



HAL
open science

Evaluer et valoriser les interactions variété-milieu-conduite en tournesol

Philippe P. Debaeke, Pierre Casadebaig, Emmanuelle Mestries, Jean-Pierre
Palleau, Frédéric Salvi, Virginie Bertoux, Valérie Uyttewaal

► **To cite this version:**

Philippe P. Debaeke, Pierre Casadebaig, Emmanuelle Mestries, Jean-Pierre Palleau, Frédéric Salvi, et al.. Evaluer et valoriser les interactions variété-milieu-conduite en tournesol. CIAG Tournesol et agriculture Durable, Jun 2011, Toulouse, France. hal-02807121

HAL Id: hal-02807121

<https://hal.inrae.fr/hal-02807121>

Submitted on 6 Jun 2020

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

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

Evaluer et valoriser les interactions variété-milieu-conduite en tournesol

Debaeke P.¹, Casadebaig P.¹, Mestries E.², Palleau J.P.², Salvi F.², Bertoux V.³, Uyttewaal V.³

(1) INRA, UMR AGIR, BP 52627, 31326 Castanet-Tolosan cedex

(2) CETIOM, Centre de Grignon, Avenue Lucien Brétignières, 78850 Thiverval-Grignon

(3) GEVES, Rue Georges Morel, BP 90024, 49 071 Beaucozé cedex

Correspondance : debaeke@toulouse.inra.fr

Résumé

L'évaluation variétale, basée sur l'expérimentation multilocal et pluri-annuelle, pourrait être assistée par la modélisation dynamique. En tournesol, le modèle SUNFLO simule l'élaboration du rendement et de la teneur en huile des variétés de tournesol. Une variété y est décrite par 12 paramètres couvrant la phénologie, la mise en place de la surface foliaire, l'allocation de la biomasse, la lipidogenèse et la réponse au stress hydrique. Les paramètres du modèle sont mesurés au champ, en peuplement non limitant pour le rendement, ou en serre (expérimentation en pots). Le modèle a été évalué sur le réseau de post-inscription du CETIOM : ainsi, en 2008, sur 33 situations où le milieu est bien décrit et pour 18 variétés récentes, l'écart moyen entre valeurs de rendement observées et simulées est de 3.5 q/ha (soit 11 % de la valeur observée). Le modèle pourrait être utilisé pour classer des milieux selon l'intensité de la contrainte hydrique et évaluer des variétés différant suffisamment par le phénotype. De même, le mode d'emploi des variétés pourrait être précisé à l'aide d'expérimentations virtuelles avec SUNFLO.

Mots-clés : tournesol, interaction génotype – milieu, conduite de culture, modèle de culture, évaluation variétale, réseau multi local

Abstract: Evaluating and exploiting the cultivar – environment – management interactions in sunflower

Variety assessment could be supported by the use of dynamic crop modelling. The SUNFLO model was developed to simulate the grain yield and oil concentration of sunflower crop with a special attention paid to the description of cultivar diversity. For that purpose, a cultivar was characterized in the model by 12 parameters of phenology, leaf area development, allocation, oil production and response to water stress. These parameters were measured either in field conditions (dense stands) or in greenhouse pot experiments. The model was parameterized on 18 cultivars and evaluated for yield in 33 situations of the post-registration network conducted by CETIOM in France in 2008. The average gap between observed and simulated grain yield was 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.

Keywords: sunflower, genotype by environment interaction, crop management, crop model, cultivar assessment, multi-environment trials

1. L'évaluation variétale en tournesol

Evaluer une variété, c'est situer ses performances agronomiques (par exemple, le rendement ou la teneur en huile) par rapport à une ou plusieurs variétés de référence, leaders sur le marché ou révélatrices d'un fonctionnement donné (productivité, qualité, tolérance à un stress).

L'évaluation se pratique pendant la sélection, lors des épreuves d'inscription au catalogue officiel du CTPS (Comité Technique Permanent de la Sélection des Plantes Cultivées) et/ou en post-inscription (recherche d'un mode d'emploi, adaptation régionale). Différents acteurs sont impliqués dans ces phases d'évaluation : sélectionneurs privés, GEVES, instituts techniques, organismes prescripteurs (coopératives, chambres d'agriculture, ...). Les références variétales qu'ils produisent et utilisent proviennent de réseaux expérimentaux multi-locaux et pluriannuels où sont comparées, pour un petit nombre de critères, des listes de matériels de moins en moins importantes au fur et à mesure de l'avancement dans le processus de sélection et de qualification des variétés. Les variétés sont cultivées en micro-parcelles (< 50m²), avec des conduites et des plans d'expérience variés. Une valeur agronomique et technologique (VAT) est conférée à chaque matériel, incluant le degré de résistance des variétés à différents pathogènes. Pour le tournesol, les principaux critères qui permettent de comparer les variétés sont le rendement, la teneur en huile, la précocité et la tolérance aux principales maladies (sclerotinia du collet, sclerotinia du capitule, phomopsis). D'autres critères comme la hauteur de tige ou le poids de 1000 graines sont également accessibles. Ces informations sont consultables sur les sites du GEVES (www.geves.fr) et du CETIOM (www.cetiom.fr). Un utilitaire d'aide au choix variétal (Oléov@r) a été développé par le CETIOM, incluant l'édition de fiches d'identité pour les variétés évaluées en post-inscription. On peut considérer qu'environ 150 variétés figurent au catalogue, et qu'une vingtaine de variétés passent avec succès les épreuves au CTPS chaque année. La durée de vie moyenne d'une variété de tournesol est de 3 à 5 ans. Dans les faits, le paysage variétal est plus limité : en 2006, 7 variétés occupaient 50 % de la sole ; en 2009, 10 variétés occupaient 40 % des surfaces semées en tournesol (Wagner et Lieven, 2010). Des méthodes d'analyse de variance sont utilisées pour comparer les variétés et mettre en évidence des interactions variété-site, le site confondant à la fois le sol, le climat et la conduite.

2. Limites de l'évaluation variétale actuelle

Les réseaux nationaux d'évaluation permettent d'éclairer les décisions d'inscription et fournissent les références pour l'aide au choix des variétés semées. Le dispositif paritaire du CTPS qui fédère les acteurs et protège les créateurs et les utilisateurs est à la source du progrès génétique et de l'orientation de la sélection. Les débats menés au sein du CTPS à la suite du Grenelle de l'Environnement, et qui aboutissent aujourd'hui à la mise en place d'une VATE (Valeur Agronomique, Technologique et Environnementale), ont permis de clarifier certaines insuffisances du dispositif d'évaluation actuel et de proposer des voies de progrès. Deux années pour l'inscription et une année en post-inscription semblent trop peu pour explorer la variabilité climatique et ses conséquences sur l'occurrence de sécheresses marquées ou d'attaques de maladies, d'autant plus que ces 3 années ne sont pas, à ce jour, mises en commun pour constituer une base de caractérisation des variétés. Une mise en commun serait d'autant plus nécessaire que le nombre d'essais réalisés et retenus in fine a tendance à diminuer. Toutes séries variétales confondues, une centaine d'essais VAT sont réalisés chaque année dans le cadre des réseaux de post-inscription. Chaque variété est évaluée sur 15 à 45 essais regroupés en 1 à 4 régions à des fins de communication. Par ailleurs, il est communément admis que les types de sols et les itinéraires techniques pratiqués ne sont pas représentatifs des situations de production. En effet, afin de disposer de peuplements réguliers et de conditions édaphiques homogènes, les densités de peuplement ne sont pas limitantes pour le rendement et les sols plutôt profonds. En effet, faible disponibilité en eau et hétérogénéité intra-parcellaire des réserves utiles sont souvent associées et conduisent à des difficultés pour valider les essais et, de ce fait, discriminer les variétés sur leur tolérance à la sécheresse. Afin d'objectiver ces impressions, Barbet-Massin (2011) a mené une étude pour comparer la représentativité des réseaux d'évaluation par rapport aux situations des producteurs. Sols plus profonds, irrigation plus fréquente et peuplements plus élevés différencient bien en réalité les réseaux expérimentaux des situations de production. Ainsi, les conduites bas intrants (pas d'apport d'azote ni de fongicide) sont plus fréquentes chez les agriculteurs (Figure 1).

L'irrigation est pratiquée dans plus de 30 % des situations utilisées pour l'inscription. Enfin, les conduites raisonnées (azote en végétation, bore...) sont majoritaires dans le réseau de post-inscription du CETIOM. Au niveau national, la classe des sols superficiels (profondeur < 60 cm) représente 51 % des situations où le tournesol est cultivé : or ce type de sol n'est représenté qu'à 22 % dans le réseau CETIOM et à 11 % dans le réseau GEVES. Il en résulte des différences en terme de contrainte hydrique subie par la culture, exprimée ici par le nombre de jours où le rapport évapotranspiration réelle (ETR) / évapotranspiration maximale (ETM) est inférieure à 0.6 : les situations de stress précoces sont peu présentes dans les réseaux d'évaluation (Figure 2). De ce fait, l'évaluation des variétés ne rencontre qu'une partie des milieux cibles ce qui pose problème au vu des interactions « variété x milieu x conduite » (Casadebaig, 2008).

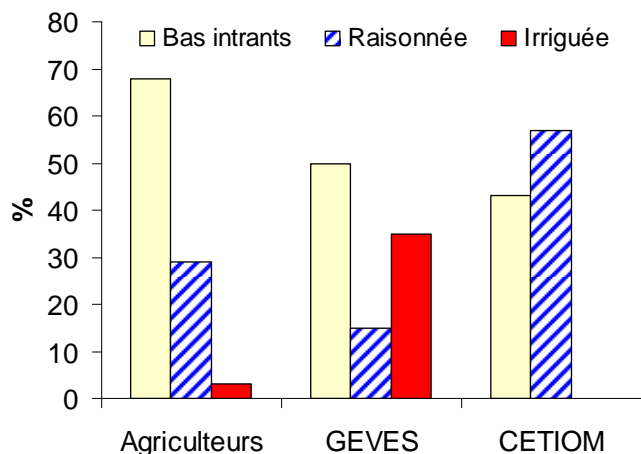


Figure 1 : Répartition des situations agriculteurs, GEVES et CETIOM selon les types de conduite pratiqués pour la Zone Sud (2008-2009) (Barbet-Massin, 2011).

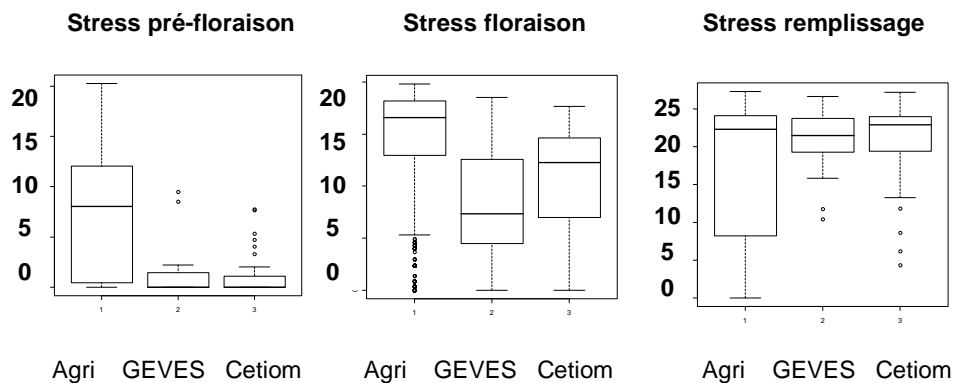


Figure 2 : Comparaison du nombre de jours de stress hydrique (ETR/ETM < 0.6) subis par une variété standard de tournesol pour 3 réseaux (échelle nationale) : agriculteurs, GEVES et CETIOM -simulation basées sur les climats 2008 et 2009. Médiane (trait plein), valeurs comprises entre le 1^{er} et le 3^{ème} quartile dans la boîte (Barbet-Massin, 2011)

Par ailleurs, les critères d'évaluation des épreuves VAT sont en nombre limité, ciblant la productivité, la qualité des graines, la précocité et la tolérance aux principales maladies. Alors que le tournesol est une espèce d'été conduite sans irrigation et en sols souvent séchant, on ne dispose pas d'évaluation de la tolérance à la sécheresse (en dehors de l'esquive par la précocité à floraison). Le petit nombre de critères et leur nature sous-évaluent ainsi la rusticité de certaines variétés, qui pourrait s'exprimer dans certains environnements contraints. De manière générale, on peut considérer que la caractérisation des environnements et le diagnostic des facteurs limitants sont insuffisants et peu exploités pour analyser les classements variétaux et tirer parti de l'information sur les interactions variété-milieu.

Ceci pourrait être utile lors du bilan annuel ou de l'analyse de la représentativité des réseaux à des fins de ré-équilibre des réseaux futurs ou d'analyse différenciée des résultats variétaux (par type de situation pédo-climatique). Enfin, sur chaque site, une seule conduite est pratiquée, indépendamment des exigences de chaque variété, ce qui ne permet pas de tester un conseil variété-conduite par type de milieu. De ce fait, le conseil se limite à l'ajustement de la date de semis à la précocité de la variété (à maturité) et à la décision de protection fongicide selon la classe de tolérance au phomopsis. Pour autant, les distributeurs communiquent sur certains atouts des variétés bien que ceux-ci n'aient pas fait l'objet d'une évaluation officielle.

3. Proposition d'une démarche pour améliorer le système d'évaluation actuel

Dans le cadre de travaux soutenus par le Ministère de l'Agriculture, en réponse aux appels à projets 2007 et 2010 du CTPS, une démarche nouvelle a été proposée en vue de compléter le phénotypage actuel des variétés et de fournir les éléments nécessaires à une évaluation plus large des variétés envisageable dès la 2^{ème} année d'évaluation CTPS. Cette démarche associe la modélisation dynamique du fonctionnement de la culture de tournesol à l'observation d'une variable clé du fonctionnement de la culture, l'indice foliaire à la floraison. Elle permet de quantifier et comparer la réponse à la contrainte hydrique des variétés de tournesol pour différents scénarios de sécheresse. Elle vise à élargir les conditions de milieu (sols, climats) dans lesquelles s'opère l'évaluation actuelle. La Figure 3 illustre les principales étapes de cette démarche et son positionnement par rapport au déroulement de la procédure d'évaluation actuelle :

Étape 1 – phénotypage des variétés : en première année de post-inscription, les variétés inscrites et commercialisées sont évaluées expérimentalement au champ. On complète le phénotypage VAT actuel par quelques variables aisément mesurables en micro-parcelles. On monte également un banc d'essai en serre afin d'apprécier la réponse à la contrainte hydrique de plantes isolées en pots.

Étape 2 – validation du paramétrage des variétés : le modèle paramétré avec ces valeurs est mis en œuvre sur le jeu de données issu de l'inscription : données agronomiques et climatiques et performances réelles des variétés sur l'ensemble du réseau. La mesure de l'indice foliaire pour des variétés témoins permet de recalibrer la description du milieu. En fonction de la qualité de réponse du modèle, celui-ci est considéré comme valide ou non pour chaque variété en vue d'une utilisation en étape 3.

Étape 3 – recherche des combinaisons intéressantes et construction du conseil : un plan d'expérience numérique est construit croisant les variétés, les milieux cibles et les conduites (variantes d'une même technique, itinéraires techniques répondant à une logique donnée) en vue de déterminer les meilleures combinaisons variété-milieu-conduite.

Étape 4 – diffusion du conseil : la diffusion des résultats s'opère au travers des supports usuels (publications Cetiom, Internet...). De nouveaux critères peuvent être introduits dans Oléov@r pour enrichir la connaissance des variétés et affiner la prise en compte du milieu et de la conduite *a priori* dans le choix variétal.

L'objectif du projet est de tester la faisabilité en vraie grandeur (réseau national) et en temps réel (inscription + 1 année) de cette approche encore exploratoire. Loin d'imaginer la suppression de l'expérimentation pour l'évaluation variétale, il s'agit de proposer une démarche basée sur la modélisation qui permette de l'amplifier et de la compléter.

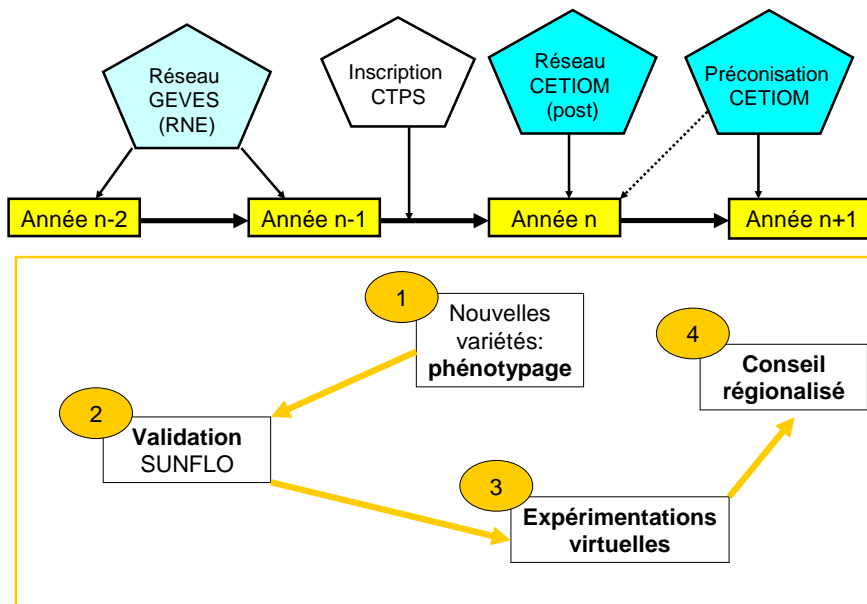


Figure 3 : Démarche d'évaluation assistée par modèle (4 étapes) en vue de la production d'un conseil variété-milieu-conduite régionalisé

4. Le modèle SUNFLO

Le modèle de culture SUNFLO (Casadebaig *et al.*, 2011) qui est au cœur de cette démarche 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 (Figure 4). La production de biomasse est une fonction de l'énergie interceptée par le couvert. Le modèle se base sur une mise en place et une sénescence distribuée de la surface foliaire et non sur une approche 'grande feuille'. Les contraintes environnementales interviennent de manière multiplicative pour réduire la production potentielle permise par le rayonnement et la température. Le modèle sépare le cycle en 6 phases en utilisant le temps thermique (base 4.8 °C): (i) semis (A0)-levée (A2) (ii) A2-bouton étoilé (E1) (iii) E1-stade F1 (début floraison), (iv) F1-stade M0 (début remplissage des graines), (v) M0-stade M3 (maturité physiologique), (vi) 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 multiplicatif 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 s'appliquant à la matière sèche totale produite à maturité physiologique et non pas à partir des composantes du rendement. L'indice de récolte (IR) et la teneur en huile (TH) sont estimés par des régressions 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) : 4 paramètres de phénologie, 4 paramètres d'architecture foliaire, 2 paramètres de réponse à la contrainte hydrique, 2 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 5 variables : températures maximales et minimales, précipitations, évapotranspiration potentielle, rayonnement global. La conduite de culture est décrite par la date de semis, la densité de levée, les dates et quantités d'apports d'eau et d'azote. Les dates de levée et de récolte peuvent être forcées dans le modèle. L'algorithme du modèle SUNFLO est détaillé dans les travaux collectifs de Casadebaig *et al.* (2011) et les choix de modélisation sont discutés dans des travaux antérieurs (Casadebaig, 2008).

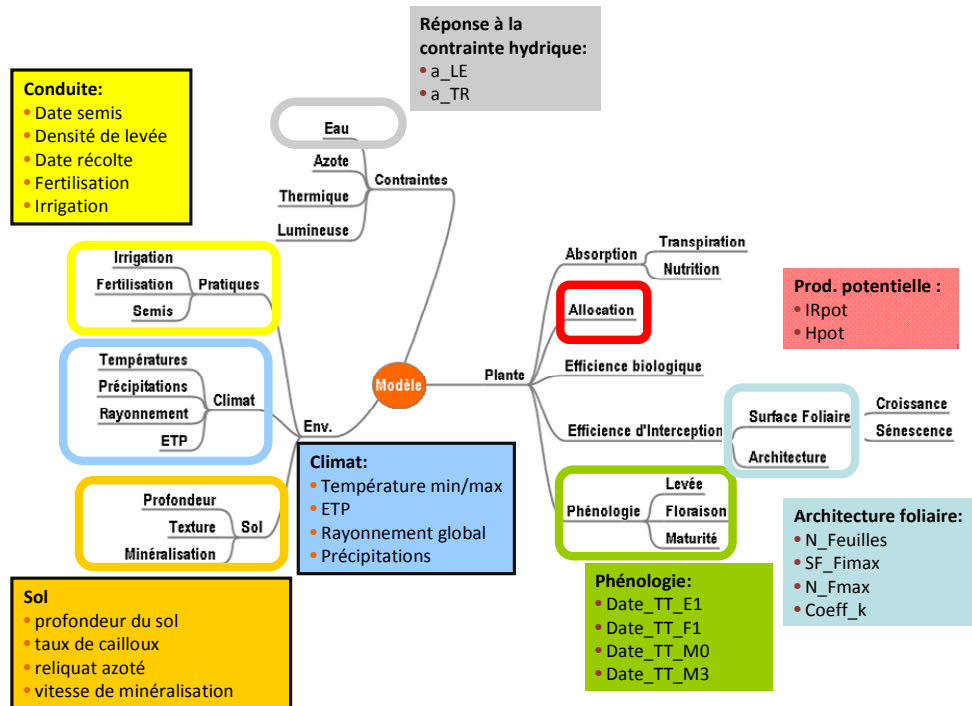


Figure 4 : Schéma du modèle SUNFLO : modules (formalismes), variables d'entrée (conduite, climat, sol) et paramètres variétaux (production potentielle, architecture foliaire, phénologie, réponse à la contrainte hydrique)- d'après Casadebaig (2008) et Haquin (2008).

5. Le phénotypage

5.1 Phénotypage au champ

Le modèle SUNFLO s'appuie sur le phénotypage des variétés au champ, en peuplement dense, dans le cadre d'essais de type VAT (parcelles de 30 m²). Pour cet objectif, on utilise des sites et des conduites qui permettent d'obtenir des conditions potentielles, c'est à dire limitant l'occurrence 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, un site 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 ; un site rationné avant floraison (sol superficiel, peuplement moins dense) est propice à maximiser l'indice de récolte et la teneur en huile s'il est associé à des irrigations encadrant la floraison. Le site profond permet de paramétrer le fonctionnement préfloraison des variétés (surface foliaire) et le site rationné/irrigué de paramétrer leur fonctionnement en post-floraison (remplissage des akènes). 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. Les stades phénologiques sont régulièrement notés (en particulier levée, début floraison et maturité physiologique). A la floraison, les variables suivantes sont mesurées pour 5 plantes par bloc (soit 15 plantes par variété): nombre total de feuilles (NF), surface (longueur x largeur x 0.7, SFimax) et rang (n_ SFimax) de la plus grande feuille depuis la base, et hauteur des plantes (pour l'estimation du coefficient d'extinction k).

Au stade M3, 2 x 5 plantes sont prélevées pour la mesure de l'indice de récolte 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 4 rangs centraux et la teneur en huile est déterminée par RMN.

Tableau 1 : Paramètres variétaux et conditions d'obtention en routine

Processus	Signification	Nom	Unités	Mesure champ (peuplement dense)	Mesure serre (pots)	Calcul	Base de données VAT	Valeur moyenne
Phénologie	Durée « levée – stade E1 »	TT_E1	°C.Jours	Possible	Non	Oui	Non	532
	Durée « levée – stade F1 »	TT_F1	°C.Jours	Oui	Non	Non	Oui	923
	Durée « levée - stade M0 »	TT_M0	°C.Jours	Difficile	Non	Oui	Non	1170
	Durée « levée – stade M3 »	TT_M3	°C.Jours	Oui	Non	Non	Non	1737
Architecture	Nombre de feuilles (total)	NFT	s.u	Oui	Possible	Non	Non	26.7
	Rang de la plus grande feuille	n_SFimax	s.u	Oui	Possible	Non	Non	17.6
	Surface de la plus grande feuille	SFimax	cm ²	Oui	Possible	Non	Non	462
	Coefficient d'extinction du rayonnement	k	s.u	Difficile	Non	Oui	Non	0.84
Réponse à la contrainte hydrique	Seuil de réduction de l'expansion foliaire	a_LE	s.u	Non	Oui	Non	Non	-3.45
	Seuil de réduction de la transpiration	a_TR	s.u	Non	Oui	Non	Non	-9.77
Allocation	Indice de récolte potentiel	IRpot	s.u	Oui	Non	Non	Non	0.41
	Teneur en huile potentielle (0 % hum)	THpot	%	Oui	Non	Non	Oui	55.5

Le Tableau 2 illustre pour quelques variétés commerciales récentes la variabilité phénotypique observée (mini, maxi) pour quelques paramètres de croissance et de développement et pour les variables d'allocation de la biomasse vers les akènes. La proposition d'un banc d'essai au champ combinant 2 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 inter-annuelle et inter-site 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 Lecoeur *et al.* (2011). 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.

Tableau 2 : Variabilité intra-spécifique observée pour quelques caractères phénotypiques en conditions de bonne productivité

Année	Nbre variétés		Site profond (En Crambade)						Site rationné et irrigué (Surgères)	
			Date F1	Hauteur (cm)	NFT	N_Fimax	SFimax (cm ²)	LAI	IRpot	THpot (%)
2008	18	Mini	4/07	151	22.5	14.0	388	4.3	0.36	48.7
		Maxi	15/07	180	29.3	20.6	564	6.0	0.44	57.9
2009	21	Mini	12/07	171	27.1	13.7	350	4.5	0.37	51.2
		Maxi	17/07	202	34.3	19.3	497	6.7	0.43	57.5
2010	15	Mini	4/07	170	24.3	13.6	305	3.4	0.36	51.5
		Maxi	9/07	187	33.1	18.7	420	4.8	0.41	55.8

5.2 Phénotypage en serre

Un protocole a été proposé par Casadebaig *et al.* (2008) pour déterminer la réponse de l'expansion foliaire et de la transpiration à un dessèchement progressif du sol. L'objectif est de suivre au cours d'un dessèchement progressif du sol, l'évolution de variables écophysiologicals (transpiration de la plante, conductance stomatique et expansion foliaire) en regard de l'état du milieu (teneur en eau du pot). Pour chaque génotype à caractériser, le modèle logistique suivant est proposé pour décrire la réponse des génotypes à la contrainte hydrique :

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

avec y = NTR (transpiration relativement au témoin bien irrigué)

ou NLE (expansion foliaire relativement au témoin bien irrigué);

x = FTSW (fraction d'eau du sol disponible pour la transpiration de la plante)

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).

La Figure 5 illustre deux comportements extrêmes observés parmi les variétés récentes : comportement économe ou productif. Le comportement 'économe' correspond à une réponse de la plante (chute de transpiration ou de la vitesse d'expansion foliaire) pour des valeurs élevées d'humidité du pot, privilégiant l'économie d'eau pour des phases ultérieures ; le comportement 'productif' correspond à une réponse plus tardive privilégiant le maintien de la croissance foliaire et de la photosynthèse quitte à épuiser plus rapidement les ressources en eau (Maury et al., 2011). Le protocole de phénotypage au champ est facilement applicable à quelques essais VAT choisis à la floraison. Par contre, 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.

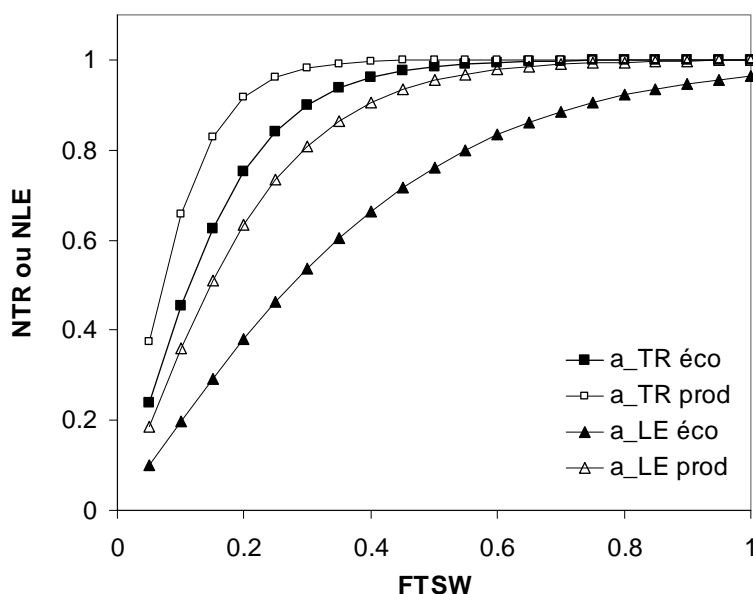


Figure 5 : Représentation des différentes réponses de la plante au dessèchement du sol obtenues en serre en 2010 à Auzeville : LE se rapporte à l'expansion foliaire, TR à la transpiration, NLE et NTR traduisent les valeurs normalisées de ces 2 variables, FTSW correspond à la fraction d'eau utile pour la transpiration.

6. Les performances du modèle

Le modèle SUNFLO a été évalué sur plusieurs réseaux expérimentaux : progrès génétique (2000-2001), post-inscription Cetiom (2008-2009) (Debaeke *et al.*, 2010 ; Casadebaig *et al.*, 2011). La capacité du modèle à représenter les conditions environnementales des sites d'essai a été testée sur 42 sites du réseau de post-inscription du Cetiom en 2008 en comparant les moyennes variétales observées et simulées pour le rendement. La valeur moyenne de l'erreur de prédiction est de 5.7 q.ha⁻¹ (18.3 %). Dans 9 cas sur 42, l'écart absolu entre simulation et observation excède 8 q.ha⁻¹. Dans 4 de ces situations, le rendement est surestimé avec SUNFLO : dans ce cas, le rendement observé est plutôt faible (< 30 q.ha⁻¹). Dans les 5 autres situations, le modèle sous-estime le rendement des essais : il s'agit de cas où les rendements observés sont plutôt élevés (> 35 q.ha⁻¹). Dans le premier cas de figure, on peut penser que des facteurs limitants non simulés par le modèle se sont manifestés. Dans les deux cas, on ne peut écarter une estimation erronée de la réserve utile du sol, de la disponibilité en azote ou une représentation incorrecte du climat de l'essai par le poste météo choisi. Par contre, pour 33 sites sur 42, la valeur moyenne de l'erreur de prédiction est de 3.5 q.ha⁻¹ (11.4 %). La Figure 6 présente pour 12 variétés récentes les confrontations rendement simulé vs observé réalisées sur ces sites jugés fiables. De manière générale, les rendements des différents sites d'étude sont bien classés à l'exception de quelques variétés. Les coefficients de corrélation (r) entre rendement simulé et observé sont compris entre 0.46 (non significatif) et 0.79 (hautement significatif), indiquant un bon classement des sites expérimentaux et donc une bonne aptitude de SUNFLO à caractériser les environnements des essais par la réponse des variétés.

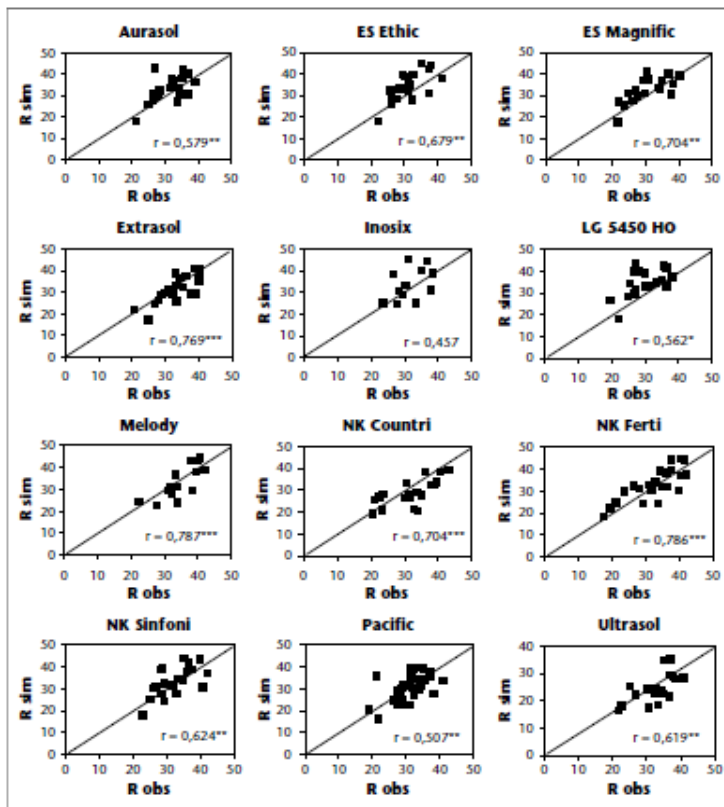


Figure 6 : Comparaison pour 12 variétés des rendements simulés et observés (q.ha⁻¹, 0 % humidité) sur les 33 sites où les variétés ont été expérimentées. Corrélations significatives à $P < 0.001$ (***), $P < 0.01$ (**), $P < 0.05$ (*). Source : Debaeke *et al.* (2010)

Ainsi, 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 dès lors que le milieu est bien caractérisé. 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) représentatives du site d'étude.

Dans un certain nombre de cas, la surestimation du rendement par SUNFLO est probablement la conséquence des 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. Dans d'autres cas, le rendement observé est supérieur à la valeur simulée. Ceci peut être dû à une sous-estimation de la réserve utile (notamment en sol superficiel avec sous-sol fissuré) ou de la disponibilité en azote (estimation du reliquat, vitesse de minéralisation). La représentation du comportement variétal moyen sur un réseau d'essais est accessible avec une précision similaire à celle obtenue pour l'effet site. Cependant, la description variétale proposée dans SUNFLO ne permet pas de reproduire strictement le classement variétal observé pour des génotypes d'une même génération de sélection. Dans les essais bien conduits, les variétés doivent différer d'au moins 2 q.ha⁻¹ pour être classées comme significativement différentes pour le rendement. Ce niveau de précision n'est pas accessible actuellement par SUNFLO. Par contre, la distinction de variétés à comportement extrême paraît possible comme cela a été montré par Casadebaig *et al.* (2011) pour des variétés exprimant 30 années de progrès génétique (Figure 7). Ainsi, des variétés différant fortement par la précocité, l'architecture ou la réponse à l'eau peuvent être distinguées par le modèle tant pour la teneur en huile que le rendement et justifier de combinaisons sol – climat – conduite optimales différentes (Casadebaig et Debaeke, 2008).

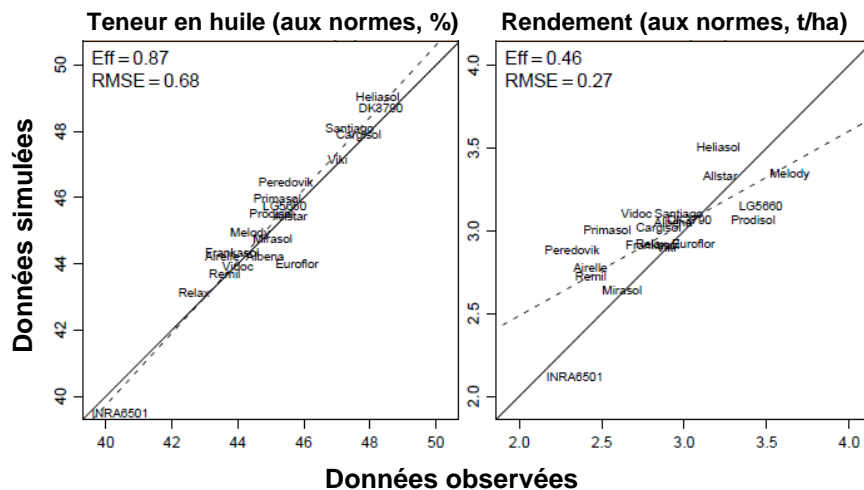


Figure 7 : Teneur en huile et rendement observés et simulés sur le réseau « progrès génétique » (2000-2001) : moyenne de 16 sites. Source : Casadebaig *et al.* (2011)

7. Application du modèle à l'évaluation variétale

Dans cette partie, nous illustrons comment le modèle SUNFLO pourrait être utilisé dans le cadre de l'évaluation variétale actuelle pour la compléter et mieux l'exploiter en direction du conseil.

7.1 Caractérisation des environnements d'évaluation

Le modèle peut être utilisé pour comparer les stress hydriques perçus par différents types variétaux (précocité, architecture, comportement stomatique) dans les différents sites d'un réseau expérimental. Dans l'exemple suivant (Figure 8), on montre que le nombre de jours de stress hydrique simulé varie selon le site, la phase du cycle et la variété. De gauche à droite, l'indice foliaire et le rendement observés diminuent alors que le stress hydrique augmente et se manifeste plus précocement. L'intensité de la contrainte dépend de la ressource disponible (réserve en eau du sol, pluviométrie, irrigation) et de son rythme de consommation (fonction de la croissance racinaire, du développement de la surface foliaire, de sa sensibilité à la contrainte hydrique et du comportement stomatique sous contrainte). Il est souvent difficile de disposer d'une bonne caractérisation de la réserve utile, de son taux de remplissage et du reliquat d'azote initial. On propose ainsi de mesurer l'indice foliaire à la floraison pour 1 ou 2 variétés témoins et de recalibrer la description de l'état initial avant de réaliser le diagnostic d'environnement. Les rendements habituellement obtenus sur une parcelle peuvent aussi servir à définir plus précisément la réserve utile.

4 sites (sol, climat, conduite)

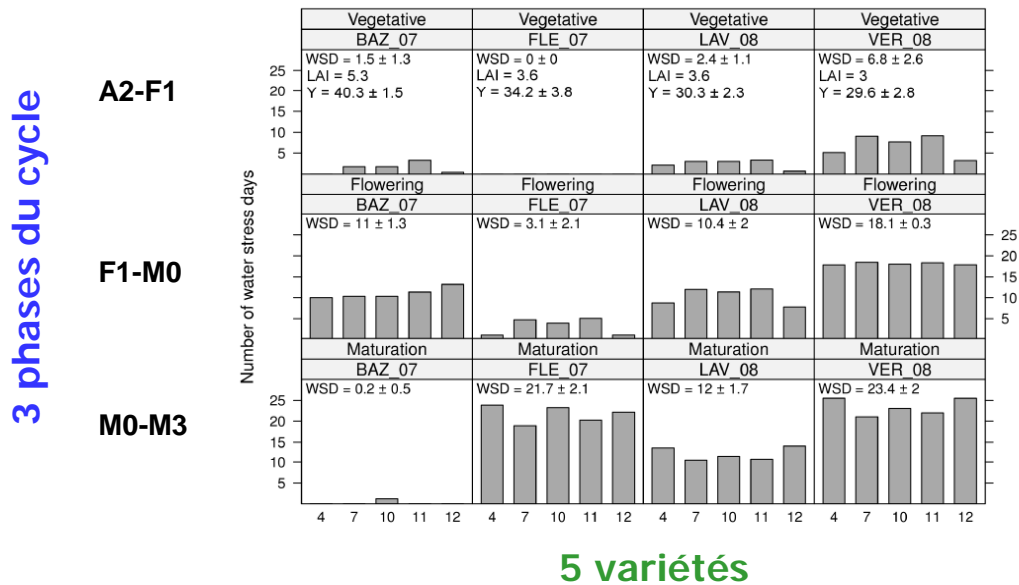


Figure 8 : Nombre de jours de stress hydrique simulés par phase (pré-floraison : stades A2-F1, floraison : F1-M0, remplissage des graines : M0-M3) pour 5 variétés dans 4 sites expérimentaux (BAZ_07, FLE_07, LAV_08, VER_08) ; indice foliaire (LAI) et rendement (Y, q/ha) observés en moyenne pour les 5 variétés.

Le rang de la plus grande feuille peut également être utilisé comme indicateur de la précocité du stress hydrique pour une variété donnée (Figure 9) : ainsi, plus cette feuille repère est positionnée bas (par rapport à la référence variétale en conditions d'eau non limitantes), plus cela indique l'apparition précoce d'un stress principalement hydrique.

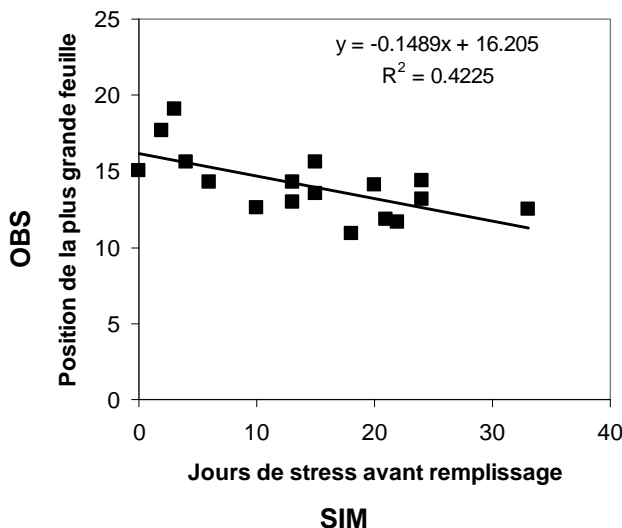


Figure 9 : Relation entre la position de la plus grande feuille (observée) et le nombre de jours de stress hydrique avant remplissage du grain simulé par SUNFLO (cv Extrasol, 2009-2010 : réseau CTPS)

7.2 Recherche d'idéotypes variétaux par milieu

Le modèle SUNFLO permet de tester la réponse du tournesol à des variations des traits morpho-physiologiques : pour différentes disponibilités en eau (sol, climat, irrigation), on peut évaluer l'importance relative des critères de phénologie, de surface foliaire ou de comportement stomatique dans l'adaptation d'une variété à cette contrainte.

Ainsi, Casadebaig et Debaeke (2008) ont montré l'importance de ce dernier caractère, peu connu et pas mesuré en routine, pour expliquer les performances d'une variété comme Melody en sol superficiel de coteau. Si l'on combine ces traits pour constituer des variétés virtuelles (sous réserve d'une variabilité génétique suffisante et d'une possibilité d'associer ces caractères en sélection), il est ainsi possible de tester *in silico* une liste variétale dans une gamme de situations (sol, climat, conduite). Nous avons ainsi constitué une liste variétale virtuelle composée de 12 entrées combinant 2 précocités (E ; précoce ; L : tardif), 3 niveaux de surface foliaire (S : faible ; M : modérée ; L : forte) et 2 comportements stomatiques (E : économe ; P : productif), mis en test pendant 35 années sur 12 milieux variant par la profondeur de sol (S1 < S2 < S3) et le climat (Casadebaig et Debaeke, 2011). La Figure 10 met en évidence les corrélations qui existent entre types variétaux et environnements. Ainsi, dans les situations à faible contrainte hydrique (VER.S3), les variétés tardives (L), à surface foliaire modérée (M) à forte (L) et à fermeture stomatique tardive (L) seraient à promouvoir. A l'inverse, en situation contraignante (AUZ.S1, AUZ.S2), les variétés précoces (E) à fermeture stomatique rapide (E), plus économes en eau, seraient à privilégier.

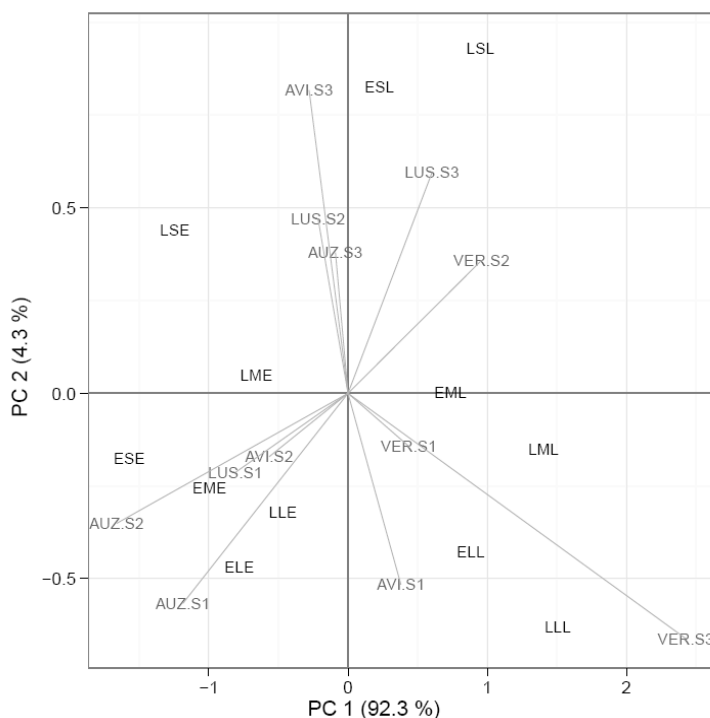


Figure 10 : Représentation biplot issue d'un modèle d'analyse AMMI (additive main effects and multiplicative interaction). La probabilité d'un stress hydrique augmente ainsi : AVI > AUZ > LUS > VER et S1 > S2 > S3 (Casadebaig et Debaeke, 2011)

Ce type d'approche peut être utilisé pour la recherche d'idéotypes soit au démarrage d'un programme de sélection soit pour tester *a priori* différentes variétés ou différentes combinaisons de traits en vue de rechercher des variétés adaptées localement. La simulation permet de tester une série climatique assez longue pour définir un environnement donné.

7.3 Adaptation de la conduite à la variété

Le modèle permet également de construire des courbes de réponse du rendement d'une variété à la variation de différents éléments de la conduite ou à différents itinéraires techniques. On illustre ici (Figure 11) l'adaptation de la densité de peuplement pour 2 types variétaux différant par la surface foliaire totale (A : faible ; B : forte) testés sur 3 sols variant par la réserve utile (80, 150, 250 mm). On montre que les réponses à la densité de peuplement varient selon les sols et selon les types variétaux. En sol profond, on montre bien que l'optimum de densité pour le rendement se situe à 4 plantes/m² en B contre 5.5 en A. Les densités optimales sont d'autant plus faibles que la disponibilité du milieu en eau est limitée. On ne considère pas ici les risques de maladies aux fortes densités et on fait l'hypothèse d'une répartition homogène des faibles densités sur la parcelle, ce qui n'est pas fréquent en milieu réel.

Dans la pratique, les densités semées sont à moduler en fonction des risques de levée faible et hétérogène.

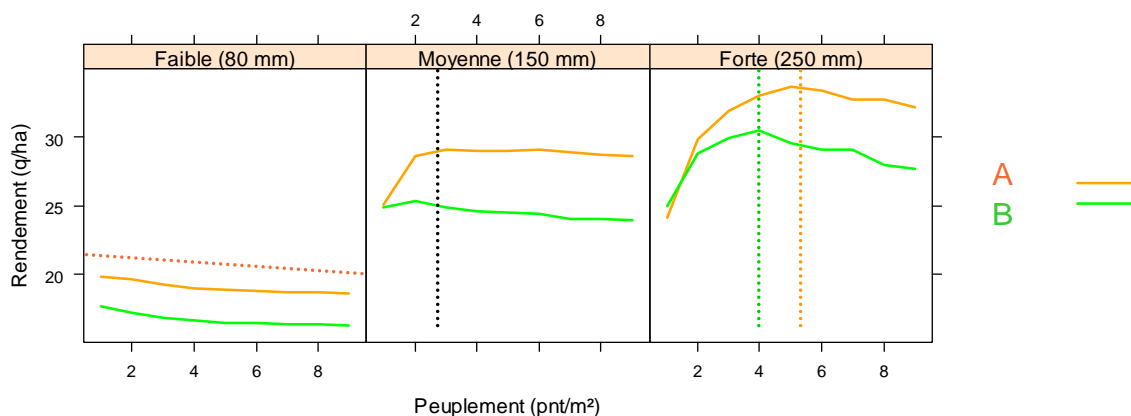


Figure 11 : Simulation de la réponse du rendement à la densité de peuplement pour 3 niveaux de réserve utile (80, 150, 250 mm) et 2 variétés d'architecture contrastée (surface foliaire A < B)

Conclusion

L'analyse des interactions variété-milieu-conduite s'appuyant sur un modèle de culture dynamique à paramètres variétaux constitue une approche originale. S'intégrant dans le dispositif actuel d'évaluation des innovations variétales, elle contribue à en améliorer l'efficacité. Les points forts sont les suivants :

- Une démarche de phénotypage et d'évaluation du modèle conciliable avec le dispositif de post-inscription
- La possibilité de conduire des expérimentations numériques (listes variétales x combinaisons sol-climat-conduite) permettant de tester de nouvelles combinaisons non expérimentées.

Cependant, si le modèle parvient à classer des variétés à comportement très tranché, il manque de précision pour comparer des variétés moins différenciées en productivité. Ceci nous amène à progresser sur la structure du modèle, sa prise en compte des facteurs limitants et son paramétrage. Dans le cadre de notre travail avec SUNFLO, nous avons identifié plusieurs voies de progrès visant d'une part une accessibilité accrue du modèle et d'autre part l'extension du cadre du modèle pour en améliorer la capacité de prédiction. Les futurs projets autour de ce modèle verront donc ces deux branches de développement coexister. Au niveau de l'accessibilité, les efforts devront porter sur une meilleure adaptation du paramétrage actuel au traitement du flux régulier d'innovations variétales. Les deux paramètres génotypiques nécessitant une expérimentation en conditions contrôlées (seuils de réponse à contrainte hydrique) pourraient être acquis soit d'une manière plus automatisée (plate-forme de phénotypage haut-débit) soit par la recherche d'indicateurs du fonctionnement physiologique plus facilement mesurables (dosages biochimiques d'osmolytes). Des méthodes d'estimation algorithmiques pourraient également permettre d'utiliser des variables plus couramment mesurées (biomasse, indice foliaire) pour accéder indirectement à la valeur de ces paramètres. L'amélioration de l'accessibilité passe aussi par des projets de développement d'outils opérationnels basés sur le modèle de simulation. Par exemple, le logiciel COLLECTO permet la simulation des combinaisons variété-milieu-conduite à l'échelle d'un territoire (Champolivier et al., 2011). Un autre logiciel est en développement avec pour objectif de simplifier et d'élargir le travail des prescripteurs de variétés par la conception de protocoles d'évaluation numériques. A plus long terme, l'amélioration de la capacité de prédiction du modèle nécessitera la prise en compte de facteurs limitants additionnels, au premier rang desquels les maladies de fin de cycle (Mestries et al., 2011) qui contribuent fortement aux interactions variété-milieu. Les formalismes représentant l'allocation de la biomasse ou la production d'huile pourraient également être repensés pour une modélisation plus mécaniste (Borredon et al., 2011).

Indépendamment des formalismes du modèle, le développement de méthodes d'assimilation de données observées en cours de saison (ex. indice foliaire, interception lumineuse) permettrait d'envisager un ajustement des variables d'entrée (incertaines ou indisponibles) pour une meilleure représentation de la situation simulée.

Références bibliographiques

- Barbet-Massin C., 2011. Quelle représentativité des réseaux d'homologation variétale et de développement ? Cas du tournesol. Mémoire de fin d'étude, El Purpan, Toulouse, 81 p
- Borredon M.E., Berger M., Dauguet S., Labalette F., Merrien A., Mouloungui Z., Raoul Y., 2011. Débouchés actuels et futurs du tournesol produit en France - Critères de qualité. *Innovations Agronomiques* 14, 19-38
- Casadebaig P., 2008. Analyse et modélisation dynamique des interactions génotype-environnement-conduite de culture : application au tournesol (*Helianthus annuus* L.). Thèse de doctorat, INP Toulouse, 195 p.
- Casadebaig P., Debaeke P., 2008. Exploring genotypic strategies for sunflower drought resistance by the means of a dynamic crop simulation model. *Proceedings of the 17th International Sunflower Conference, Cordoba (Spain), Vol.1, 369-374.*
- Casadebaig P., Debaeke P., Lecoeur J., 2008. Thresholds for leaf expansion and transpiration response to soil water deficit in a range of sunflower genotypes. *European Journal of Agronomy* 28, 646-654.
- Casadebaig P., Debaeke P., 2011. Using a crop model to assess genotype-environment interactions in multi-environment trials. In : N.Halford, M.Semenov (Eds), *System Approaches to Crop Improvement, Aspects of Applied Biology* 107, p. 19-25.
- Casadebaig P., Guilioni L., Lecoeur J., Christophe A., Champolivier L., Debaeke P., 2011. SUNFLO, a model to simulate genotype-specific performance of the sunflower crop in contrasting environments. *Agricultural and Forest Meteorology* 151, 163-178.
- Champolivier L., Debaeke P., Thibierge J., Dejoux J.F., Ledoux S., Ludot M., Berger F., Jouffret P., Vogrincic C., Lecomte V., Merrien A., Mestries E., Thiard J., Noël M., Caumes E., Edeline T., Provot M., 2011. Construire des stratégies de production adaptées aux débouchés à l'échelle du bassin de collecte. *Innovations Agronomiques* 14, 39-57
- Debaeke P., Casadebaig P., Haquin B., Mestries E., Palleau J.P., Salvi F., 2010. Simulation de la réponse variétale du tournesol à l'environnement à l'aide du modèle SUNFLO. *OCL - Oléagineux, Corps Gras, Lipides* 17, 143-151.
- Haquin B., 2008. Paramétrage et évaluation d'un modèle de simulation du tournesol sur les réseaux d'essais variétaux. Mémoire de DAA, ENSAIA Nancy, 36 p.
- Lecoeur J., Poiré-Lassus R., Christophe A., Pallas B., Casadebaig P., Debaeke P., Vear F., Guilioni L., 2011. Quantifying physiological determinants of genetic variation for yield potential in sunflower. SUNFLO : A model-based analysis. *Functional Plant Biology* 38, 246-259.
- Maury P., Langlade N., Grieu P., Rengel D., Sarrafi A., Debaeke P., Vincourt P., 2011. Ecophysiologie et génétique de la tolérance à la sécheresse chez le tournesol. *Innovations Agronomiques* 14, 123-138
- Mestries E., Desanlis M., Seassau C., Moinard J., Debaeke P., Dechamp-Guillaume G., 2011. Impact de la conduite de culture sur les maladies du tournesol. *Innovations Agronomiques* 14, 91-108
- Wagner D., Lieven J., 2010. Enquête sur les conduites du tournesol 2009 : synthèse nationale. Dossier technique CETIOM, 20 p.