	-8,53
ES Biba	-3,52	-8,73
ES Ethic	-2,96	-11,52
ES Magnific	-3,67	-9,37
Extrasol	-3,11	-9,39
Heliagras	-3,42	-8,66
Inosix	-3,3	-10,28
LG 5450 HO	-3,33	-10,44
LG 5665 M	-3,29	-9,03
Melody	-3,87	-10,7
NK Countri	-2,84	-9,61
NK Ferti	-3,02	-8,93
NK Sinfoni	-3,02	-10,7
Pacific	-3,29	-10,12
Pegasol	-3,65	-10
Ultrasol	-4,12	-10,88
Vellox	-3,44	-9,15

a_{NLE} : paramètre de réponse de l'expansion foliaire ;
 a_{NTR} : paramètre de réponse de la transpiration (plante).

par Casadebaig *et al.*, (2008) pour des variétés de générations de sélection différentes exprimant le progrès génétique.

Les paramètres de transpiration s'échelonnent entre -8,5 pour la variété Aurasol et -11,5 pour ES Ethic. La valeur de FTSW pour laquelle les plantes stressées transpirent 95 % de la moyenne des témoins peut être calculée à partir de ce paramètre. Ainsi, la variété Aurasol commence à diminuer sa transpiration à partir d'une fraction d'eau transpirable du sol égale à 43 %, tandis qu'ES Ethic ne commence qu'à partir de 31 %. En période de déficit hydrique du sol, cela pourrait signifier qu'Aurasol manifeste une fermeture stomatique plus précoce que ES Ethic. Cependant, comme pour NLE, aucune différence génotypique significative n'a pu être mise en évidence, et la distinction de plusieurs groupes de variétés à comportement identique n'est pas concluante.

En présence d'un déficit hydrique du sol, on confirme, cependant, que l'expansion foliaire est affectée avant la régulation stomatique qui conduit à une chute de la transpiration et de la photosynthèse (Casadebaig *et al.*, 2008). Par ailleurs, les valeurs de a_{NLE} et de a_{NTR} ne sont pas corrélées : réduction de l'expansion foliaire et fermeture stomatique sont deux processus adaptatifs indépendants.

Paramétrage du modèle

Les quatre paramètres de phénologie proviennent des notations effectuées sur l'essai M en 2008 : mesure directe des stades F1 et M3 et calcul de la somme de températures efficaces (base 4,8 °C) pour les phases levée-F1 et levée-M3. À partir de références antérieures, on estime que la durée levée-E1 représente 58 % de la durée levée-F1 et que le stade M0 est atteint 250 degrés-jour après F1.

Les paramètres d'architecture NFT, n_{SFimax} et $SFimax$ sont dérivés directement de l'observation réalisée sur le site M. Le coefficient k est calculé selon le modèle statistique proposé par Casadebaig (2008) en fonction des paramètres foliaires et de la hauteur des plantes. Ainsi, k varie de 0,81 (NK Countri) à 0,89 (LG 5450 HO), ce qui signifie que la capacité d'interception du rayonnement pour une unité de surface foliaire est supérieure pour cette dernière variété.

Les paramètres a_{LE} et a_{TR} calculés à partir de la mesure en serre de la réponse des variétés de tournesol au dessèchement progressif du sol sont utilisés en l'état (*tableau 3*).

Le paramètre $IRpot$ est principalement estimé sur l'essai de Chambon, mais dans certains cas la valeur un peu supérieure observée à Montesquieu a été retenue. La valeur de $IRpot$ est particulièrement faible pour Ultrasol (0,33),

sur les deux sites, les autres valeurs s'échelonnant de 0,36 à 0,44.

Le paramètre $THpot$ est en général supérieur à Chambon, car les conditions de remplissage ont été plus favorables et l'alimentation azotée y est moins pléthorique. On vérifie cependant sur les essais d'inscription coordonnés par le GEVES qu'on n'obtient pas de valeurs supérieures. Si c'est le cas, on choisit la valeur maximum observée : cela se traduit par des valeurs de TH aux normes entre 45 et 52 % selon les variétés. Pour tester la capacité du paramétrage précédent à représenter le classement variétal (pour le rendement), les simulations ont été confrontées aux observations réalisées sur les deux plateformes précédentes qui ont servi partiellement à ce paramétrage.

Ainsi, sur le site de Montesquieu, pour 13 variétés sur 18, le rendement simulé est compris dans l'intervalle entre les rendements observés, maximum et minimum, sur les quatre blocs ; dans les autres cas, le rendement simulé est supérieur au rendement observé maximum sauf pour Ultrasol dont la valeur de rendement est sous-estimée par le modèle.

Sur le site de Chambon, la performance est moins bonne puisque le rendement est compris entre les valeurs minimum et maximum des trois blocs pour sept variétés uniquement. De manière générale, le rendement prédit par SUNFLO est sous-estimé à Chambon.

La valeur de l'erreur absolue est de 3,2 q/ha (soit une erreur relative de 8,2 %) à Montesquieu et de 5 q/ha (soit 12,5 %) à Chambon. La corrélation entre rendements simulés et observés est de 0,57 à Chambon et de 0,37 à Montesquieu pour des niveaux de rendement qui sont proches. Le paramétrage variétal permet cependant de classer les variétés dans les deux sites.

Performances du modèle

La capacité du modèle à représenter les conditions environnementales des sites d'essai a été évaluée sur les 42 sites en comparant les moyennes variétales observées et simulées pour le rendement (*figure 1*). La valeur de l'erreur est de 5,7 q/ha (18,3 %). Dans neuf cas, l'écart absolu entre simulation et observation excède 8 q/ha. Dans quatre situations, le rendement est surestimé avec SUNFLO : dans ce cas, le rendement observé est plutôt faible (< 30 q/ha). Dans cinq situations, le modèle sous-estime le rendement des essais : il s'agit de cas où les rendements observés sont plutôt élevés (> 35 q/ha). Dans le premier cas de figure, il peut s'agir de facteurs limitants non pris en compte par le modèle. Dans les deux cas, on peut invoquer une estimation erronée de la réserve utile du sol, de la disponibilité en azote du sol ou une représentation incorrecte

du climat de l'essai par le poste météo choisi. Si l'on fait l'hypothèse que de tels écarts sans biais ne peuvent s'expliquer que par une mauvaise représentation des variables d'entrée environnementales et non du modèle lui-même, on peut écarter ces points et n'évaluer les performances du modèle en matière de classement variétal que sur les sites où l'environnement est bien simulé. Pour les 33 sites retenus, la valeur de l'erreur est alors de 3,5 q/ha (11,4 %). La capacité du modèle à représenter la réponse variétale a été évaluée sur la valeur moyenne (tous sites confondus) (figure 2). La valeur de l'erreur est de 3,4 q/ha (10,4 %). Dans la plupart des cas (11/18), le rendement de la variété est simulé avec une erreur inférieure à 2,5 q/ha. Les erreurs les plus conséquentes sont commises sur Ultramol ($R_{sim}-R_{obs} = -7,3$ q/ha), Helia-gras (- 5,2 q/ha), LG 5665 M (+ 4,9 q/ha) et LG 5450 HO (+ 4,8 q/ha). De faibles valeurs d'IR avaient été déterminées pour Ultramol (tableau 2), variété tardive à gros développement foliaire, par rapport aux autres variétés de même génération de sélection. Dans la suite des comparaisons, les neuf sites précédents et la variété Ultramol ont été écartés de l'analyse.

La figure 3 présente par variété les confrontations rendement simulé versus observé réalisées sur les 33 sites conservés, sachant que toutes les variétés ne sont pas présentes sur tous les sites. De manière générale, les rendements des différents sites d'étude sont bien classés quelles que soient les variétés considérées. Les coefficients de corrélation (r) entre rendement simulé et observé ont été calculés pour les variétés présentes au minimum sur dix sites : les valeurs de r , comprises entre 0,46 et 0,79, indiquent un bon classement des sites expérimentaux et donc une bonne aptitude de SUNFLO à caractériser les environnements d'essai par la réponse des variétés.

La confrontation des 247 valeurs site-variété (figure 4) montre que le modèle est capable de simuler le rendement d'une variété donnée dans un site donné pour une gamme observée entre 17 et 43 q/ha avec une erreur moyenne de 5 q/ha (15,7 %).

Cependant, la confrontation par site des classements variétaux ne permet de distinguer les variétés par SUNFLO (soit $r > 0,4$) que dans un petit nombre de sites d'évaluation (Estrablin, Fourques, Isle-sur-la-Sorgue) (figure 5). À Chambon et Montesquieu-Lauragais, où le modèle a été paramétré au champ, les valeurs de r sont respectivement de 0,57 et 0,37. Le paramétrage de IRpot dans le premier site a davantage joué sur le résultat final que le paramétrage de l'architecture foliaire dans le second. Nous n'avons retenu ici que les sites où au moins dix variétés paramétrées ont été mises en expérimentation.

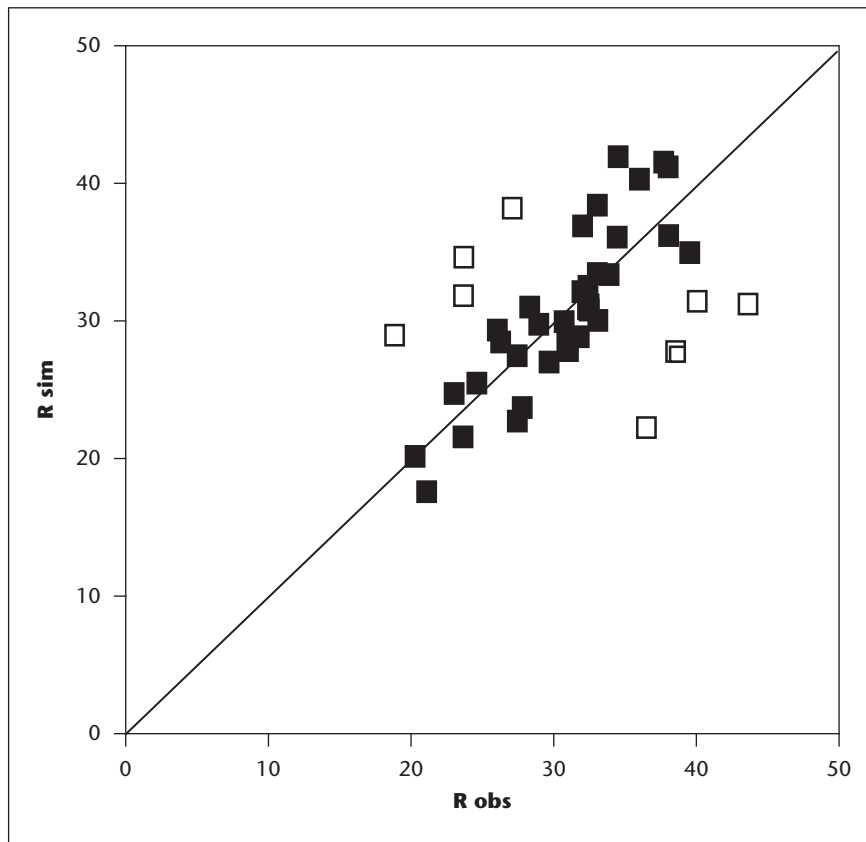


Figure 1. Comparaison des rendements moyens simulés et observés (q/ha ; 0 % humidité) : pour les 42 sites du réseau de postinscription 2008 du CETIOM : toutes variétés confondues.

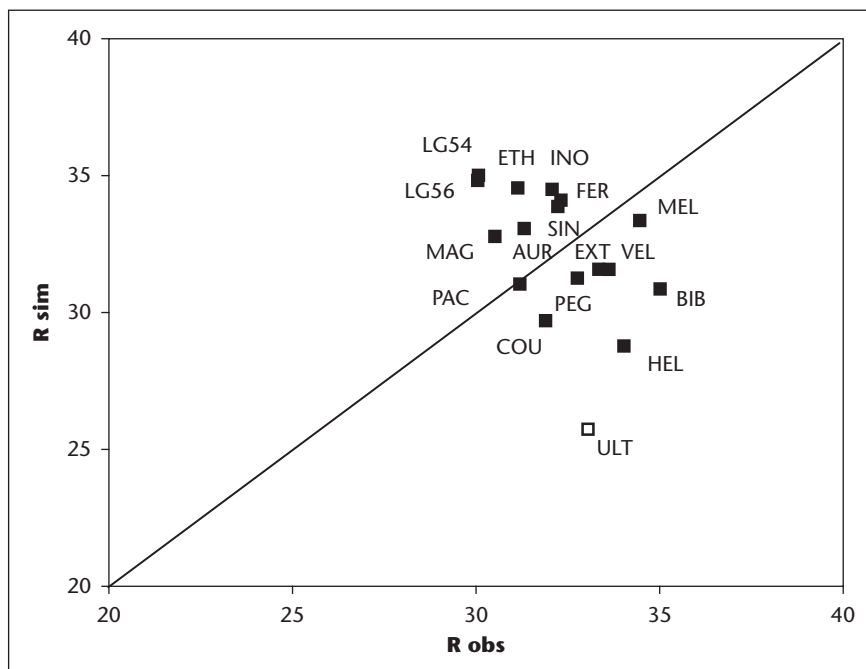


Figure 2. Comparaison des rendements moyens simulés et observés (q/ha ; 0 % humidité) pour 18 variétés testées dans le réseau de postinscription 2008 du CETIOM : tous sites confondus.

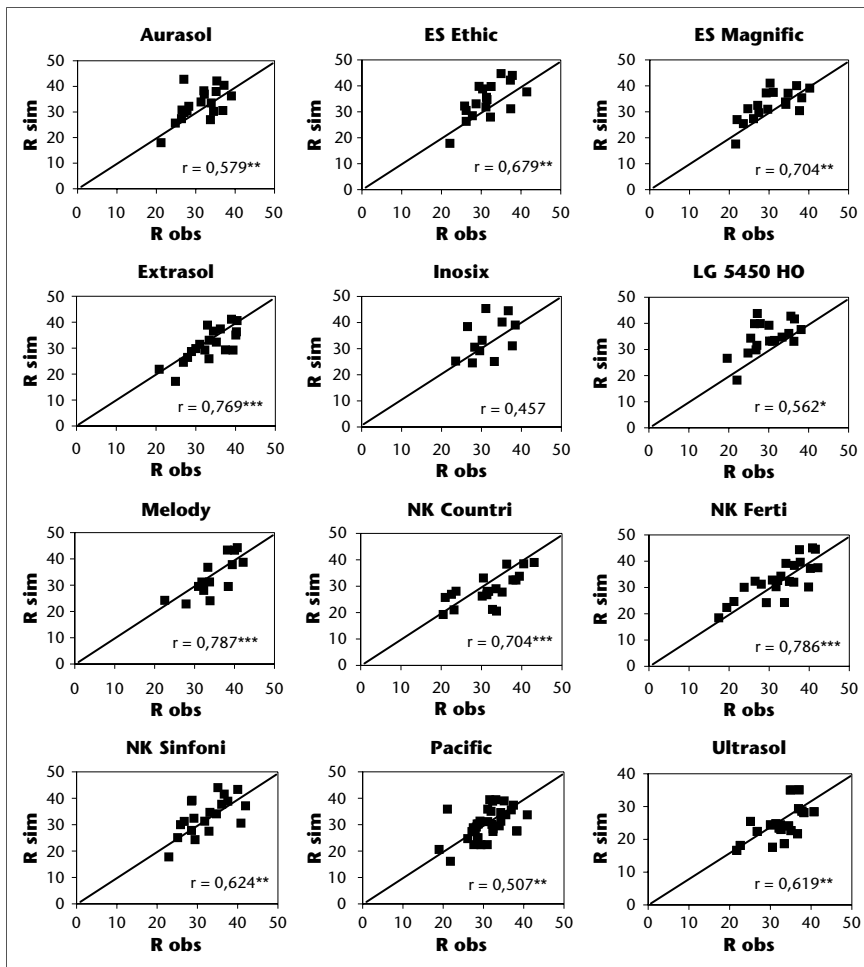


Figure 3. Comparaison pour 12 variétés des rendements simulés et observés (q/ha ; 0 % humidité) sur les sites où les variétés ont été expérimentées. Corrélations significatives à $p < 0,001$ (***) ; $p < 0,01$ (**) ; $p < 0,05$ (*).

Discussion et conclusion

Le modèle SUNFLO permet de simuler avec une bonne précision (11 %) le rendement moyen du tournesol dans un site donné pour un panel de variétés paramétrées. Cette performance est analogue à celle obtenue avec des modèles plus complexes.

Ce résultat suppose cependant de bien décrire la profondeur accessible aux racines et de disposer de données climatiques (en particulier pluviométrie) les plus représentatives du site d'étude. Dans un certain nombre de cas, la surestimation du rendement par SUNFLO suggère l'existence de facteurs limitants non pris en compte par le modèle. En essai, des attaques de maladies (phoma, phomopsis, sclerotinia), des dégâts d'oiseaux (au semis, à la récolte), des défauts de structure du sol ou des carences en bore peuvent se manifester et

pénaliser le rendement. Le modèle SUNFLO ne tient pas compte de ces facteurs limitants supplémentaires ; ceux-ci sont d'ailleurs peu renseignés par les expérimentateurs. Dans d'autres cas, le rendement observé est supérieur à la valeur simulée. Cela peut être dû à une sous-estimation de la réserve utile (notamment en sols superficiels avec sous-sol fissuré) ou de la disponibilité en azote. On peut invoquer aussi les méthodes d'estimation du rendement en petites parcelles qui peuvent rapidement entraîner des surestimations selon la prise en compte ou non des capitules de bordure.

La représentation du comportement variétal moyen sur un réseau d'essais (figure 2) est accessible avec une précision similaire à celle obtenue pour l'effet site (figure 1). Cependant, la description variétale proposée dans SUNFLO ne permet pas de reproduire strictement le classement variétal observé pour des géno-

types de même génération de sélection. Dans les essais bien conduits, les variétés doivent différer d'au moins 2 q/ha pour être classées comme significativement différentes pour le rendement. Ce niveau de précision n'est pas accessible actuellement par SUNFLO. En revanche, la distinction de variétés à comportement extrême paraît possible comme cela a été montré par Casadebaig *et al.* (2010) pour des variétés exprimant 30 années de progrès génétique. Ainsi, des variétés différant fortement par la précocité, l'architecture ou la réponse à l'eau peuvent être distinguées par le modèle et justifier de combinaisons sol-climat-conduite différentes (Casadebaig et Debaeke, 2008).

Le protocole de phénotypage au champ est facilement applicable à quelques essais VAT choisis à la floraison. En revanche, le phénotypage de la réponse à la contrainte hydrique exige une logistique particulière et le protocole est relativement lourd pour une utilisation en routine. Le recours à un banc de *screening* automatisé doit être envisagé à l'avenir, car on ne peut concevoir ce type de caractérisation au champ, en raison du contrôle obligatoire des conditions hydriques du sol par variété.

La variabilité phénotypique observée au sein d'une gamme de variétés récentes a été décrite et mise en évidence, complétant les travaux de Debaeke *et al.*, (2004) menés sur des variétés plus anciennes ; une caractérisation plus fine doit être poursuivie pour mieux distinguer encore le fonctionnement variétal. Les paramètres phénotypiques pourraient également être estimés par une analyse QTL moins dépendante de l'environnement (Bertin *et al.*, 2010). Néanmoins, la proposition d'un banc d'essai au champ combinant deux situations bien caractérisées et faisant varier les conditions de croissance avant et après floraison apparaît nécessaire et suffisante pour déterminer les paramètres de fonctionnement potentiels. Une vérification de la stabilité interannuelle et intersite des paramètres doit être poursuivie, tant au champ qu'en serre, pour tester la robustesse des paramètres variétaux. Une détermination en serre des paramètres phénotypiques sur plantes isolées a été proposée par Lecoq *et al.*, (2010). Bien que la corrélation avec les valeurs du champ soit acceptable, cette méthode en serre est plus délicate à mettre en œuvre pour obtenir des valeurs potentielles compatibles avec le comportement en peuplement dense.

Conclusion

Le modèle SUNFLO pourrait être mobilisé pour assister l'évaluation variétale dans plusieurs directions :

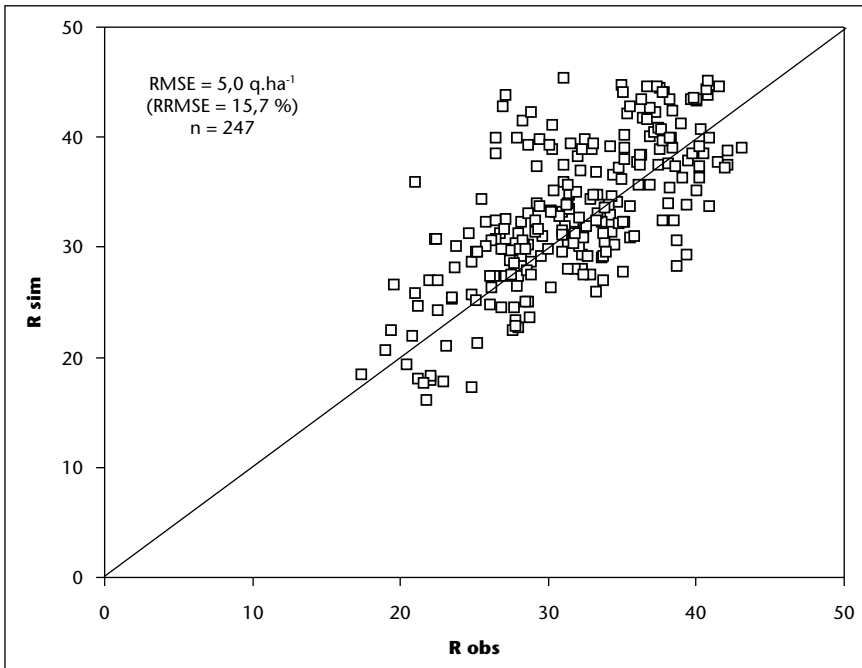


Figure 4. Comparaison des rendements simulés versus observés (q/ha ; 0 % humidité) pour l'ensemble des couples variétés-sites à l'exception de Ultrazol et des neuf sites où le rendement simulé moyen est trop éloigné du rendement observé (> 8 q/ha).

RMSE = erreur absolue ; RRMSE = erreur relative par rapport à la moyenne des observations.

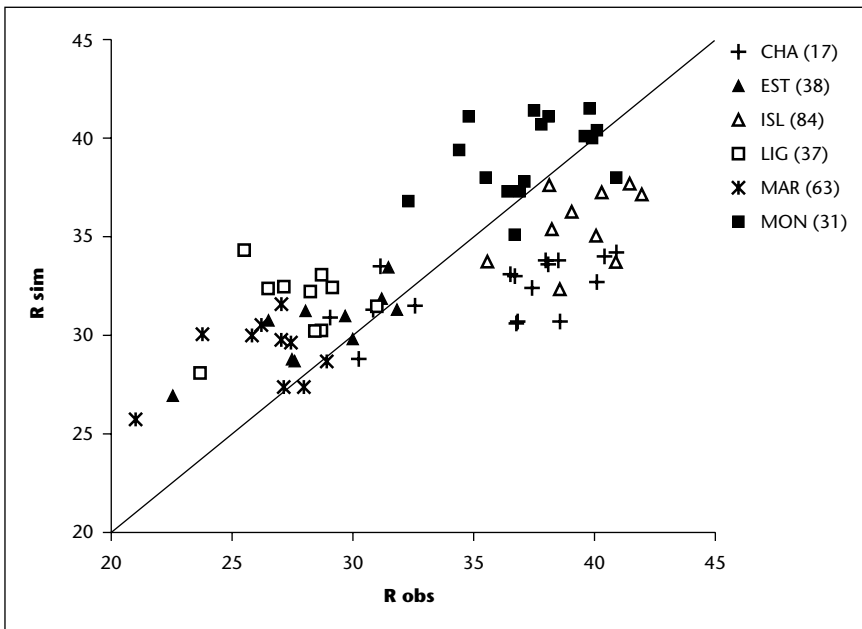


Figure 5. Comparaison des rendements simulés et observés (q/ha ; 0 % humidité) par variété pour quatre essais du réseau 2008 et pour les deux essais de phénotypage (CHA, MON).

– la définition des rendements accessibles par essai et la détermination corrélée des indicateurs de stress (indice foliaire, indice de nutrition azotée, rapport ETR/ETM) permettant de

formuler un diagnostic agronomique par couple variété × environnement ;
– la simulation de situations pédoclimatiques non rencontrées dans le réseau annuel ;

– l'évaluation par milieu de couples variété-conduite pertinents afin de préciser le mode d'emploi des nouvelles variétés ;
– l'évaluation exploratoire de caractères variétaux d'intérêt (Casadebaig et Debaeke, 2008).
L'expérimentation variétale en réseau pourrait ainsi être conçue pour mettre à l'épreuve le modèle et profiter des capacités diagnostiques et exploratoires de l'outil de simulation.

Remerciements. Nous remercions les équipes expérimentales du CETIOM (en particulier A. Bertin, P. Cristante et P. Fauvin) et de l'UMR AGIR (M. Labarrère). Ce projet a été conduit dans le cadre de l'unité mixte technologique « Tournesol » avec l'appui financier du CTPS (AAP 2007).

RÉFÉRENCES

Agüera F, Villalobos FJ, Orgaz F. Evaluation of sunflower (*Helianthus annuus* L.) genotypes differing in early vigour using a simulation model. *Eur J Agron* 1997 ; 7 : 109-18.

Bertin N, Martre P, Genard M, Quilot B, Salon C. Under what circumstances can process-based simulation models link genotype to phenotype for complex traits? Case-study of fruit and grain quality traits. *J Exp Bot* 2010 ; 61 : 955-67.

Boote KJ, Kropff MJ, Bindraban PS. Physiology and modelling of traits in crop plants: implications for genetic improvement. *Agric Syst* 2001 ; 70 : 395-420.

Cabelguenne M, Debaeke P, Bouniols A. EPICphase, a version of the EPIC model simulating the effects of water and nitrogen stress on biomass and yield, taking account of developmental stages: validation on maize, sunflower, sorghum, soya and winter wheat. *Agric Syst* 1999 ; 60 : 175-96.

Casadebaig P. Analyse et modélisation dynamique des interactions génotype-environnement-conduite de culture : application au tournesol (*Helianthus annuus* L.). Thèse, INP Toulouse, 2008.

Casadebaig P, Debaeke P. Exploring genotypic strategies for sunflower drought resistance by the means of a dynamic crop simulation model. Proc. 17th Int. Sunflower Conf., Cordoba (Spain), 2008.

Casadebaig P, Debaeke P, Lecoeur J. Thresholds for leaf expansion and transpiration response to soil water deficit in a range of sunflower genotypes. *Eur J Agron* 2008 ; 28 : 646-54.

Casadebaig P, Guillioni L, Lecoeur J, Christophe A, Champolivier L, Debaeke P. SUNFLO, a model to simulate genotype-specific performance of sunflower crop in contrasting environments. *Agric For Meteorol* 2010 (en révision).

Cetiom. Évaluation variétale : les nouvelles orientations. *Oléoscope* 2000 ; 55 : 9-25.

- Chapman S, Hammer G, Meinke H. A sunflower simulation model: I. model development. *Agron J* 1993 ; 85 : 725-35.
- Debaeke P, Lecoeur J, Triboui-Blondel AM, Vear F. Crop physiological determinants of yield in old and modern sunflower hybrids. Proc. 16th Int. Sunflower Conf., Fargo (USA), 2004 ; 267-73.
- Foucteau V, El Daouk M, Baril C. Interpretation of genotype by environment interaction in two sunflower networks. *Theor Appl Genet* 2001 ; 102 : 327-34.
- Geves. Règlement technique d'examen des variétés de tournesol en vue de leur inscription au Catalogue officiel français, 2007. geves.zarcrom.fr.
- Hammer GL, Kropff MJ, Sinclair TR, Porter JR. Future contributions of crop modelling-from heuristics and supporting decision making to understanding genetic regulation and aiding crop improvement. *Eur J Agron* 2002 ; 18 : 15-31.
- Jeuffroy MH, Barbottin A, Jones JW, Lecoeur J. Crop models with genotype parameters. In : Wallach D, Makowski D, Jones JW, eds. *Working with dynamic crop models-evaluation, analysis, parameterization and applications*. Amsterdam : Elsevier, 2006.
- Lecoeur J, Poiré-Lassus R, Christophe A, et al. SUN-FLO: A joint phenotyping and modelling approach to analyse and predict differences in yield potential of sunflower genotypes. *Funct Plant Biol* 2010 (en révision)
- Lecomte C. L'évaluation expérimentale des innovations variétales : proposition d'outils d'analyse de l'interaction génotype-milieu adaptés à la diversité des besoins et des contraintes des acteurs de la filière semences. Thèse INA-PCG, 2005.
- Monteith JL. Climate and the efficiency of crop production in Britain. *Phil Trans Royal Soc Lond B Biol Sci* 1977 ; 281 : 277-94.
- Pereyra-Irujo GA, Aguirrezabal LA. Sunflower yield and oil quality interactions and variability: Analysis through a simple simulation model. *Agric For Met* 2007 ; 143 : 252-65.
- Sinclair TR. Theoretical analysis of soil and plant traits influencing daily plant water flux on drying soils. *Agron J* 2005 ; 97 : 1148-52.
- Todorovic M, Albrizio R, Zivotic L, Abi Saab MT, Stöckle C, Steduto P. Assessment of AquaCrop, CropSyst, and WOFOST models in the simulation of sunflower growth under different water regimes. *Agron J* 2009 ; 101 : 509-21.
- Uyttewaal V. Protocole d'expérimentation : tournesol. Essais de valeur agronomique et technologique. Campagne 2010, geves.zarcrom.fr.
- Villalobos F, Hall A, Ritchie J, Orgaz F. OILCROP-SUN: a development, growth and yield model of the sunflower crop. *Agron J* 1996 ; 88 : 403-15.