



Dossier Tournesol, 10 années de recherches collaboratives - Résultats marquants

Emmanuelle Bret-Mestries, Philippe Debaeke, Celia Seassau, Gregory Dechamp-Guillaume, Nicolas Langlade, Jean-Noel Aubertot, Pierre Casadebaig

► To cite this version:

Emmanuelle Bret-Mestries, Philippe Debaeke, Celia Seassau, Gregory Dechamp-Guillaume, Nicolas Langlade, et al.. Dossier Tournesol, 10 années de recherches collaboratives - Résultats marquants. Terres Inovia, 33 p., 2016. hal-03538042

HAL Id: hal-03538042

<https://hal.inrae.fr/hal-03538042>

Submitted on 20 Jan 2022

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.

Dossier

Tournesol

10 années de recherches collaboratives

Résultats marquants



Sommaire

Préface	1
La culture du tournesol, contexte international et français de la production et des marchés	2
La recherche sur le tournesol à Toulouse : historique et résultats d'un dispositif collaboratif unique	3
Connaître les effets des facteurs limitants du rendement et de la qualité pour mieux les contrôler	
<i>Le tournesol et l'eau</i>	5
<i>Le tournesol et son complexe parasitaire</i>	11
<i>L'élaboration de la qualité</i>	17
Modéliser le phénotype et le génotype chez le tournesol	20
Concevoir des itinéraires techniques adaptés	22
Développer des outils pour le conseil et l'évaluation variétale	24
Identifier les freins et leviers (réglementation, technologie, marché) pour le développement d'éco-innovations variétales	27
Remerciements	28
Lexique	29



Edition :
Terres Inovia
1 avenue Lucien Brétignières
78850 Thiverval-Grignon
Tél. : 01 30 79 95 00
www.terresinovia.fr

Coordination :
Emmanuelle Mestries - Terres Inovia
Philippe Debaeke - Inra

Maquette :
Nathalie Harel - Terres Inovia

Photo de couverture :
Laurent Jung - Terres Inovia

Impression :
BIALEC
23 allée des Grands Pâquis
54180 Heillecourt

Juin 2016



Préface

L'UMTournesol, un modèle de fonctionnement du processus d'innovation

L'unité mixte technologique (UMT) Tournesol fête ses 10 ans, ou plus exactement elle arrive au terme de son second mandat de cinq ans. Elle est en tout point emblématique d'une recherche au service de l'innovation pour l'agriculture et l'agro-alimentaire.

En 2004, après différents échanges avec les professionnels agricoles et sous l'impulsion des responsables interprofessionnels, Guy Riba, alors directeur général délégué à l'Inra, en charge des programmes, du dispositif et de l'évaluation scientifique, a décidé de revoir en profondeur le dispositif de recherche de l'Inra sur le tournesol. Il a appuyé sa décision sur le potentiel agronomique de cette espèce oléagineuse, liée à la qualité de sa graine, à la valeur de son huile et à la possibilité d'utiliser ses tourteaux riches en protéines, surtout après décorticage.

Cette révision a conduit au regroupement des forces à Toulouse, au renforcement de la recherche en génétique et en génomique mais aussi au développement de l'interdisciplinarité, et au déploiement de nouveaux partenariats. Le dispositif des UMT, qui venait d'être initié par le ministère en charge de l'Agriculture, était particulièrement bien adapté, puisqu'il s'agissait de mener un même programme de recherche appliquée en un seul lieu, en associant en nombre significatif et suffisant des chercheurs de la recherche publique et de l'enseignement supérieur et des ingénieurs des instituts techniques agricoles. Cette organisation a permis le contact et l'échange quotidien et a stimulé l'activité et la créativité des équipes impliquées.

L'UMTournesol a donc été établie pour une première étape de cinq ans avec le Cetiom, devenu depuis Terres Inovia, puis lors de son renouvellement en 2011 toujours avec le Cetiom, en accueillant d'autres partenaires toulousains et toujours avec cette unicité de lieu. Elle a rapidement été identifiée comme un modèle de fonctionnement de ce type de dispositif, ayant contribué à créer une équipe et une véritable communauté, particulièrement dynamique et sympathique.

Les thématiques de l'UMT sont focalisées sur les enjeux essentiels de la culture du tournesol, à l'échelle de la plante, de la parcelle et du territoire : la résistance à la sécheresse et aux maladies, la qualité de la graine et en particulier la teneur en huile et enfin la prévision de la collecte. La dimension remarquable du travail de l'UMT est d'avoir pris en compte à ces différents niveaux, toutes les interactions entre la variété, le milieu, les pratiques culturales et les systèmes de culture. Grâce au dispositif partenarial de l'UMT, l'expérimentation multi-sites est mobilisée. Cependant la modélisation est le véritable moteur du dispositif et la dimension emblématique de l'UMT.

Les résultats remarquables ne manquent pas et nombre d'entre eux seront présentés lors de ces journées. De façon transversale, la dynamique au sein de l'UMT et de l'ensemble du pôle de recherche toulousain a permis :

- des taux de succès aux appels à projets nationaux largement supérieurs à la moyenne,
- des travaux largement connus et reconnus aux niveaux national et international, dans la communauté scientifique comme dans celle des oléagineux et du tournesol,
- un lien aux professionnels aussi efficace qu'apprécié comme le montre la forte mobilisation autour de ces 10 ans de recherche collaborative,
- une base solide pour des projets de grande ampleur comme par exemple Sunrise, projet de génomique conduit sur une période de 8 ans dans le cadre du PIA 1 (projet investissement d'avenir) et piloté localement par l'équipe « Génétique et Génomique du Tournesol » de l'Inra.

Le tournesol est une plante à intérêts multiples autant pour ses débouchés alimentaires et non alimentaires que pour ses caractéristiques agronomiques et environnementales. Sa culture est d'une importance majeure pour la filière oléoprotéagineuse française. Le potentiel de développement en surface est important et répond à une demande croissante du marché.

Le pôle de recherche toulousain est donc aujourd'hui au cœur d'un défi important : celui de donner à cette culture la place qu'elle doit occuper dans nos systèmes agricoles et alimentaires durables, en s'appuyant sur les principes de la bio-économie (valorisation en cascade, circularité) et en poursuivant ses actions de recherche et d'innovation qui ont démontré leur grande valeur. Pour cela, le pôle toulousain continuera à bénéficier d'un appui important de la filière et de partenariats dynamiques tant sur les plans académiques que professionnels. Son interdisciplinarité et la grande complémentarité entre les chercheurs et ingénieurs des différentes structures en font une source de solutions qui seront sans aucun doute à la hauteur des enjeux.

Que l'aventure continue...

Christian Huyghe
Directeur Scientifique
Adjoint Agriculture de l'Inra



Laurent Rosso
Directeur de Terres Univia
& Terres Inovia



La culture du tournesol, contexte international et français de la production et des marchés

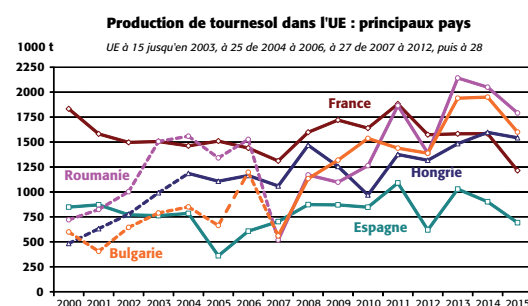
Le tournesol (*Helianthus annuus*), originaire des régions semi-arides du continent nord-américain, est dans sa version domestiquée une culture annuelle de printemps exploitée pour ses graines riches en huile (plus de 44 % de la matière brute). Le mieux doté en huile de nos oléagineux métropolitains est aussi le plus fibreux (15 % de cellulose brute, présente notamment dans les coques) et le moins concentré en protéines (18 %), impactant ainsi la qualité des tourteaux obtenus après extraction de l'huile des graines. Mais il offre aussi l'avantage de ne pas contenir de composés antinutritionnels, avec pour conséquence une grande souplesse d'utilisation en alimentation animale. Quant à l'huile de tournesol classique, où l'acide linoléique (plus de 65 % de C18:2) prédomine, elle est traditionnellement utilisée dans le bassin méditerranéen, les Balkans et le Proche-Orient tandis que le type oléique (plus de 80 % de C18:1), largement minoritaire aujourd'hui, est de plus en plus demandé par l'industrie alimentaire occidentale. Mais les atouts de cette huile vont bien au-delà de ces deux variantes avec un portefeuille très diversifié dans la gamme des acides gras en C18. On peut ainsi citer les tournesols mid-oléiques prédominants aux Etats-Unis (environ 65 % d'acide oléique), les hauts oléiques (plus de 90 % en C18:1) cultivés plus modestement mais prometteurs pour la lipochimie, ou encore les low-sat (moins de 3,5 % d'acides gras saturés) ou haut stéariques/haut oléiques encore en pré-développement en Europe. De surcroît, sa teneur élevée en vitamine E (alpha-tocophérols) confère à l'huile de tournesol un avantage nutritionnel indéniable.

A l'échelle mondiale, le tournesol apparaît comme un petit oléagineux, ne générant, avec ses 42 millions de tonnes annuelles, que 8 % des graines oléagineuses, loin derrière le soja (320 millions de tonnes). Si, pour des raisons à la fois pédoclimatiques et de marché, la zone de prédilection de culture s'étend toujours de l'Espagne à l'Oural, deux pays, l'Ukraine et la Russie, sont parvenus en moins de 10 ans à peser pour la moitié de la production mondiale. L'Ukraine et globalement les pays de la zone mer Noire ont ainsi développé leur trituration en misant sur un décorticage efficace des graines à même de délivrer un tourteau dit Hi-Pro à 36 % de protéines sur brut contre environ 29 % pour un tourteau classique. L'Union européenne (7,8 millions de tonnes de graines en 2015) ne représente aujourd'hui que 20 % de la production de tournesol et se retrouve ainsi dans une situation d'importateur net d'huile et surtout de tourteaux de tournesol.

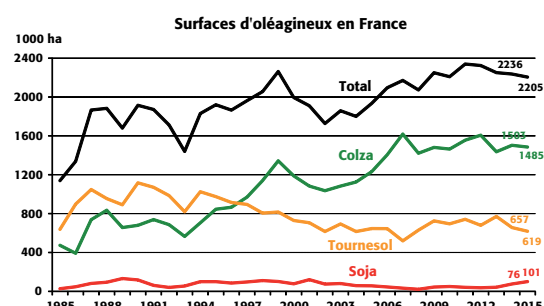
Longtemps leader au sein de l'Union européenne (pic de 1,1 million d'hectares en 1990), la France s'est faite récemment distancer par la Roumanie et la Hongrie, en raison d'une lente mais continue érosion des surfaces et de rendements ne progressant plus en moyenne dans les situations actuelles de grandes cultures. Aujourd'hui d'ailleurs, à la suite d'une progression rapide de la productivité dans des pays tels que la Hongrie, la Roumanie ou même l'Ukraine, on observe une tendance à la convergence des rendements avec la France dont il faudra observer avec attention l'évolution. En revanche, la France conserve la pole position mondiale en termes de production de tournesol oléique (environ 1/3 du total) avec près de 70 % de la sole nationale qui y est dédiée, démontrant là son savoir-faire en termes d'amélioration variétale, de segmentation et d'organisation en filière. Cependant, sous l'impulsion d'une demande en oléique de l'industrie alimentaire en hausse, d'autres pays augmentent leur production, ce qui peut peser et sur les prix conjoncturellement et à terme sur l'avantage concurrentiel qu'avait la France sur ce segment. L'arrivée de nouvelles variétés de colza à haute teneur en acide oléique pourrait également modifier la donne. En termes de bilan d'échanges, la France est généralement légèrement excédentaire en production de graines de tournesol avec une moyenne de 1,55 million de tonnes produites par an et une trituration domestique capable de traiter ces volumes. C'est aussi le cas pour l'huile, encore première huile consommée à table par les français, mais pas celui des tourteaux dont la France importe plus de 900 000 tonnes par an, de qualité Hi-Pro essentiellement, depuis les usines de trituration de la zone mer Noire, Ukraine en tête. Ce grade Hi-Pro a permis au tourteau de tournesol d'entrer de façon plus importante dans de nombreuses formules d'aliments dont ceux à destination des volailles, avec en conséquence un doublement de sa consommation entre 2007 et 2011 pour atteindre aujourd'hui près de 1,5 million de tonnes par an (tourteaux Low-Pro et Hi-Pro confondus). De plus, le tournesol est considéré comme une matière première sans risque pour les aliments sous cahier des charges non OGM.

Ainsi, le tournesol peut-il se targuer d'être une culture résolument alimentaire à l'échelle française comme européenne avec plus de 90 % de l'huile utilisée en alimentation humaine et un tourteau très apprécié par les fabricants d'aliments et les éleveurs. Le défi pour l'avenir est d'assurer la compétitivité de sa production dans nos systèmes de cultures en amont, en améliorant ses performances, et en aval en cherchant à mieux valoriser l'ensemble de ses fractions.

Contact : f.labalette@terresunivia.fr



Source : Terres Univia



La recherche sur le tournesol à Toulouse : historique et résultats d'un dispositif collaboratif unique

Le tournesol est une culture qui présente de nombreux atouts agronomiques, technologiques et environnementaux. Les progrès génétiques qui ont permis d'améliorer cette espèce pour de nombreux caractères agronomiques sont aujourd'hui encore insuffisamment valorisés en production et ne lui permettent pas d'exprimer son potentiel. En 2004-2005, afin de maintenir une recherche active sur cette espèce, et sous l'impulsion de la filière oléagineuse et des chercheurs, l'Inra a concentré son dispositif de recherche sur le tournesol sur le centre de Toulouse, autour du programme d'actions « Tournesol 2010 ». La présence dans la région toulousaine des principales entreprises semencières (regroupées dans l'association Promosol) et l'activité de recherche menée localement en agronomie et écophysiologie par l'UMR AGIR* ont été deux éléments favorables qui ont pesé dans cette décision.



« Tournesol 2010 » recouvre 10 objectifs prioritaires, regroupant à la fois des projets de recherche *sensu stricto* et le développement de nouveaux outils (génétique, génomique, modélisation, bio-informatique) utiles pour une recherche de haut niveau sur le tournesol. L'ensemble de ce programme est interdisciplinaire puisqu'il fait appel à des compétences en génétique, en agronomie, en écophysiologie, en phytopathologie, en modélisation et en bio-informatique.

Pour mener à bien ce projet, l'équipe « Génétique et Génomique du Tournesol » du LIPM* a été constituée fin 2006 sous la direction de Patrick Vincourt. L'équipe, qui a bénéficié de nouveaux locaux en 2012 grâce aux financements conjoints Inra-collectivités territoriales dans le cadre du CPER 2007-2013, est maintenant pilotée par Nicolas Langlade et Stéphane Muñoz. Son objectif est d'apporter les connaissances, les outils et ressources génétiques (espèces d'*Helianthus annuus* cultivé et apparentées sauvages) et en génomique pour accroître la compétitivité de la filière tournesol en France et en Europe. Ses programmes de recherche visent à élucider certains mécanismes génétiques et moléculaires afin d'adapter la culture aux contraintes biotiques et abiotiques de son environnement, plus particulièrement aujourd'hui le stress hydrique et la résistance à la plante parasite *Orobanche cumana*.

Marquant une continuité dans le partenariat depuis plus de 30 ans, Terres Inovia (anciennement Cetiom) a également contribué au dynamisme de ce programme en affectant à Auzeville deux ingénieurs chargés d'études avec pour mission de construire un projet d'UMT*, nouveau dispositif de recherche partenariale plus finalisée proposé par le MAAF* sous la direction de la DGER*. L'UMT* Tournesol, centrée sur l'amélioration de la production d'huile de tournesol par une approche agronomique, a été labellisée en 2006 pour une période de 5 ans puis a été renouvelée avec un partenariat élargi en 2011. Portée par Terres Inovia, elle associe aujourd'hui l'Inra (l'UMR AGIR* et l'équipe Génétique et Génomique du Tournesol du LIPM*), l'INP-ENSAT*, l'INP-PURPAN et le CESBIO* sur un programme mobilisant notamment la télédétection satellitaire pour la prévision de collecte.

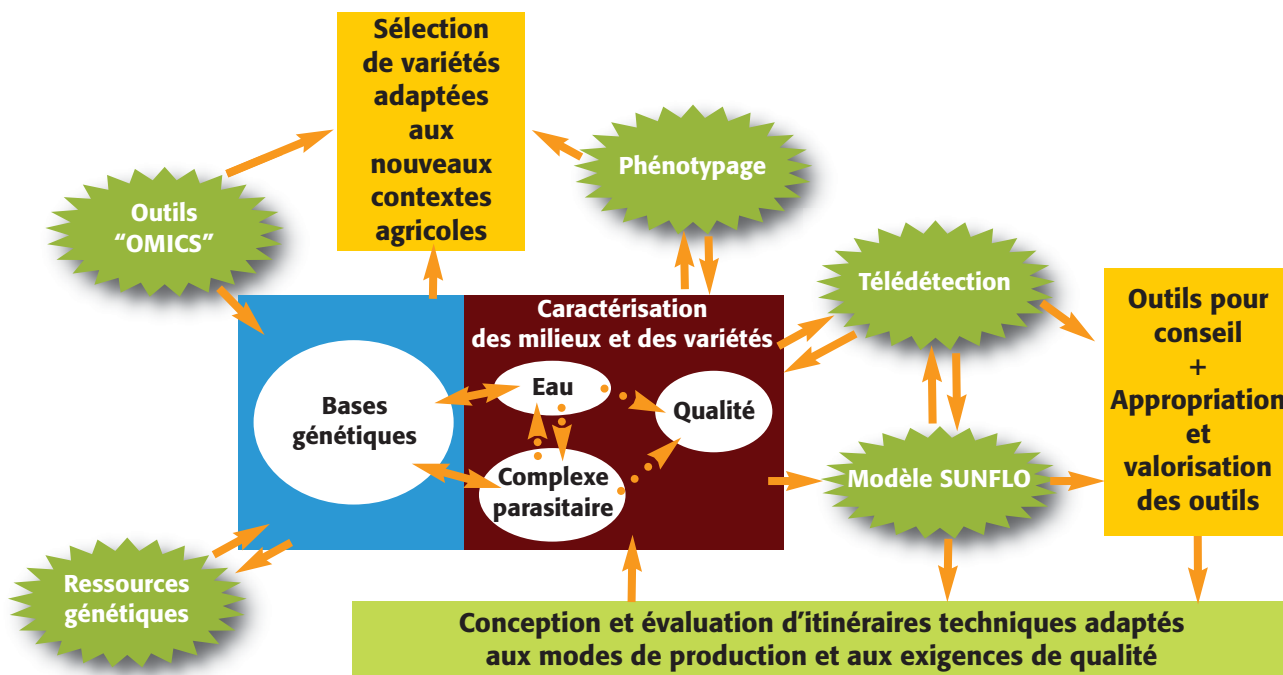
A l'Inra, plus de 20 chercheurs, enseignants-chercheurs et techniciens travaillent sur le tournesol sur le centre de Toulouse. L'UMT Tournesol mobilise quant à elle l'équivalent d'environ 8 personnes à plein temps chaque année, tous partenaires confondus.

Les activités de ce pôle de recherche se structurent autour de trois grands volets : (i) l'acquisition de connaissances sur les relations entre le tournesol et l'eau, le tournesol et son complexe parasitaire et l'élaboration de la qualité, (ii) en mobilisant différentes approches ou outils : modélisation, télédétection, phénotypage, génomique et développement de ressources génétiques pour (iii) déboucher sur des résultats opérationnels pour les sélectionneurs et pour les acteurs du conseil.

La multidisciplinarité et la mutualisation des moyens sont deux forces de ce dispositif. En effet, le travail mené sur le pôle toulousain (entre l'UMT* et le LIPM*) est pluri- et même interdisciplinaire : agronomie, écophysiologie, pathologie, génétique, génomique, mathématiques appliquées, technologie, économie... De même, les moyens de recherche sont mutualisés entre les partenaires : modèles, expérimentations au champ, réseaux de parcelles, bases de données, serre, chambre de culture et plateforme de phénotypage, laboratoires...

Ce partenariat étroit et l'ensemble de son activité concrétisent la poursuite des relations historiques entre la recherche et la filière tournesol, avec une recherche finalisée répondant aux enjeux sociétaux et tournée vers les acteurs du terrain (sélectionneurs, acteurs du conseil, producteurs et transformateurs).

Ce programme de recherche sur le tournesol a fait émerger de multiples collaborations avec d'autres laboratoires ou plateformes de recherche telles que le CNRGV*, la plateforme génome et transcriptome (Get-PLAGE) et la plateforme RECORD* du centre Inra de Toulouse, mais aussi avec les semenciers, les coopératives agricoles, le GEVES*, le SRAL* Midi-Pyrénées, la Chambre Régionale d'Agriculture de Midi-Pyrénées, le RMT Modélisation*, les UMT* Eau et CAPTE*...



Des collaborations internationales ont également vu le jour en agronomie avec l'Argentine, en génomique avec le Canada et les Etats-Unis, sur la résistance génétique à l'orobanche avec l'Espagne. Le tournesol fait aussi partie des sujets de recherche d'autres laboratoires toulousains tels que le Laboratoire de Chimie Agro-Industrielle de l'INP-ENSIACET*.

Les travaux de recherche sur le tournesol n'ont pu voir le jour sans une large gamme de soutiens financiers à travers notamment le Ministère de l'Agriculture, de l'Agroalimentaire et de la Forêt (de la part de la DGER pour l'UMT* Tournesol et des fonds CASDAR* pour les projets), la Région Midi-Pyrénées (investissement dans les infrastructures, soutien de thèses et de projets), l'ANR* (projets Sunyfuel, MicMac Design et Programme Investissements d'Avenir SUNRISE), les fonds FUI* et FEDER* pour le projet Oleosol, PROMOSOL, Terres Univia, Sofiprotéol, les fonds interprofessionnels du FASO* et du FRSO* gérés par Sofiprotéol et le GIS GCHP2E*. Le pôle de compétitivité Agri Sud-Ouest Innovation et le GIS Biotechnologies Vertes ont également soutenu plusieurs projets à travers leur labellisation.

Les résultats des travaux de recherche engagés sont nombreux ; ils sont valorisés à travers une large gamme de supports : des publications scientifiques, des brevets, des thèses, des prototypes d'outils d'aide à la décision, des articles dans la presse agricole... et lors des conférences internationales sur le tournesol organisées par l'ISA*. Le pôle de recherche toulousain dispose ainsi d'un rayonnement mondial.

Dans un contexte environnemental et réglementaire de plus en plus contraint (changement climatique, Ecophyto2, directive Nitrates, verdissement de la PAC, Ambition BIO 2017...), le tournesol est une espèce qui a des atouts à faire valoir mais qui doit aussi gagner en compétitivité pour maintenir sa place face à ses concurrents sur les débouchés au niveau européen et mondial. La poursuite de la recherche sur cette espèce sera un point-clé pour relever ce challenge.

2016 est donc une année anniversaire : 10 ans après les naissances de l'UMT* Tournesol et de l'équipe Génétique et Génomique du Tournesol alors que l'Inra fête ses 70 ans, c'est l'occasion de revenir sur les fruits de cette collaboration riche et étroite et de nous projeter dans le futur du tournesol à Toulouse, en France et à l'international.

Contacts : philippe.debaeke@toulouse.inra.fr
e.mestries@terresinovia.fr
nicolas.langlade@toulouse.inra.fr
stephane.munos@toulouse.inra.fr

* Voir lexique en page 29



Connaître les facteurs limitants du rendement et de la qualité pour mieux les contrôler par l'agronomie et la génétique

Le tournesol et l'eau

Dans un contexte général de changement climatique, l'agriculture doit s'adapter aux nouvelles contraintes environnementales et notamment à la raréfaction de l'eau. Le tournesol, espèce peu exigeante en eau, dont 80 % de la production mondiale est assurée en Europe, dispose de réels atouts pour faciliter l'adaptation de la filière végétale à ces évolutions. Améliorer sa résistance et ses caractéristiques agronomiques en conditions de sécheresse représente donc aujourd'hui un enjeu environnemental et économique majeur. On estime en effet aujourd'hui qu'un jour de sécheresse engendre une perte économique pour les agriculteurs de 60 M € par an au niveau de la région Midi-Pyrénées.

Les stratégies d'adaptation à la sécheresse

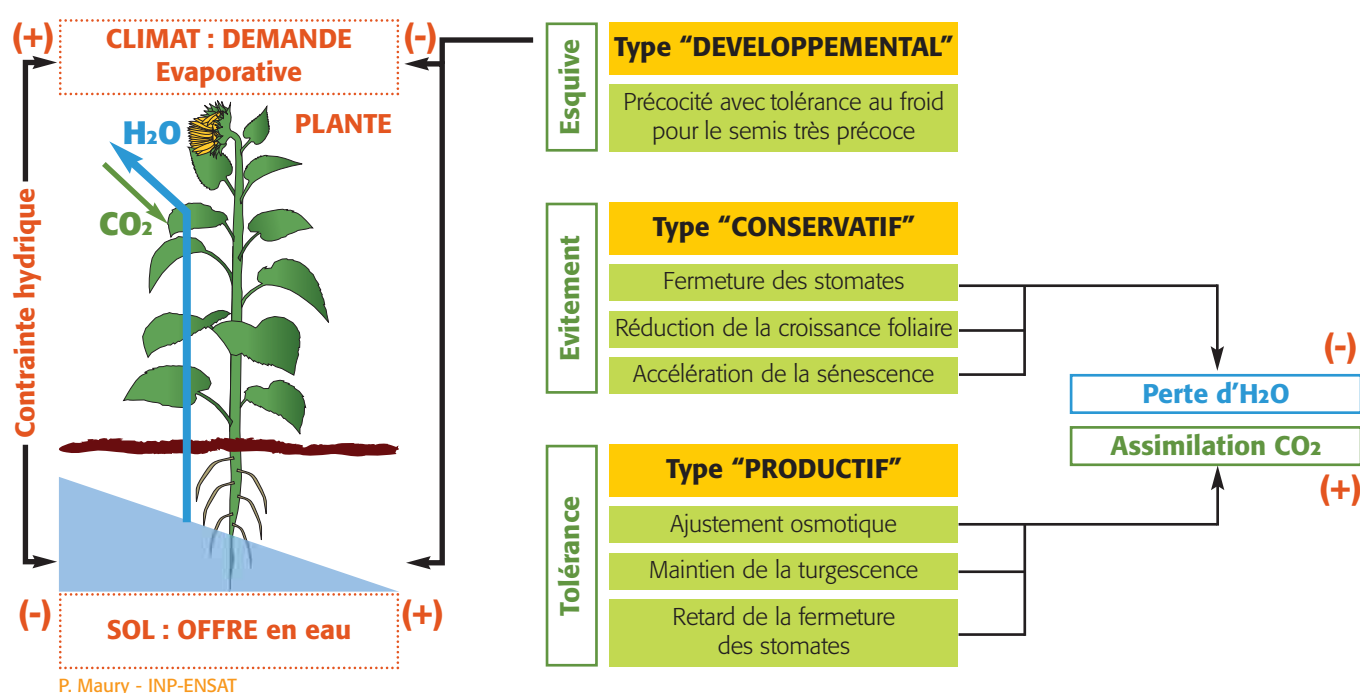
Le tournesol peut s'adapter à la sécheresse avec trois grands types de stratégies : l'esquive, l'évitement et la tolérance à la déshydratation.

Pour la stratégie d'esquive, un semis plus précoce ou l'utilisation de variétés précoces permettent d'esquiver les déficits hydriques prévisibles en fin de cycle.

Pour éviter de se déshydrater, la plante peut réduire ses pertes en eau, par exemple en réduisant sa transpiration ou en modifiant son enracinement. Cependant, dans ce cas, le carbone nécessaire à la photosynthèse est aussi limité, ce qui peut affecter la performance de la culture.

Enfin, la tolérance de la plante au déficit hydrique interne repose sur différents processus physiologiques comme l'ajustement osmotique permettant de maintenir la turgescence cellulaire et la photosynthèse lors d'une diminution de la teneur en eau de la feuille. Globalement, ces stratégies conduisent à distinguer deux types de fonctionnement variétaux, « productif - maintenir l'assimilation du CO_2 » et « conservatif - limiter la perte d'eau », dont les performances agronomiques dépendent de la conduite culturale, de l'offre en eau du sol et du scénario climatique.

Contact : maury@ensat.fr





Des indicateurs de stratégies d'adaptation au déficit hydrique

Afin de mieux appréhender en routine sur de larges populations de génotypes de tournesol les processus impliqués dans les différentes stratégies d'adaptation au déficit hydrique, il est nécessaire de développer des indicateurs, dont la mesure est « simple et rapide », révélant un fonctionnement biologique particulier d'adaptation du génotype au déficit hydrique. Ces indicateurs, de différentes natures (morphologiques, fonctionnels...), peuvent relever de différents niveaux d'organisation (organe, plante, peuplement) et intégrer les processus sur différents pas de temps (instantané jusqu' à l'ensemble du cycle cultural). Différents indicateurs fonctionnels ont été utilisés chez le tournesol pour apprécier la variabilité génétique des réponses physiologiques au déficit hydrique, comme par exemple :

- le taux de transpiration instantanée à l'échelle de la feuille comme indicateur du fonctionnement hydrique de la plante ;
- l'ajustement osmotique (échelle organe – intégration sur quelques jours) qui permet de révéler des modifications de concentration en solutés intracellulaires pour apprécier la tolérance à la déshydratation ;
- les variables photochimiques (échelle organe – intégration sur quelques jours) comme indicateur du fonctionnement photosynthétique ;
- la discrimination isotopique du carbone (échelle organe/plante – intégration sur quelques jours à quelques semaines) comme indicateur de l'efficacité d'utilisation de l'eau par la plante.

Des travaux récents montrent que la discrimination isotopique du carbone (CID) apparaît physiologiquement et génétiquement associée à l'efficacité d'utilisation de l'eau (WUE) chez le tournesol. Ces deux variables sont i) étroitement corrélées même si cette relation apparaît dépendante du scénario de déficit hydrique et de l'échelle fonctionnelle (feuille – plante), et ii) relèvent d'un contrôle génétique associant des loci génétiques (QTLs) communs. Cependant, le CID présente une héritabilité plus élevée que WUE, un contrôle génétique plus indépendant du scénario de déficit hydrique (QTLs stables vs. QTLs spécifiques au scénario climatique pour WUE) ; l'identification de QTLs majeurs pour le CID permet d'envisager une sélection assistée par marqueurs pour améliorer l'efficacité d'utilisation de l'eau chez le tournesol.

Contact : maury@ensat.fr

Pour en savoir plus...

Adiredjo A. L., Navaud O., Lamaze T. and Grieu P., 2014. Leaf carbon isotope discrimination as an accurate indicator of water-use efficiency in sunflower genotypes subjected to five stable soil water contents. *Journal of Agronomy and Crop Science* **200** : 416–424. doi: 10.1111/jac.12079.

Adiredjo A.L., Navaud O., Muños S., Langlade N.B., Lamaze T., Grieu P., 2014. Genetic control of water use efficiency and leaf carbon isotope discrimination in sunflower (*Helianthus annuus* L.) subjected to two drought scenarios. *PLoS ONE* **9(7)** : e101218. doi:10.1371/journal.pone.0101218.

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.

SUNRISE : un Programme Investissement d'Avenir sur l'adaptation du tournesol au changement climatique

Le projet SUNRISE « *SUNflower Resources to Improve yield Stability in a changing Environment* » est un programme d'Investissement d'Avenir Biotechnologies et Bioressources bénéficiant d'un budget de 21M € sur 8 ans (2012-2020), dont 7M € sont financés par l'Agence Nationale de la Recherche.

L'objectif des 16 partenaires est de développer de nouvelles variétés de tournesol mieux adaptées à des événements de sécheresse plus fréquents et plus intenses. Les chercheurs visent ainsi à caractériser les ressources génétiques les mieux adaptées à la sécheresse, à identifier les mécanismes moléculaires et les caractéristiques agronomiques des croisements développés et à prédire les impacts socio-économiques des futures variétés.

Pour répondre à ces objectifs, le projet s'appuie sur une approche innovante et multi-disciplinaire construite autour de 3 axes scientifiques :

- caractériser le génome du tournesol afin de pouvoir identifier les gènes d'intérêt et comprendre les mécanismes moléculaires qui permettent à la plante de résister à la sécheresse ;
- modéliser les caractéristiques agronomiques des futures variétés pour prédire leur comportement dans différents scénarios climatiques ;
- évaluer les impacts socio-économiques associés à la diffusion des innovations SUNRISE pour la sélection des hybrides de tournesol.

Deux outils novateurs ont déjà pu être développés dans le cadre du projet SUNRISE : la plateforme de phénotypage Heliaphen (voir page 9) et deux puces Axiom®, outils de génotypage à haut débit permettant de déterminer les variations génétiques de l'ensemble des gènes du tournesol.

Contacts : nicolas.langlade@toulouse.inra.fr

Anne-Sophie.Lubrano-Lavadera@toulouse.inra.fr



Les partenaires SUNRISE

Le projet regroupe 9 laboratoires de recherche publics (LIPM, AGIR, MIAT, CNRGV et LEREPS de Toulouse, EPGV et GQE de Versailles Grignon, BFP de Bordeaux, LBD de l'UPMC), 1 institut technique (Terres Inovia), 5 entreprises semencières (Caussade Semences, Maisadour Semences, RAGT 2n, Soltis, Syn-genta France), et 1 entreprise en biotechnologie (Biogemma).



Coordinateur du projet SUNRISE :
Nicolas LANGLADE (LIPM, Inra Toulouse)
SUNRISE en ligne :
Internet : www.sunrise-project.fr/
Twitter : @SUNRISE_France



Réunion annuelle SUNRISE - décembre 2015.

Des progrès dans la connaissance des gènes de tolérance à la sécheresse

Des gènes conférant potentiellement une tolérance à la sécheresse ont été identifiés dans le cadre du projet SUNRISE grâce à l'exploitation de résultats provenant de projets précédents (Sunyfuel et Oleosol). Un effet sur les caractéristiques phénotypiques des plantes possédant ces gènes a également pu être observé en conditions expérimentales sur la plateforme Heliaphen (voir page 9). Les chercheurs continuent leur travaux pour valider et préciser ces observations.

Si ce résultat est validé, les avancées associées permettraient de diminuer significativement les pertes de rendement dues à la sécheresse.

Une publication est en cours de rédaction sur ce sujet.

Contact : nicolas.langlade@toulouse.inra.fr





Le génome du tournesol décrypté : un résultat majeur du projet SUNRISE

Le séquençage du génome de référence du tournesol a été réalisé par des scientifiques de l'Inra¹, dans le cadre du projet Investissements d'Avenir SUNRISE et en collaboration avec le Consortium international de génomique du tournesol². Ce résultat majeur permettra d'accélérer l'efficacité des programmes de sélection variétale du tournesol, qui possède un fort potentiel d'amélioration et des atouts environnementaux démontrés pour les systèmes agricoles de demain. Il contribuera également à fournir aux agriculteurs de nouvelles variétés mieux adaptées aux modes de production, aux usages alimentaires et industriels et répondant aux enjeux économiques de la filière.

Une première mondiale

Des scientifiques de l'Inra¹ ont produit la séquence du génome de la lignée de tournesol XRQ, parent d'une variété cultivée, développée par l'Inra. Pour la première fois, l'ADN du tournesol a été décrypté complètement. C'est-à-dire que l'ensemble de ses gènes (son génome) a été décodé, assemblé et ordonné. La séquence du génome du tournesol a été mise à disposition des programmes de sélection des partenaires du projet SUNRISE et de la communauté académique en avant-première à l'occasion des Journées d'échanges Tournesol organisées les 28 et 29 juin 2016 à Toulouse.

Le résultat d'une stratégie innovante

Pour obtenir ce résultat, la principale difficulté a été d'assembler, comme les pièces d'un puzzle, les gènes dans le bon ordre. Ce puzzle géant, 20 % plus grand que le génome humain, est d'autant plus difficile à construire que le génome du tournesol est constitué de très nombreuses pièces qui se ressemblent. Plus de 80 % du génome du tournesol est constitué de parties quasi identiques que les programmes informatiques ont beaucoup de difficultés à différencier. Grâce à une stratégie innovante utilisant le robot de séquençage de dernière génération PacBio RS II³, les scientifiques ont obtenu une séquence de référence de qualité. En effet, le séquenceur PacBio RS II est capable de lire des fragments d'ADN 100 fois plus longs que les générations précédentes de robots. Les fragments sont ensuite plus facilement assemblés dans le bon ordre. Cette nouvelle technologie est désormais appliquée au séquençage des génomes d'autres plantes cultivées ou de plantes parasites, comme l'*Orobanche cumana*, une plante parasite du tournesol.

Une ressource unique pour l'amélioration variétale du tournesol

Le tournesol est une espèce de grande culture, dont 80 % de la production est assurée en Europe, et qui possède un fort potentiel d'amélioration génétique. La cartographie précise de l'ensemble des gènes du tournesol ouvre de nouvelles potentialités pour l'identification de gènes d'intérêt agronomique ou intervenant dans les débouchés industriels ou alimentaires. Ce résultat permettra d'accélérer l'efficacité des programmes nationaux et internationaux de sélection sur le tournesol et la mise sur le marché de variétés améliorées pour leur adaptation aux différents contextes pédoclimatiques et aux différentes pratiques agricoles. Ce décryptage sera en particulier utilisé, dans le cadre du projet SUNRISE, pour identifier des gènes de tolérance à la sécheresse, en réponse au changement climatique.

Contacts : nicolas.langlade@toulouse.inra.fr,
Anne-Sophie.Lubrano-Lavadera@toulouse.inra.fr

¹ Sont impliqués dans ces travaux, des scientifiques de l'Inra de Toulouse Midi-Pyrénées du Laboratoire des Interactions Plantes-Microorganismes (LIPM, Inra-CNRS), du Centre National de Ressources Génomiques Végétales (CNRGV, Inra) et de la plateforme génomique GeT-PlaGe de l'Inra.

² Ce Consortium est coordonné par l'Université de Colombie-Britannique au Canada et l'Inra.

³ Impulsée par plusieurs équipes de recherche du centre Inra de Toulouse Midi-Pyrénées¹ dans le cadre du projet SUNRISE, soutenue par la Région Languedoc-Roussillon-Midi-Pyrénées et les partenaires industriels Sofiprotéol et Libragen, la plateforme de génomique GeT-PlaGe de la Génopole de Toulouse a acquis le séquenceur PacBio RS II en 2015.



La plateforme de phénotypage Heliaphen

Heliaphen est une plateforme de phénotypage entièrement conçue pour le tournesol et opérationnelle depuis juin 2013 sur le site de l'Inra de Toulouse. Elle a été développée dans le cadre du projet Oleosol (financement Région Midi-Pyrénées, FUI et FEDER) et avec le soutien du projet SUNRISE.

La plateforme Heliaphen permet – grâce à un prototype unique de robot développé par la société spécialiste de l'automatisation Optimalog – d'expérimenter simultanément et de façon automatique 1 300 plantes de tournesol. Elle est composée d'une dalle robotisée d'environ 660 m², d'un local technique pour le robot de 24 m² et d'une aire de préparation des plantes de 250 m². La dalle robotisée est pourvue d'un système d'irrigation, ceinte d'un brise-vent et d'une protection contre les oiseaux. Les plantes sont cultivées en pots de 15 litres. Le robot vient peser, irriguer et photographier chaque plante quotidiennement. Il permet de contrôler les irrigations de façon individualisée et constitue donc un outil essentiel pour étudier la réponse des plantes à la sécheresse, cible majeure d'amélioration végétale. Les informations phénotypiques mesurées par le robot sont la transpiration, la morphologie (tige, feuilles, capitule) et la sénescence des feuilles. La plateforme permet d'étudier ces caractères depuis la levée des plantules jusqu'à la maturité complète des graines en fin de développement de la plante.

La plateforme Heliaphen est déjà utilisée pour réaliser des essais mis en place dans le cadre du projet SUNRISE et d'autres projets menés en partenariat par Terres Inovia et l'Inra. Le contrôle de l'environnement et l'automatisation des mesures constituent un apport unique et très prometteur dans la découverte et la validation des gènes permettant l'amélioration de la tolérance à la sécheresse pour le tournesol.

Contact : nicolas.langlade@toulouse.inra.fr



SUNRISE Project



SUNRISE Project

Un biomarqueur pour évaluer le statut hydrique du tournesol

Pour parvenir à étudier les mécanismes de tolérance à la sécheresse du tournesol, des outils performants d'évaluation du niveau de stress hydrique subi par le tournesol sont nécessaires. Ceci est d'autant plus important que les mesures environnementales et physiologiques actuellement utilisées ne sont pas totalement adaptées aux études de génétique qui font appel à des populations d'effectif important.

Des travaux précédemment conduits au sein du LIPM avaient déjà montré une variation du niveau d'expression de certains gènes en réponse à une contrainte hydrique. Les nouvelles recherches, menées dans le cadre du projet SUNRISE, explorent particulièrement ceux de ces gènes qui expriment une réponse analogue quelle que soit la variété. Cette réponse reflétant le stress subi par la plante, sa mesure peut servir à la construction d'un nouveau type de marqueur : un biomarqueur, indicateur des changements métaboliques ou chimiques de la plante en lien avec l'état de son environnement.

Le développement d'un outil de ce type apparaît donc comme une solution prometteuse pour l'évaluation de la contrainte hydrique. Les travaux menés dans le cadre du projet Oleosol ont permis l'élaboration d'un biomarqueur s'appuyant sur le niveau d'expression de trois gènes. Ce nouvel outil permettra de constituer une valeur de référence dans les études visant à évaluer la variabilité des réponses génétiques à la sécheresse pour les variétés existantes de tournesol. Depuis, le projet SUNRISE l'exploite et continue son amélioration.

Contact : nicolas.langlade@toulouse.inra.fr



LIPM - Inra

Pour en savoir plus...

Rengel D., Arribat S., Maury P., Martin- Magniette M.L., Hourlier T., Laporte M., Varès D., Carrère S., Grieu P., Balzergue S., Gouzy J., Vincourt P., Langlade N.B., 2012. A gene-phenotype network based on genetic variability for drought responses reveals key physiological processes in controlled and natural environments. *PLoS ONE* **7**(10) : e45249. doi : 10.1371/journal.pone.0045249.

Marchand G., Mayjonade B., Varès D., Blanchet N., Boniface M.C., Maury P., Andrianasolo F.N., Burger P., Debaeke P., Casadebaig P., Vincourt P., Langlade N.B., 2013. A biomarker based on gene expression indicates plant water status in controlled and natural environments. *Plant Cell Environ.* **36**(12) : 2175-89.

Mieux mesurer l'indice foliaire

L'indice foliaire (ou Leaf Area Index) représente la surface cumulée de feuilles vertes par unité de surface de sol occupé par la culture. Cette variable importante pour le tournesol rend compte des conditions dans lesquelles la culture a poussé et permet de mesurer la persistance des feuilles photosynthétiquement actives en fin de cycle, critère souvent lié à la performance quantitative et qualitative sous contrainte hydrique. Elle est mobilisée pour réaliser des diagnostics en cours ou en fin de campagne, ainsi que dans le cadre de règles de décision (par exemple pour l'irrigation). C'est actuellement l'une des variables les plus directement accessibles par les techniques de télédétection à distance (capteurs multispectraux sur drones et satellites). La mise au point de ces techniques nécessite néanmoins toujours de réaliser des estimations d'indice foliaire au sol pour les paramétrer.

Historiquement, la méthode d'estimation de l'indice foliaire la plus utilisée est la méthode planimétrique (prélèvement des feuilles et utilisation d'un planimètre optique au laboratoire) ou une méthode dérivée non destructive, dite allométrique, qui consiste à mesurer la longueur et la largeur des limbes des feuilles et à appliquer un modèle multiplicatif simple pour estimer leur surface (longueur x largeur x constante). Ces méthodes de référence sont très coûteuses en temps et ne peuvent donc être que difficilement mises en œuvre sur beaucoup de parcelles et sur des zones de surface supérieures à 1 ou 2 m².

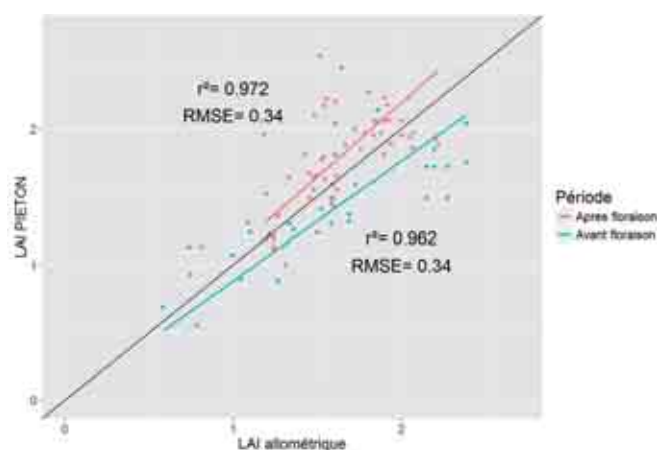
Différentes méthodes de mesure indirectes, au sol, qui permettraient de pallier ces inconvénients tout en gardant une précision suffisante, ont été testées sur des dispositifs expérimentaux conduits dans le cadre d'un partenariat entre l'Inra, le CESBIO et Terres Inovia (2013 à 2016). Il s'agit de mesures par capteurs optiques : LAI-2000 (LI-COR Biosciences), photographies hémisphériques analysées à l'aide du logiciel CAN-EYE (Inra) et un nouvel outil, le PIETON (Inra – Arvalis – Terres Inovia). L'évaluation de ces méthodes indirectes est complexe car les capteurs sont très dépendants des conditions de mesure (ensoleillement). Pour l'heure, l'outil le plus prometteur est PIETON (présenté page 25) : il présente les meilleures concordances avec les mesures par allométrie, sa mise en œuvre est simple et rapide que ce soit pour des mesures statiques ou dynamiques (sur des surfaces de plusieurs dizaines de m²), et les données recueillies ne nécessitent que peu de post-traitement.

Pour en savoir plus...

Debaeke P., Dejoux J., Demarez V., Mas O., Champolivier L., 2014. Assessment of leaf area index in sunflower crop using non-destructive methods. *Proc. 13th ESA Congress*, 25-29 August 2014, Debrecen (Hungary).

Contact : celine.colombet@toulouse.inra.fr

Comparaison des données PIETON avec les données allométriques



Le tournesol et son complexe parasitaire

Dans le contexte du plan Ecophyto, le tournesol a une place de choix à prendre dans de nombreux systèmes de cultures en raison de son faible indice de fréquence de traitement (IFT) et de son cycle printanier qui permet de rompre les successions de cultures d'hiver. Or, le complexe parasitaire du tournesol, varié et évolutif, prend une part non-négligeable dans les écarts entre les performances de la culture chez les producteurs et le potentiel de celle-ci mesuré en expérimentation. Il fait donc l'objet d'une attention toute particulière au sein de l'UMT Tournesol car sa maîtrise est un point-clé de la stabilisation de la production. Les travaux sont axés sur l'acquisition de connaissances de base sur les maladies : épidémiologie, déterminisme génétique de la résistance du tournesol, impact de la conduite de culture sur leur expression...

Depuis peu, l'orobanche, plante parasite du tournesol, fait aussi partie des bio-agresseurs étudiés sur le pôle toulousain avec l'équipe tournesol du LIPM. Au-delà de ces actions ciblées, l'originalité des travaux engagés réside dans la prise en compte du complexe parasitaire dans sa globalité (et non bio-agresseur par bio-agresseur), à travers la modélisation. Celle-ci permettra de proposer aux sélectionneurs, aux chercheurs et aux ingénieurs et techniciens de développement des outils d'aide à la conception d'idéotypes variétaux adaptés et à la construction de stratégies de production agro-écologique de la culture.

Un impact significatif de la conduite de culture sur les maladies

L'apparition (l'incidence) et le développement (la sévérité) d'une maladie sont le résultat des interactions entre l'agent pathogène, sa plante-hôte et leur environnement : le sol, le climat et la conduite de culture. Pour éviter (ou tout au moins limiter) les dégâts (symptômes) et les dommages (pertes de rendement et de qualité de la récolte) sur la culture, il est possible d'intervenir à trois niveaux du cycle des maladies : (i) éviter l'apparition du risque en limitant le réservoir d'inoculum, (ii) empêcher le risque de se réaliser et (iii) limiter l'apparition des dégâts et dommages. La conduite de culture peut jouer à chacune de ces étapes et contribuer ainsi, en association avec le choix variétal, la lutte biologique voire la lutte chimique (en dernier recours), à maîtriser efficacement et durablement les principales maladies du tournesol.

Les travaux conduits dans le cadre de l'UMT Tournesol ont porté sur deux maladies principales du tournesol : le phomopsis (*Diaporthe helianthi*) et le phoma (*Leptopshaeria lindquistii*). Ils ont mobilisé les équipes de l'Inra et de Terres Inovia de 2007 à 2012 sur des expérimentations en champ, en serre et des parcelles agricoles. Au cours de deux campagnes favorables au phoma sur tige, le réservoir d'inoculum a été évalué à 60000 fructifications du champignon en moyenne par m² de surface au sol en parcelles agricoles.

C'est la première fois que l'inoculum primaire de phoma a été ainsi quantifié. Les techniques de travail du sol sans labour (non labour superficiel entre 5 et 15 cm de profondeur ou très superficiel à moins de 5 cm de profondeur) ne semblent pas réduire le potentiel d'inoculum pour l'année suivante par rapport au semis direct.

Le conseil de broyage et d'enfouissement des résidus porté par Terres Inovia est donc conforté. Les pratiques culturales liées au semis (date et densité de semis) et à l'alimentation de la culture (fertilisation azotée et régime hydrique) ainsi que leurs interactions ont elles aussi une forte influence sur l'apparition et le développement des deux maladies, mais peuvent jouer différemment : le microclimat résultant du niveau de développement du couvert de tournesol (effet marqué de la densité de peuplement) joue ainsi beaucoup plus sur l'installation du phomopsis que sur celle du phoma alors que l'état de nutrition azotée des plantes semble plus déterminant dans la progression des symptômes de phoma sur tige et collet que sur le développement du phomopsis.

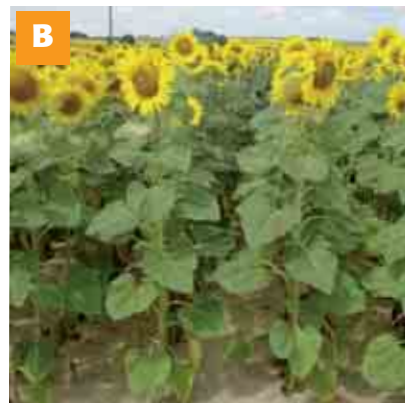
Enfin, les conditions d'apparition de l'antagonisme entre phomopsis et phoma ont été précisées, le phoma s'installant au niveau de l'insertion pétiolaire pouvant bloquer le passage du phomopsis sur la tige. Ces connaissances sont actuellement intégrées au sein de modèles de simulation de l'interaction culture - maladies, qui permettront à terme de développer des outils d'aide à la décision pour les acteurs du conseil agricole.

Contacts : philippe.debaeke@toulouse.inra.fr
e.mestries@terresinovia.fr

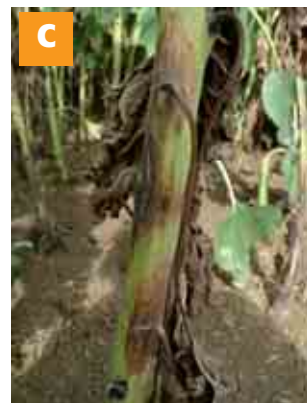
La conduite de culture a un fort impact sur le développement du couvert du tournesol (A, B). Phomopsis et phoma peuvent être en compétition sur la tige (C).



Philippe Debaeke, UMR AGIR, Inra



Philippe Debaeke, UMR AGIR, Inra



E. Mestries - Terres Inovia

Pour en savoir plus...

Desanlis M., Aubertot J.N., Mestries E., Debaeke P., 2013. Analysis of the influence of a sunflower canopy on *Phomopsis helianthi* epidemics as a function of cropping practices. *Field Crops Research* **149** : 63-75.

Mestries E., Seassau C., Debaeke P., Dechamp-Guillaume G., 2010. Phoma du tournesol et dessèchement précoce : un lien maintenant établi. *Perspectives Agricoles* **372** : 62-65.

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.

Mestries E., Desanlis M., Aubertot J.N., Debaeke P., 2015. Une approche intégrée pour prendre en compte les effets de la variété, de la conduite et de l'environnement sur l'incidence et la sévérité des maladies de fin de cycle du tournesol. *Innovations Agronomiques* **46** : 75- 93.

Mestries E., Baillet A., 2016. Protection fongicide tournesol – Est de la France : une rentabilité pas systématique. *Perspectives Agricoles* **432** : 18-20.

Le syndrome de dessèchement précoce mieux caractérisé

Le dessèchement précoce du tournesol est la forme la plus nuisible du phoma. Les équipes de recherche nord-américaines ont été les premières à évoquer un ensemble de causes probables pour expliquer ce syndrome : la présence d'un cortège d'agents pathogènes dont le phoma, des effets du sol et du climat, et une influence de la conduite de culture (fertilisation azotée notamment). Les travaux de recherche menés à Toulouse mobilisant des expérimentations au champ et en serre ont permis de confirmer le rôle majeur du phoma dans ce syndrome et de définir les critères permettant de le diagnostiquer plus précisément : présence d'une nécrose en bas de tige, flétrissement brutal du feuillage et sénescence accélérée 15 jours à 1 mois avant la maturité physiologique accompagnée d'une dégradation du système racinaire. Les effets de la conduite de culture ont été quantifiés : une relation exprimant le pourcentage de pieds secs dans une parcelle en fonction de l'indice de nutrition azotée de la culture et de la satisfaction de son besoin en eau a ainsi été construite. Cette relation illustre l'importance de l'ajustement de la fertilisation azotée et du maintien d'une alimentation hydrique satisfaisante pendant la phase de post-floraison sur la date d'apparition et la sévérité de ce syndrome. Le choix variétal et la densité de peuplement sont deux autres éléments déterminants de la conduite. Du point de vue physiologique, le dessèchement précoce du tournesol pourrait s'expliquer par un effet trophique où l'azote présent dans les tissus de la plante favoriserait la croissance du champignon, pouvant conduire à un phénomène d'embolie en cas de contrainte hydrique forte après la floraison ; le champignon a en effet été observé par microscopie à l'intérieur des vaisseaux conducteurs au niveau du collet des plantes atteintes.

Contact : celia.seassau@purpan.fr

E. Mestries - Terres Inovia



E. Mestries - Terres Inovia



E. Mestries - Terres Inovia



C. Seassau - INP PURPAN



Dessèchement précoce du tournesol dû au phoma sur une large zone d'une parcelle agricole (A). La taille des capitules (B) et le système racinaire (C) sont affectés par ce champignon vasculaire (D).

Pour en savoir plus...

Bordat A., Debaeke P., Dechamp-Guillaume G., Mestries E., Seassau C., Vincourt P., 2011. *Phoma et dessèchement précoce du tournesol*. Les Points Techniques du CETIOM, CETIOM Ed., 86 p.

Seassau C., Dechamp-Guillaume G., Mestries E., Debaeke P., 2010. Nitrogen and water management can limit premature ripening of sunflower induced by *Phoma macdonaldii*. *Field Crops Research* **115** : 99-106.

Seassau C., Dechamp-Guillaume G., Mestries E., Debaeke P., 2012. Low plant density can reduce premature ripening caused by *Phoma macdonaldii*. *Europ. J. Agronomy* **43** : 185-193.

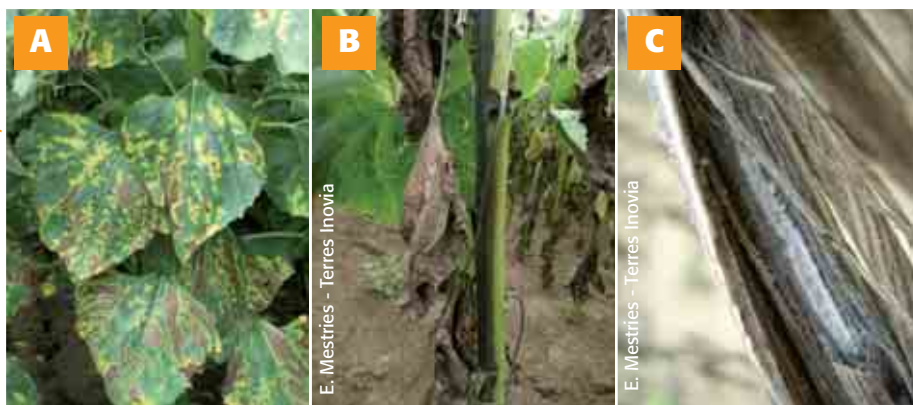
Le verticillium : un agent pathogène nouvellement travaillé

Le verticillium du tournesol (*Verticillium dahliae*) est une maladie d'origine tellurique observée depuis longtemps en France. Depuis 2010, les dommages occasionnés sur la culture deviennent significatifs. Présente dans les principales zones de production, elle touche plus particulièrement le Sud-Ouest. L'enquête sanitaire réalisée en 2015 par Terres Inovia et le SRAL Midi-Pyrénées en régions Midi-Pyrénées et Aquitaine pour le Bulletin de Santé du Végétal a révélé que 35 % des parcelles visitées étaient touchées, avec un pourcentage moyen de plantes atteintes de 20 %. La lutte contre cette maladie repose aujourd'hui exclusivement sur le choix variétal.

Depuis deux ans, des travaux ont été engagés dans le cadre du projet CRUCIAL porté par l'INP PURPAN. L'objectif est d'évaluer les potentialités de la biofumigation pour la réduction du réservoir d'inoculum de ce champignon dans le sol et des risques d'attaque du tournesol. L'implantation d'un couvert végétal composé de crucifères avant le tournesol pourrait agir en ce sens. Le broyage et l'enfouissement du couvert entraînent la libération de molécules phytotoxiques parmi lesquelles des métabolites secondaires, les isothiocyanates, issus de la dégradation des glucosinolates. Le profil et la teneur de ces métabolites diffèrent selon les espèces et les variétés de crucifères, impliquant une stratégie sur le choix variétal du couvert. La navette, le radis fourrager et la moutarde brune ont ainsi montré des potentialités intéressantes en laboratoire en réduisant significativement la croissance du mycélium du champignon et la germination de ses microscélérotes. Les travaux se poursuivent pour évaluer la capacité de survie du champignon après biofumigation et l'efficacité de cette méthode en serre et au champ. En parallèle, un projet piloté par Terres Inovia en partenariat avec le GEVES et six semenciers vise à évaluer la nuisibilité de la maladie et à mettre au point un protocole d'évaluation des variétés au champ pour les sélectionneurs et pour l'inscription des variétés au Catalogue français. Ces travaux bénéficient d'un soutien financier du CASDAR.

Contact : celia.seassau@purpan.fr

F. Bardy - Terres Inovia



E. Mestries - Terres Inovia

E. Mestries - Terres Inovia



C. Seassau - INP PURPAN

Symptômes de *Verticillium dahliae* sur feuille (A) et tige (B, C) de tournesol. Evaluation de l'effet de la décomposition de la moutarde brune sur le développement du mycélium et la production de microscélérotes du champignon (D).

Pour en savoir plus...

Mestries E., 2013. Tournesol : lutter contre le verticillium grâce aux variétés. *Perspectives Agricoles* 406 : 24-28.

Seassau C., Desserre D., Desplanques J., Mestries E., Dechamp-Guillaume G., Alletto L., 2016. Control of *Verticillium dahliae* causing sunflower wilt using Brassica cover crops. *Proc. 19th International Sunflower Conference*, Edirne (Turkey), 29th May – 3 June 2016.

Les relations entre le tournesol et le mildiou de plus en plus décryptées

Plasmopara halstedii, agent pathogène responsable du mildiou du tournesol, a montré depuis une quinzaine d'années une très grande capacité d'évolution sur notre territoire, avec l'identification de onze nouvelles races. La lutte contre cette maladie repose essentiellement sur le choix variétal, les sélectionneurs exploitant depuis longtemps et avec succès plusieurs gènes de résistance spécifique du tournesol face au mildiou. Ce type de résistance, très efficace mais fragile car rapidement contourné par l'agent pathogène, cohabite chez le tournesol avec une résistance quantitative, qui, contrôlée par plusieurs gènes à effet partiel, est considérée comme plus durable. Les travaux engagés sur le pôle toulousain portent d'une part sur les effecteurs de pathogénicité du mildiou, pour à terme identifier les gènes de virulence de l'agent pathogène et mieux comprendre les relations hôte-pathogène et d'autre part sur cette résistance quantitative. Les bases d'un protocole opérationnel en routine ont ainsi pu être posées pour valoriser ce type de résistance dès la création variétale jusqu'à l'inscription puis la post-inscription des variétés. Trois zones du génome apparaissent impliquées dans la résistance quantitative et expliquent 30 à 40 % de celle-ci. L'identification du gène responsable d'une de ces régions (appelée QRM1) est en cours. Le caractère « non-race spécifique » de cette résistance n'a pas encore pu être complètement confirmé, cependant ces résultats et le développement de nouvelles ressources génétiques pour améliorer la lutte génétique ouvrent des perspectives intéressantes en termes de gestion durable du risque mildiou.

Ces travaux ont mobilisé différents partenaires : les équipes Tournesol du LIPM et de l'Inra à Clermont-Ferrand, Terres Inovia, la SNES (Station Nationale d'Essais de Semences) et le GEVES (Groupe d'Etude et de contrôle des Variétés Et des Semences) ainsi que les semenciers. Ils ont bénéficié de soutiens financiers de PROMOSOL, de l'ANR et du CASDAR.

Contacts : laurence.godiard@toulouse.inra.fr
stephane.munos@toulouse.inra.fr
e.mestries@terresinovia.fr

Lignée sensible
de tournesol

Phénotype de
résistance dû au
QTL QRM1

LIPM - Inra



Pour en savoir plus...

Gascuel Q., Bordat A., Sallet E., Pouilly N., Carrere S., Roux F., Vincourt P., Godiard L., 2016. Effector polymorphisms of the sunflower downy mildew pathogen *Plasmopara halstedii* and their use to identify pathotypes from field isolates. *PLoS ONE* 11(2): e0148513. doi:10.1371/journal.pone.0148513.

Mestries E., Auclert B., Poisson-Bammé B., Penaud A., Grimault V., Perrot S., Robert A., Roche S., Serre F., Tourvieille de Labrouhe D., Vear F., Boniface M.C., Bordat A., Pouilly N., Vincourt P., Muños S., 2016. Mesurer le niveau de résistance quantitative des variétés de tournesol face au mildiou dans les processus de sélection et d'évaluation variétale : un enjeu fort pour la gestion durable du risque. *Innovations Agronomiques* 50 : 131-144 .

Vincourt P., As-Sadi F., Bordat A., Langlade N.B., Gouzy J., Pouilly N., Lippi Y., Serre F., Godiard L., Tourvieille de Labrouhe D., Vear F., 2012. Consensus mapping of major resistance genes and independent QTL for quantitative resistance to sunflower downy mildew. *Theor. Appl. Genet.* 125 : 909-920.

A



B



A - Emergences d'*Orobanche cumana* à différents stades de développement.
B - Graines d'*Orobanche cumana*.

Orobanche cumana, une plante parasite qui menace la production du tournesol

L'orobanche du tournesol (*Orobanche cumana*, photo A) est une plante non-chlorophyllienne qui parasite le tournesol et est incapable de se développer en son absence. Elle se fixe sur les racines du tournesol pour détourner une partie des éléments nutritifs absorbés ou produits par le tournesol. Le développement des tournesols parasités est fortement affecté (photo C) et les pertes de rendement peuvent dépasser 80 %.

Orobanche cumana est présente en Europe, en Afrique du Nord, en Israël et en Chine. En Europe, on la trouve surtout dans le sud de l'Espagne, dans les pays autour de la mer Noire (Turquie, Bulgarie, Ukraine...) et en France depuis 2007 où le nombre de parcelles infestées par l'orobanche ne cesse d'augmenter. Alors que le tournesol est originaire d'Amérique du Nord, l'orobanche n'y est pas présente. En France, elle est aujourd'hui observée dans les principales régions où le tournesol est cultivé avec plus de 200 exploitations touchées en 2015 dont 141 en Midi-Pyrénées. L'orobanche du tournesol produit de très petites graines (0,2-0,3 mm de diamètre, photo B) et une plante produit des milliers de graines qui peuvent survivre plusieurs années dans le sol. Les méthodes de lutte sont restreintes et l'obtention de variétés résistantes est la méthode la plus efficace. Des variétés résistantes à l'orobanche ont été produites mais de nouvelles races d'orobanche sont apparues et ont contourné ces résistances.

A l'Inra de Toulouse, l'équipe Génétique et Génomique du Tournesol du LIPM travaille sur la résistance du tournesol à l'orobanche depuis 2013 grâce au soutien des partenaires et en étroite collaboration avec les principaux laboratoires nationaux et internationaux (Get-PLAGE et CNRGV (Inra-Toulouse), LBPV (Université de Nantes), CSIC (Cordoue, Espagne), Terres Inovia, Biogemma et Syngenta Seeds). Les travaux portent d'une part sur la caractérisation des races d'orobanche présentes en France et en Europe, et d'autre part, sur la caractérisation des mécanismes de résistance et l'identification des régions du génome qui contrôlent la résistance chez le tournesol. A titre d'exemple, des régions du génome du tournesol qui contrôlent la résistance quantitative à l'orobanche en bloquant spécifiquement chacune des 4 étapes principales du cycle de développement de l'orobanche ont été identifiées. Certaines régions du génome agissent sur la germination des graines d'orobanche, d'autres sur l'attachement de l'orobanche sur les racines du tournesol, d'autres sur le développement des tubercules souterrains et enfin, sur l'émergence aérienne du parasite.

La séquence du génome complexe d'*Orobanche cumana* (taille d'environ 1,5 Gb et 19 paires de chromosomes) sera disponible fin 2016. Une avancée majeure qui va permettre d'identifier l'ensemble des gènes présents dans ce génome. L'Inra participe ainsi activement à fournir à l'ensemble des acteurs de l'amélioration du tournesol des outils efficaces pour lutter contre ce parasite et rendre la culture plus productive et plus respectueuse de l'environnement. Ces travaux bénéficient des soutiens de PROMOSOL et du fonds interprofessionnel FASO.

Contact : stephane.munos@toulouse.inra.fr

C



C - Tournesols sensibles à l'orobanche non infectés (3 plantes de gauche) et infectés avec l'orobanche française (3 plantes de droite). Les plantes ont été cultivées dans une serre de niveau de confinement S2. Les graines d'orobanche ont été récoltées le 9 septembre 2015 dans un champ infecté à Bourret (Tarn et Garonne, France).

Pour en savoir plus...

Louarn J., Boniface M.C., Pouilly N., Velasco L., Pérez-Vich B., Vincourt P. and Muñoz S., 2016. Sunflower resistance to broomrape (*Orobanche cumana*) is controlled by specific QTLs for different parasitism stages. *Frontiers in Plant Science* 7 : 590, doi : 10.3389/fpls.2016.00590.

Trois démarches de modélisation complémentaires pour la maîtrise des maladies du tournesol

Différents agents pathogènes du tournesol sont responsables de pertes significatives de rendement. Plusieurs démarches de modélisation ont été initiées afin de contribuer à leur maîtrise par des stratégies d'adaptation des systèmes de culture (y compris le choix variétal).

Le premier axe de modélisation mis en œuvre concerne l'analyse des pertes de rendement causées par les différents agents pathogènes du tournesol. Pour ce faire, une première version du modèle de nuisibilité SUNFLOWER-PEST a été développée en utilisant la plateforme de modélisation en ligne X-PEST (développée dans le cadre du projet européen PURE « Pesticide Use-and-risk Reduction »). Une fois les différentes fonctions de nuisibilité intégrées dans le modèle, celui-ci permettra de porter un diagnostic sur l'importance relative des différents agents pathogènes du tournesol dans différentes situations de production.

Le deuxième axe de modélisation concerne l'intégration des agents pathogènes dans le modèle de culture SUNFLO, qui, jusqu'à présent ne prend en compte que les effets des stress abiotiques dans l'élaboration du rendement. Après le phoma, le phomopsis est le second agent pathogène en cours d'intégration. Cette intégration est poussée car les états de peuplement modifient les dynamiques épidémiologiques *via* le microclimat au sein du couvert et le développement des symptômes entraîne une altération de l'élaboration du rendement. Cet axe de modélisation est prometteur vis-à-vis de l'aide à la conception de systèmes de culture à base de tournesol et/ou d'idéotypes pour maîtriser un, voire plusieurs agents pathogènes en interaction. Néanmoins, une des limites de l'approche est qu'il est nécessaire de disposer de connaissances et de données détaillées à la fois sur l'épidémiologie des maladies considérées et sur les mécanismes de dommages associés.

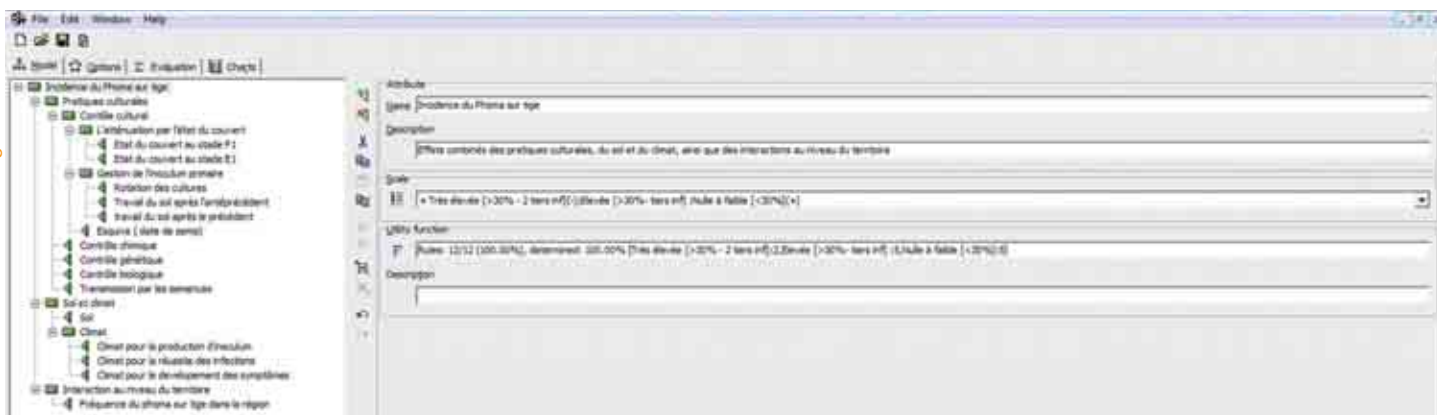
Le troisième axe de modélisation vise à compléter l'axe précédent en mobilisant une méthode de modélisation innovante valorisant l'expertise et les éléments de connaissance publiés. Une plateforme de modélisation qualitative (IPSIM, Injury Profile SIMulator) a récemment été mise au point pour permettre le développement rapide de modèles représentant un ensemble de bioagresseurs sur une culture donnée, dans une situation de production donnée. Un des avantages de la méthode est l'hybridation des sources de connaissances : expertises, analyse de la littérature scientifique et technique, jeux de données et modèles de simulation quantitatifs, quand ils sont disponibles. Différents modules ont déjà été développés ou sont en cours de développement sur phoma tige, phoma collet, phomopsis, verticillium, mildiou et sclérotinia. Un travail de thèse qui débutera à l'automne 2017 permettra de finaliser ce troisième axe de modélisation qui contribuera à la conception de systèmes de culture limitant les maladies fongiques du tournesol.

En complément des approches expérimentales en serre ou en champ, et de diagnostics en parcelles agricoles, ces activités de modélisation contribuent à structurer les actions de recherche et de développement sur la protection agroécologique du tournesol.

Contact : jean-noel.aubertot@toulouse.inra.fr

Pour en savoir plus...

Aubertot J-N., Robin M-H., 2013. Injury Profile SIMulator, a qualitative aggregative modelling framework to predict crop injury profile as a function of cropping practices, and the abiotic and Biotic Environment. I. Conceptual bases. *PLoS ONE*. <http://dx.doi.org/10.1371/journal.pone.0073202>



Capture d'écran du modèle IPSIM pour le phoma sur tige sous le logiciel Dexi.

L'élaboration de la qualité

Le tournesol est cultivé pour ses graines riches en huile destinées après trituration en premier lieu à l'alimentation humaine mais également à des applications en lipochimie. La valorisation sous forme de biodiesel n'est pas un objectif de la filière contrairement au colza. Le tourteau obtenu après déshuilage est une source de protéines (36 % pour le tourteau "Hi-Pro") en croissance pour l'alimentation animale. En Europe (chiffres 2012), la production d'huile de tournesol se classait au 2^e rang (23 %, 3.4 Mt) après le colza (59 %). L'enjeu de la recherche est de comprendre et maîtriser l'élaboration des différents composants de la graine de tournesol pour mieux orienter la production selon les usages recherchés.

Prévoir l'élaboration de la teneur en huile des graines de tournesol

La variabilité de la teneur en huile est sous la double dépendance de la variété et de la conduite

A l'échelle de la coopérative, la teneur en huile (qu'il s'agisse de variétés linoléiques ou oléiques) est valorisée au-dessus d'une norme commerciale fixée à 44 % ; le supplément de prix est le plus souvent réparti entre les producteurs ayant contribué à la collecte mais dans certains cas, la performance individuelle est primée. Cependant, en l'absence de mesure simple et fiable de la teneur en huile lors de la livraison, il est difficile d'apprécier sa variabilité entre producteurs et parcelles du bassin de collecte.

Si le rendement huileux est assez élevé ($\sim 1.1 \text{ t.ha}^{-1}$), il subsiste une forte variabilité interannuelle de la teneur en huile à l'échelle nationale (43 à 47 % ces dernières années). Par ailleurs, dans le cadre d'une enquête agronomique menée à l'échelle de deux bassins du sud-ouest de la France (Haute-Garonne, Gers) et sur deux génotypes à teneurs en huile contrastées, il a été montré que la variabilité liée à l'environnement et à la conduite culturale est très supérieure à celle liée à la variété (environ 10 points d'huile contre 5 points d'huile pour la variété) (Tableau). Ainsi, il ne suffit pas de connaître le potentiel en huile d'une variété pour prévoir sa performance dans un milieu donné ; la conduite culturale constitue également un levier efficace qui pourrait être mieux exploité.

Prévoir la teneur en huile à la parcelle et à l'échelle d'un bassin de collecte permettrait de mieux choisir les variétés et les conduites culturales selon les milieux. De même en cours de saison, la connaissance précoce de la qualité de la collecte permettrait une meilleure gestion des silos pour la coopérative.

Cependant, cette prévision se heurte à la diversité des facteurs agronomiques, génétiques et environnementaux qui agissent en interaction. Il n'existait pas en 2011 de modèle de prévision de la teneur en huile pour le tournesol embrassant toute cette complexité. C'est avec cet objectif que des travaux ont été menés dans le cadre de la thèse de Fety Andrianasolo (2014) pour mieux comprendre et modéliser l'élaboration de la teneur en huile (et en protéines) des graines (akènes) de tournesol.

Ne disposant pas de modèles satisfaisants pour cette prédiction, une double approche basée à la fois sur la modélisation statistique et la modélisation dynamique a été menée.

Une modélisation statistique de la teneur en huile

A partir d'une base de données pluri-annuelle et multi-locale (400 situations culturales), issue de la mutualisation de données Inra et Terres Inovia, plusieurs modèles statistiques ont été construits et comparés. Ainsi, la teneur en huile finale peut être prédite avec une erreur moyenne de 1.9 à 2.5 points d'huile selon les modèles à partir de la connaissance de la variété et de la durée de surface foliaire active après la floraison. D'autres variables sont également à considérer comme la disponibilité hydrique (avant et après floraison), le statut azoté à la floraison, les hautes températures pendant le remplissage et la densité de plantes, variables qui jouent sur le fonctionnement des « sources » de carbone et d'azote (feuilles, réceptacles, tiges), sur la construction des « puits » stockeurs de carbone et d'azote (coques, amandes) ou sur la relation sources-puits.

Variabilité de la teneur en huile pour une même variété au cours de 3 années sur un réseau de 100 parcelles

(source : projet CASDAR « Bassins de collecte »).

Teneur en huile aux normes (9 % d'eau et 2 % d'impuretés)	2007	2008	2009
Minimum	37 %	38 %	36 %
Moyenne	42 %	43 %	41 %
Maximum	48 %	47 %	46 %

Pour en savoir plus...

Andrianasolo F.N., Casadebaig P., Champolivier L., Maza E., Maury P., Debaeke P., 2014. Prediction of sunflower grain oil concentration as a function of variety, crop management and environment by the means of statistical models. *European Journal of Agronomy* **54** : 84-96.

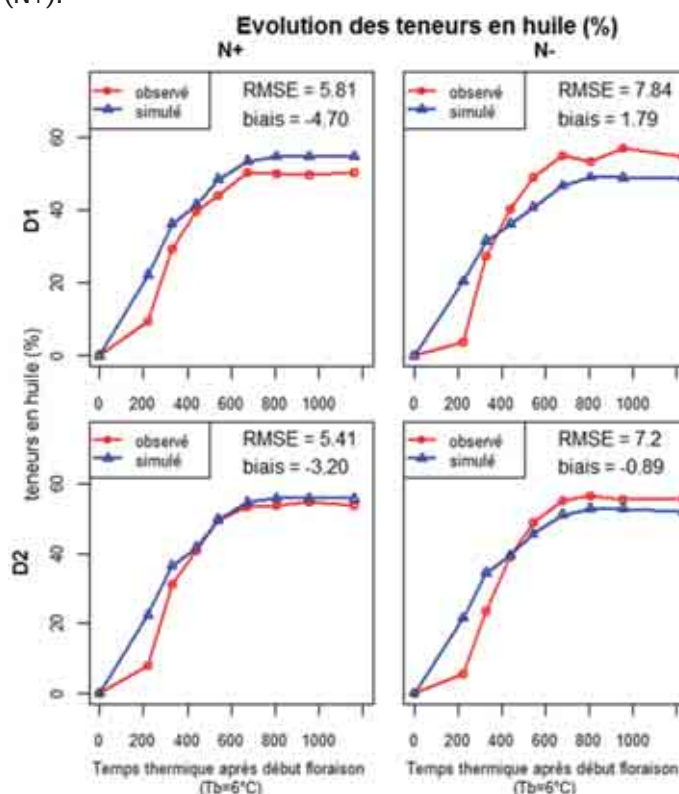
Andrianasolo F.N., Debaeke P., Champolivier L., Maury P., 2016a. Analysis and modelling of the factors controlling seed oil content in sunflower: a review. *OCL, Oilseeds & fats Crops and Lipids* **23** (2). D206.

Andrianasolo F.N., Champolivier L., Debaeke P., Maury P., 2016b. Source and sink indicators for determining nitrogen, plant density and genotype effects on oil and protein contents in sunflower achenes. *Field Crops Research* (in press).

Andrianasolo F.N., Brun F., Casadebaig P., Champolivier L., Maury P., Debaeke P., 2016c. A source-sink based dynamic model for simulating oil and protein accumulation in sunflower achenes. *Proc. 19th International Sunflower Conference*, Edirne (Turkey), 29th May – 3 June 2016.

Champolivier L., Debaeke P., Thibierge J., Dejoux J.F., Ledoux S., Ludot M., Berger F., Jouffret P., Vogrinic C., Lecomte V., Merrien A., Mestries E., Thiard J., Noel 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** : 39-58.

Modélisation dynamique de la teneur en huile pour quatre conditions agronomiques (Andrianasolo *et al.*, 2016c) : faible (D1) et forte (D2) densité de peuplement, azote limitant (N-) ou non (N+).



Vers une modélisation dynamique de l'élaboration de la qualité

Pour construire et évaluer un modèle plus mécaniste d'accumulation du carbone et de l'azote, des expérimentations ont été menées au champ à Auzerville en 2011 et 2012 dans des conditions de culture contrastées (2 génotypes, 2 conditions azotées, 2 densités de peuplement). Ces travaux ont confirmé la forte corrélation entre la durée d'activité photosynthétique (permise par la nutrition azotée et l'eau) et la quantité d'huile par unité de surface accumulée au cours du remplissage. Par ailleurs, nous avons montré que la teneur en protéines de la graine était reliée au statut azoté des plantes à la floraison, au prélèvement d'azote après la floraison et à la durée de surface foliaire. La chronologie de mobilisation des réserves carbonées et azotées lors de la formation des akènes a été également précisée. Ces connaissances ont permis de proposer un modèle dynamique simulant de façon journalière l'accumulation de l'huile et des protéines, ainsi que la biomasse aérienne pendant le remplissage. Si les tendances ont bien été reproduites (Figures), ce modèle doit encore être amélioré pour réduire l'écart avec les observations. Il offre néanmoins des perspectives encourageantes pour la prévision de l'ensemble des composants de l'akène dans une logique multi-produits.

Contact : philippe.debaeke@toulouse.inra.fr

L. Jung - Terres Inovia



Décortiquage du tournesol : pour un tourteau plus riche en protéines

Développement du décortiquage du tournesol

Le décortiquage en étape préalable à la trituration permet d'extraire une partie des coques et donc d'obtenir des tourteaux moins riches en fibres et plus riches en protéines. En effet, la graine de tournesol oléagineux renferme une amande riche en huile et en protéines, tandis que la coque, riche en fibres, représente de 20 à 30 % du poids total de la graine. Les coques extraites sont utilisées en tant que biocombustible, aux caractéristiques techniques proches du bois, dans une chaudière à biomasse pour la production de vapeur utilisée directement sur site pour les étapes ultérieures de la trituration. Cette technologie du décortiquage est largement intégrée dans l'industrie de la trituration du tournesol à l'étranger (pays de la mer Noire, Argentine). L'évolution récente du coût de l'énergie combinée à l'intérêt croissant pour les matières premières riches en protéines pour l'alimentation animale, pouvant se substituer au tourteau de soja d'importation, font que cette technologie connaît aujourd'hui un réel regain d'intérêt. Ainsi, le décortiquage du tournesol se développe au niveau national : historiquement une seule usine pratiquait un décortiquage modéré des graines, SAIPOL Lezoux (63), et récemment une usine supplémentaire, SAIPOL Bassens (33), pratique un décortiquage poussé depuis juillet 2013.

Des tourteaux décortiqués bien valorisés en alimentation animale

L'intégration du décortiquage dans le procédé de trituration du tournesol répond à une demande grandissante du secteur de l'alimentation animale pour des matières premières métropolitaines riches en protéines. Les tourteaux dits « Hi-Pro » obtenus avec un décortiquage poussé, contenant 35-36 % de protéines sur matière brute, peuvent atteindre des débouchés plus rémunérateurs tels que les volailles, les poules pondeuses et les canards, alors que classiquement les tourteaux non décortiqués, dits « pailleux », contenant 27-29 % de protéines, sont valorisés surtout par les ruminants.

Optimisation du procédé de décortiquage affectée par la qualité des graines

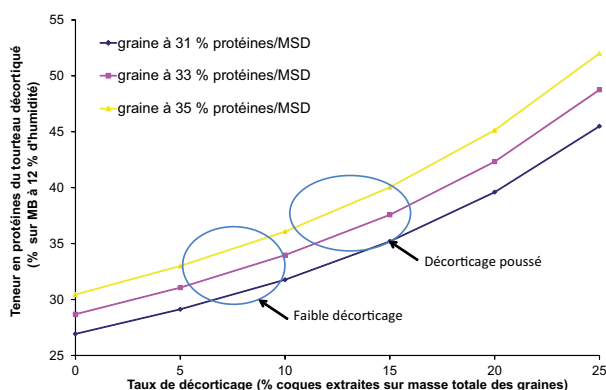
La teneur en protéines et l'aptitude au décortiquage des graines de tournesol produites en France ont un impact sur la capacité des industriels à produire des tourteaux de qualité voulue et sur la rentabilité économique du procédé. L'optimisation du procédé de décortiquage consiste, à partir d'un lot de graines, à produire la quantité la plus importante possible de tourteau, tout en atteignant la qualité voulue dans les tourteaux (teneur minimum garantie en protéines), et en appliquant un taux de décortiquage le plus bas possible, puisque la valeur économique du tourteau est largement supérieure à celle des coques. Des lots de graines ayant une teneur élevée en protéines (exprimée sur la matière sèche déshuilée, MSD) et dont les coques sont faciles à extraire sont donc préférables pour le procédé de décortiquage. Les résultats de nos travaux (soutenus par Terres Univia) montrent que la teneur en protéines des graines de tournesol est fortement influencée par le contexte pédoclimatique mais aussi, dans une moindre mesure, par la génétique. La sélection variétale n'a pas porté sur ce critère, et il n'est pas évident de trouver actuellement sur le marché des variétés significativement supérieures en contenu en protéines.

Concernant l'aptitude au décortiquage, quelques variétés se révèlent plus difficiles à décortiquer : ce sont en particulier les variétés très riches en huile, car l'aptitude au décortiquage est corrélée négativement à la richesse en huile. Cette aptitude au décortiquage va intervenir sur la possibilité pour l'industriel d'atteindre l'objectif de taux de coques à extraire en usine.

L'analyse de ces deux caractéristiques en plus de la teneur en huile, sur un réseau d'essais variétés permet d'identifier des profils de variétés bien distincts. Cela permet également d'identifier si potentiellement certaines variétés pourraient poser un problème quant à leur valorisation par le procédé de décortiquage-trituration.

L'optimisation économique du décortiquage peut s'envisager au travers d'actions concertées, à différents niveaux le long de la filière du tournesol, de la sélection variétale, aux pratiques de culture et en post-récolte, jusqu'à la gestion de l'approvisionnement de l'usine de trituration.

Contact : s.dauguet@terresinovia.fr



Pour en savoir plus...

Dauguet S., 2015. Décortiquage du tournesol : un tourteau plus riche en protéines. *Perspectives Agricoles* 421 : 37-39.

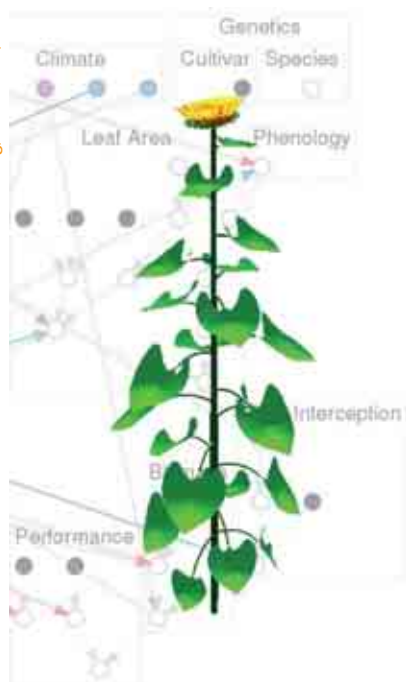
Dauguet S., Fine F., Guillemain C., Carré P., Merrien A., Krouti M., Champolivier L., 2015. Impact of pedoclimatic and agricultural conditions on sunflower seeds characteristics in relation to the dehulling process. *OCL, OilSeeds & fats Crops and Lipids* 22(4) D402.

Dauguet S., Labalette F., Fine F., Carré P., Merrien A., Palleau J.P., 2016. Genetic impact on protein content and hullability of sunflower seeds, and on the quality of sunflower meal. *OCL, OilSeeds & fats Crops and Lipids* 23(2) D205.

Modéliser le phénotype et le génotype chez le tournesol

Pour prévoir les interactions entre le génotype (variété), l'environnement et la conduite de culture et mieux valoriser celles-ci en pratique (préconisation variétale), le recours à la modélisation est nécessaire. Deux types de modélisation ont été développés à cette fin, l'un basé sur le fonctionnement dynamique de la culture, l'autre statistique. Les deux contribuent à l'analyse des réseaux d'essais variétaux. Pour aller plus loin que l'approche basée sur le phénotype, la modélisation dynamique cherche aujourd'hui à intégrer l'information génétique en entrée du modèle de fonctionnement.

P. Casadebaig, UMR AGIR, Inra



Pour en savoir plus...

Casadebaig P., Guilioni L., Lecoer 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.

Le modèle de culture SUNFLO

SUNFLO est un modèle numérique du fonctionnement de la culture du tournesol conçu et développé par l'Inra et Terres Inovia. Ce type de modèle se base sur des équations mathématiques pour décrire des processus physiques et physiologiques. Il simule le développement et la croissance de la plante et ses interactions avec l'environnement pour prédire la performance de la culture en fonction du temps et de variables climatiques (rayonnement, température, précipitations). Son originalité est de tenir compte des différences entre les variétés à l'aide de 4 catégories de critères directement mesurables et de nécessiter un nombre réduit de données d'entrée pour caractériser les conditions de culture (climat, sol, conduite culturale).

Le modèle fonctionne en simulant jour après jour, de la levée à la récolte, les principaux processus physiologiques se déroulant dans la plante et dans le sol, tels que la croissance des racines et leur absorption d'eau et d'azote, la croissance des feuilles, l'interception de la lumière et sa conversion en biomasse (photosynthèse). La prise en compte de rétroactions, par exemple une réduction de la croissance et de la transpiration quand la teneur en eau du sol diminue, permet de simuler l'adaptation de la plante à son environnement (plasticité phénotypique).

En plus des critères de performance de la parcelle (rendement en grains, teneur en huile), SUNFLO permet d'accéder à des critères difficilement mesurables, tels les niveaux de stress ressentis par la culture tout au long du cycle (déficits hydrique et azoté, effet des températures extrêmes). La validité des prédictions a été évaluée en les comparant à de nombreuses observations en champ (976 parcelles). Selon la qualité des données utilisées pour décrire le sol et la proximité des stations climatiques, l'écart entre simulation et observation du modèle se situe entre 15 et 30 %. La comparaison des classements des variétés obtenus *via* expérimentation ou simulation indique que le modèle est significativement capable de différencier la performance des variétés évaluées au champ.

Le modèle SUNFLO a été intégré dans différents prototypes d'outils à destination des gestionnaires de réseaux d'évaluation des variétés et des acteurs du conseil. La compréhension et l'exploitation des mécanismes d'adaptation des variétés, accessibles grâce à ces outils, concerne à la fois le développement agricole et l'amélioration variétale. Pour le développement agricole, l'enjeu est d'utiliser à meilleur escient la diversité génétique cultivée en développant un conseil variétal localisé, tenant compte à la fois de conditions de production spécifiques et de l'incertitude climatique. Pour l'amélioration variétale, l'enjeu est plutôt d'utiliser la simulation pour explorer un grand nombre de combinaisons de caractéristiques variétales et d'identifier celles qui seraient les plus intéressantes pour développer de nouvelles variétés tenant compte des changements globaux.

Contact : pierre.casadebaig@toulouse.inra.fr

Vers une modélisation reliant l'échelle génétique à celle du couvert

La forme et la performance d'une plante (phénotype) résulte de l'expression de ses gènes (génotype) qui dépendent pour partie de l'effet de l'environnement ; un même génotype présente donc des phénotypes différents quand l'environnement de culture varie (plasticité phénotypique). Ce processus complique donc la création de nouvelles variétés, avec le risque que la performance du matériel sélectionné varie une fois cultivé dans une immense diversité de conditions (années, sols, pratiques). Récemment, des progrès à la fois techniques (séquençage haut-débit) et méthodologiques permettent de prédire la performance d'une plante en fonction de son génotype (marqueurs moléculaires), ce qui améliore l'efficacité de la sélection. Au niveau méthodologique, de nouvelles approches permettent de relier l'échelle génétique et celle du couvert. Elles tirent parti de la modélisation statistique (utilisée par exemple en sélection génomique) et de modèles de simulation pour tenir compte de l'effet de l'environnement sur l'expression des gènes, qui affecte particulièrement le rendement d'une culture. Pour le tournesol, cette approche a été mise en œuvre dans le cadre du projet SUNRISE pour découvrir les régions génétiques responsables de la performance dans des conditions de sécheresse. A terme, il sera possible d'évaluer par simulation non plus des combinaisons de caractéristiques variétales, mais directement des combinaisons alléliques, ce qui permettra de diriger les croisements et d'accélérer la sélection variétale.

Contact : pierre.casadebaig@toulouse.inra.fr

Modéliser les interactions variété x milieu x conduite

L'évolution climatique et la réduction des intrants conduisent à une diversification des milieux de cultures. Le choix variétal doit alors intégrer non seulement la productivité et la qualité intrinsèque de la variété, mais aussi sa capacité à maintenir ces deux critères dans des milieux stressants.

Le choix variétal se base généralement sur un classement moyen des variétés, évaluées sur différents critères à l'échelle d'un réseau d'essais. Or, les classements peuvent fortement varier d'un milieu à l'autre, ce qui est le cas des performances en rendement (Figure). Ces variations de classements résultent de l'existence d'interactions entre les variétés et les milieux, et s'expliquent par des comportements variétaux particuliers face aux différents stress rencontrés.

Les variations de rendements observées dépendent majoritairement de l'environnement. La part des interactions génotype x environnement x conduite (IGEC) n'est pas négligeable, car toujours au moins égale à celle des génotypes, voire souvent supérieure (ex. : 10 %).

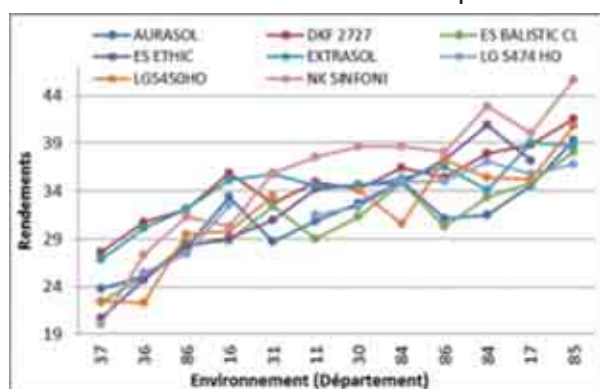
Des travaux sur l'analyse des IGEC ont été réalisés en lien avec l'Inra et les autres instituts techniques (*), avec l'objectif final de comprendre les comportements spécifiques des variétés face aux stress environnementaux. Ceci met en jeu des modèles intégrant des données de performances, comme le rendement, ainsi que des conditions de culture quantifiées par des variables agropédoclimatiques. Les modèles statistiques mis en œuvre pour expliquer les IGEC permettent alors de caractériser le comportement des variétés face aux stress environnementaux (Tableau).

Une évaluation des performances de prédiction de ces modèles montre, au travers d'indicateurs divers, qu'elles ne sont pas satisfaisantes. Un diagnostic effectué sur les erreurs de prédictions met en évidence que plus les stress expliquant les IGEC s'expriment tôt dans le cycle du tournesol, plus il est difficile de les prédire. Le travail se poursuit, visant à définir des démarches simplifiées d'analyse des données fournissant des informations opérationnelles sur les variétés et pouvant être valorisées pour la préconisation variétale.

(*) Dans le cadre d'une action soutenue par le GIS GC HP2E (Groupement d'intérêt scientifique Grandes Cultures à Hautes Performances Economiques et Environnementales).

Contact : c.pontet@terresinovia.fr

Figure : Variation du classement des variétés pour le rendement



Données post-inscription - Terres Inovia série oléique précoce 2009

Tableau : L'analyse des IGEC permet de comprendre le comportement des variétés face aux stress

	Indice de rendement	Floraison			Fin floraison	Remplissage			
		Stress hydrique	Stress basse température	Stress faible rayonnement	Stress azoté	Stress hydrique	Stress basse température	Stress faible rayonnement	Stress azoté
DKF 2727	106,9								
NK SINFONI	106,8								
EXTRASOL	105,2								
ES ETHIC	98,7								
LG 5474 HO	97,1								
LG 5450 HO	96,6								
AURASOL	95								
ES BALISTIC CL	93,6								

Très sensible
Sensible
Peu sensible

Pour en savoir plus...

Pontet C., 2014. Evaluation des variétés : vers une nouvelle approche prenant en compte l'interaction variété-milieu. Rencontres Techniques Régionales Sud 2014.

Debaeke P., Casadebaig P., Mestries E., Palteau J. P., Salvi F., Bertoux V., & Uytewaal V., 2011. Evaluer et valoriser les interactions variété-milieu-conduite en tournesol. *Innovations Agronomiques* 14 : 77-90.

Concevoir des itinéraires techniques adaptés

Pour mettre au point de nouveaux itinéraires techniques pour le tournesol, plusieurs approches ont été menées : expérimentation analytique classique comparant plusieurs modalités, modélisation basée sur SUNFLO pour construire des courbes de réponses, diagnostic agronomique en parcelles d'agriculteurs et essais « systèmes de culture » en station.

Un exemple d'amélioration du conseil grâce à la modélisation

En ce qui concerne la densité de peuplement du tournesol, une démarche originale a été engagée, couplant l'analyse de données réelles issues de 38 expérimentations de Terres Inovia et l'analyse de données virtuelles issues de simulations avec le modèle de culture SUNFLO. Au total, plus de 140000 combinaisons entre 16 variétés, 4 sites, 35 années climatiques, 3 niveaux de réserve en eau du sol, 3 dates de semis et 7 densités de peuplement ont été générées, permettant d'accéder à un dispositif inenvisageable en expérimentation et très puissant pour l'analyse des interactions. Cette démarche a permis de montrer qu'une augmentation de la densité de peuplement en zone très contrainte en eau (sols superficiels par exemple) n'est pas valorisée et a permis de définir des optimums de densité pour le rendement et pour la teneur en huile en fonction du niveau de contrainte hydrique de la parcelle (profondeur de sol, zone climatique, irrigation ou non). Le nouveau conseil de Terres Inovia sur l'implantation du tournesol plus précis et dont l'intérêt économique a été chiffré et a été diffusé dans le Guide tournesol 2016.

Contact : e.mestries@terresinovia.fr

Pour en savoir plus...

Mestries E., Lecomte V., 2016. Tournesol : adapter la densité de semis à la parcelle. *Perspectives Agricoles* 431 : 26-31.



La construction d'un simulateur pour la prévision du rendement et de la qualité du tournesol à l'échelle territoriale mobilisant la télédétection satellitaire

L'un des objectifs finalisés de l'UMT Tournesol est la construction de prototypes d'outils d'aide à la décision pour la conduite du tournesol faisant appel à des règles de décisions, à des systèmes d'information géographique (sols, climats, pratiques, parcellaire), à la technologie d'observation satellitaire et à la modélisation du fonctionnement des cultures.

Des travaux antérieurs ont permis de mettre en évidence qu'un outil de ce type serait d'autant plus attractif pour les coopératives qu'il prendrait en charge plusieurs éléments de la conduite et non pas un seul. Cet outil devra être connectable aux bases de données technico-économiques des coopératives (système intégré) afin d'éviter les saisies multiples.

Sur ces bases, l'UMT Tournesol et ses partenaires se proposent de construire un outil qui aura vocation à aider à la décision en cours de culture sur plusieurs éléments clés de l'itinéraire technique (irrigation,

fertilisation azotée, protection fongicide) et à fournir des prévisions de collecte en quantité et qualité. Il s'agira d'un outil informatique accessible *via* le web qui mobilisera des données d'entrée de différentes natures : météorologie, pratiques culturales, type de sol, état de la culture.

Le premier travail a porté sur l'élaboration du module de prévision du rendement et de la qualité de la récolte (teneur en huile et en acide oléique) du tournesol de cet outil, dans le cadre d'un projet soutenu financièrement par le CASDAR, labellisé par le pôle de compétitivité Agri Sud-Ouest Innovation et associant des organismes de recherche et/ou développement (Inra, CESBIO, Terres Inovia, Agrosolutions) et des structures coopératives (Arterris, Val de Gascogne et union de coopératives AAA).

La prévision de collecte présente un fort intérêt pour les organismes économiques pour des questions d'organisation logistique (réduction des coûts financier et environnemental du stockage), de gestion de lots en prévision de leur commercialisation et d'accès à des marchés (teneur en huile et en acide oléique). Elle doit être disponible au plus tard une quinzaine de jours avant la récolte, mais disposer de premiers éléments plus précocement dès le début du remplissage des graines serait également valorisable.

L'originalité de l'approche repose sur cette association de modèles et de données observées par voie satellitaire pour réaliser une prédiction non seulement à l'échelle de la parcelle agricole, mais également à l'échelle des différentes situations d'un bassin de collecte et du bassin de collecte dans sa globalité. L'objectif du projet est de proposer des méthodes permettant à terme de construire un outil de prévision de collecte (quantité et qualité) du tournesol quelques semaines avant sa récolte, à l'échelle d'un bassin de collecte, à l'aide de modèles plus ou moins complexes associés à des observations d'états de culture (indice foliaire) acquises par voie satellitaire et supposées améliorer la qualité de prédiction des modèles. Il s'agit donc d'identifier les types de modèles les mieux adaptés à la prévision à l'échelle territoriale parmi une gamme de modèles allant du modèle statistique le plus simple (ex : relation directe entre un indice de végétation estimé par voie satellitaire à un stade donné et le rendement) à des modèles de culture dynamiques plus au moins spécifiques (SAFYE, modèle générique développé par le CESBIO et SUNFLO, modèle spécifique du tournesol développé par l'Inra et Terres Inovia). L'intérêt des techniques d'assimilation de données observées en cours de campagne (indice foliaire estimé par voie satellitaire) dans les modèles dynamiques de culture pour en améliorer la précision de prédiction sera également évalué.

Contact : l.champolivier@terresinovia.fr

Une piste de système de cultures innovant : l'association tournesol-soja

Les cultures associées, définies comme la culture sur une même parcelle de plusieurs espèces sur une période significative de leur cycle, pourraient contribuer à l'intensification écologique de l'agriculture. En effet, elles permettraient une meilleure efficacité dans l'utilisation des ressources comparativement aux cultures pures, et ce notamment en systèmes à bas niveaux d'intrants. L'association tournesol-soja a fait l'objet de plusieurs expérimentations menées à l'Inra et à Terres Inovia dans le cadre du projet ANR MicMac Design. L'objectif était d'évaluer les performances et les bénéfices de cette association dans une gamme variée de conditions.

En situation de bas niveau d'intrants (pas d'irrigation et pas ou peu de fertilisation azotée), le rendement total de l'association est supérieur à la moyenne des cultures pures avec un gain pouvant atteindre 13 %. Par ailleurs, il est préférable d'alterner de 2 rangs de tournesol avec 4 rangs de soja ainsi que des variétés de tournesol précoces avec des variétés de soja tardives. En effet, ces systèmes permettent de limiter la concurrence du tournesol sur le soja et ainsi d'avoir une meilleure complémentarité des espèces à la fois dans l'espace et dans le temps pour l'utilisation des ressources (eau, azote, lumière). Toutefois, d'un point de vue économique, ces systèmes restent moins performants que la moyenne des cultures pures du fait qu'ils nécessitent une double récolte dont le coût n'est que partiellement compensé par le gain de rendement.

Ces résultats confirment donc l'intérêt des associations en système à bas niveau d'intrants mais les travaux devront se poursuivre pour analyser plus précisément les effets des interactions entre précocité et architecture des variétés, structure du peuplement et conduite pour optimiser les performances de ces systèmes avant la construction d'un conseil opérationnel.

Contact : eric.justes@toulouse.inra.fr

Pour en savoir plus...

Landé N., Jouffret P., Tribouillois H., Cristante P., Estragnat A., Lecomte V., Bedoussac L., Justes E., 2012. Evaluating economic and technical performances of sunflower-soybean intercrop in French farming systems. Proc. 18th International Sunflower Conference, February 27-March 1, Mar del Plata (Argentina), 6 p.

Justes E., Tribouillois H., Cristante P., Estragnat A., Champclou D., Vericel G., Landé N., Bedoussac L., 2012. Is sunflower intercropped with soybean an efficient solution for increasing natural resources use and yield production? Proc. 18th International Sunflower Conference, February 27-March 1, Mar del Plata (Argentina), 6 p.



P. Jouffret - Terres Inovia



G. Vericel - UMR ACIR - Inra

Développer des outils pour le conseil et l'évaluation variétale

L'objectif de l'UMT est de mettre à disposition des acteurs (conseillers, expérimentateurs, gestionnaires de coopératives...) des applications dérivées de la recherche (outils d'aide à la décision, instruments pour le diagnostic de terrain, informations issues du satellite...). Trois applications récentes sont illustrées ici, basées sur la mobilisation d'un outil dérivé de SUNFLO, pour accompagner l'évaluation variétale sur le développement d'une chaîne d'outils pour le phénotypage au champ et sur l'utilisation de la télédétection satellitaire pour le diagnostic et la prévision.

Pour en savoir plus...

Debaeke P., Casadebaig P., Mestries E., Palteau J.P., Salvi F., Bertoux V., Uyttewaal V., 2011. Simulation dynamique des interactions génotype x environnement x conduite de culture : application à l'évaluation variétale en tournesol. *Innovations Agronomiques* 15 : 89-103.

Mestries E., Debaeke P., Casadebaig P., Andrianasolo F., Bardy F., Fauvin P., Motard M., Palteau J.P., Pontet C., Salvi F., Bertoux V., Uyttewaal V., 2015. Insertion de la modélisation dynamique dans le processus d'évaluation des innovations variétales : des épreuves de pré-inscription au conseil de post-inscription ; application au tournesol. *Séminaire CTPS « Sélectionner et évaluer les variétés végétales pour leur tolérance aux stress biotiques et abiotiques »*, Paris, 1^{er} Déc. 2015.

Utiliser la modélisation dynamique pour accompagner le processus d'évaluation des variétés

La prise en compte des interactions génotype – environnement – conduite de culture (IGEC) permet d'améliorer l'évaluation variétale et le conseil face à la diversification croissante des systèmes de culture et des objectifs de production. Dans ce domaine, la modélisation dynamique pourrait assister utilement l'approche expérimentale qui prévaut en évaluation variétale, aussi bien pour l'inscription des variétés que pour la recherche de leur mode d'emploi en post-inscription.

Dans le cadre de 2 projets soutenus par le Comité Technique Permanent de la Sélection (CTPS) depuis 2007, une démarche d'évaluation variétale mobilisant le modèle SUNFLO a été développée et testée. Cette démarche comprend 3 étapes :

1. la mise en œuvre en routine du phénotypage pour les nouvelles variétés inscrites : dans deux dispositifs expérimentaux au champ (depuis 2008) conduits par Terres Inovia (phénologie, surface foliaire, élaboration du rendement et de l'huile) et sur la plateforme Heliaphen de l'Inra à Toulouse (depuis 2014) pour l'évaluation de la réponse à la contrainte hydrique (expansion foliaire, transpiration);
2. l'évaluation de la capacité du modèle SUNFLO à simuler la performance des variétés dans les réseaux nationaux d'inscription du GEVES et de post-inscription de Terres Inovia (rendement, teneur en huile) ; selon les réseaux et les années, l'erreur de prédiction sur le rendement est de 2.7 à 4.9 q.ha⁻¹ ;
3. l'utilisation des capacités du modèle pour générer des plans d'expérience en s'appuyant sur une large base climatique afin de préciser le mode d'emploi des variétés (conduite), en particulier selon les conditions de sol (réserve utile).

Un prototype d'outil d'aide à l'évaluation variétale (VARIETO) co-construit avec les gestionnaires de réseaux GEVES et Terres Inovia a été développé. Les principales applications envisagées pour cet outil sont le diagnostic agronomique des essais réels (ex. identification des périodes de stress hydrique subies par les variétés), la construction de regroupements d'essais par type de sol ou par profil de stress, l'analyse de la représentativité des réseaux par rapport aux conditions réelles de production, et la comparaison des performances de variétés de générations différentes.

Ce prototype a été testé sur les réseaux d'évaluation du GEVES et de Terres Inovia de 2011 à 2013. Une nouvelle interface web doit être construite (Terres Inovia) pour permettre son utilisation en routine, en lien avec la démarche d'analyse statistique des interactions G x E développée à Terres Inovia.

Contact : philippe.debaeke@toulouse.inra.fr

De nouveaux outils pour le phénotypage

L'exploitation efficace des informations issues de la génomique butte sur la rareté des mesures sur la plante en fonctionnement. Ainsi, avec l'apparition des techniques de génotypage à haut débit est apparue une demande pour des techniques de phénotypage (c'est-à-dire de mesure instrumentée) des plantes à haut débit. L'analyse d'images et les capteurs optiques sans contact sont privilégiés car ils permettent des mesures à la fois rapides et non destructives ce qui est fondamental pour réaliser des suivis dynamiques tout au long du cycle de la culture.

Mobileaf : le smartphone au service du tournesol

MobiLeaf est une application développée sous Android, dans le cadre du projet SUNRISE et avec le soutien de Terres Inovia, qui permet d'estimer par analyse d'image la surface d'une feuille de tournesol. La précision de la mesure est supérieure à celle de la méthode classique qui consiste à estimer la surface à partir de la longueur et de la largeur de la feuille tout en restant non destructive. Les informations relatives à l'identification de la feuille sont également collectées par l'application, ce qui en fait un véritable outil de saisie.



UMR AGIR - Inra



PIETON : la lumière au service de la mesure

PIETON, un produit de l'UMT CAPTE conçu entre l'Inra, Terres Inovia et ARVALIS - Institut du végétal, est un système de mesure de l'interception de la lumière qui permet une estimation indirecte et non destructive de la surface de feuilles et de tiges d'un couvert. L'opérateur circule dans la parcelle qu'il souhaite mesurer et l'appareil réalise une mesure simultanée de la lumière incidente au dessus du couvert et de la fraction transmise jusqu'au sol (capteur du bas). La fraction interceptée est reliée à la quantité de feuilles et donc à l'énergie lumineuse interceptée qui pourra être transformée en énergie chimique (huile) par le tournesol.



UMR AGIR - Inra

Drone : l'expérimentation vue du ciel

Le développement actuel des drones civils permet d'envisager l'acquisition d'images avec une résolution spatiale suffisante pour une utilisation en expérimentation agronomique. Les images dans le visible permettent des opérations de comptage de plantes (A) ou de fleurs (C) et des mesures de taux de couverture avant la fermeture du couvert ou de détection d'anomalies de peuplement (B).

Images permettant A) de compter les plantes, B) de compter les trous dans le peuplement, C) de compter les fleurs dans un essai de tournesol.

UMR AGIR - Inra



Les étapes suivantes consisteront à utiliser des images multispectrales, similaires à celles acquises par les satellites, pour estimer l'indice foliaire, une variable clé de la croissance, et l'infra-rouge thermique pour évaluer le stress hydrique subi par le couvert. Les techniques de traitement du signal issues de la télédétection seront mobilisées. Le challenge consiste à bien prendre en compte la structure du peuplement, variable d'un génotype à l'autre, afin d'éviter les biais dans les estimations.

Contact : philippe.burger@toulouse.inra.fr



P. Burger - UMR AGIR - Inra

Pour en savoir plus...

Pinochet X., Mestries E., Langlade N., Burger P., 2015. Phénotypage du tournesol : la recherche passe au haut débit. *Perspectives Agricoles* 424 : 60-62.



Deux parcelles de tournesol suivies en 2015 (projet CASDAR Image SENTINEL 2 du 16 juillet 2015 (10 m de résolution)).

La télédétection pour le suivi des parcelles agricoles

Depuis quelques années, les données de capteurs aériens (drone, avion...) et spatiaux pour observer les cultures se multiplient, leur qualité et précision s'améliorent, leurs coûts diminuent ; enfin, les logiciels et serveurs pour gérer et traiter cette grande masse d'information sont plus facilement accessibles. Transformer ces données en informations et services utiles et opérationnels reste une activité complexe, qui nécessite de multiples compétences complémentaires (agronomie, traitement du signal, informatique, modélisation...). La télédétection spatiale a pour atout la possibilité d'observer de grands territoires régulièrement en générant une information homogène et comparable entre lieux et dates d'images.

Le contexte actuel est marqué par le programme européen Copernicus : plusieurs familles de satellites nommés SENTINEL sont opérées à partir de 2014/2015 pour au moins 20 ans, garantissant l'accès en temps réel à des images satellites gratuites et de qualité au moins sur toute l'Europe. Pour le suivi parcellaire, les SENTINEL 2 (optique) acquièrent depuis fin 2015 des images à 10/20 mètres de résolution spatiale tous les 10 jours, mais cette fréquence de revisite temporelle sera de 3 à 5 jours selon les zones dès 2017. Il en est de même pour SENTINEL 1, capteur radar (SAR) en bande C, qui de fait, a aussi l'avantage d'acquérir des données quelle que soit la couverture nuageuse. Les points forts des SENTINEL 1 et 2 sont donc (i) la répétitivité temporelle, (ii) la résolution spatiale, qui est largement suffisante pour le suivi des parcelles agricoles et de leur variabilité intra-parcellaire et (iii) la richesse et complémentarité spectrales.

Dans le cadre de l'UMT Tournesol, les activités de recherche du CESBIO, en partenariat avec l'Inra, Terres Inovia et les coopératives agricoles ont d'abord concerné des approches de type diagnostic pluri-annuel basé sur des bilans de fin de campagne (mieux comprendre les facteurs limitants de la croissance et du rendement en fonction des types de sols, pratiques et conditions météorologiques). Dans le projet CASDAR 2014-2016 « prévision du rendement et de la qualité à l'aide de l'imagerie satellitaire », l'enjeu est de fournir trois types d'informations mi- à fin juillet, soit 4 à 6 semaines avant la récolte, à une maille parcellaire qui permette différentes agrégations territoriales : échelle d'un silo ou d'une zone d'approvisionnement d'une coopérative agricole, échelle administrative (canton, département...) :

1. la cartographie des surfaces et parcelles en tournesol,
2. la précocité/tardiveté des levées de chaque parcelle,
3. la dynamique d'indice foliaire vert de chaque parcelle qui, assimilée dans différents types de modèles, devrait permettre une meilleure prévision du rendement et des teneurs en huile.

Contact : jean-francois.dejoux@cesbio.cnes.fr

Pour en savoir plus...

Inglada J., Vincent A., Arias M., Marais-Sicre C., 2016. Improved early crop type identification by joint use of high temporal resolution SAR and optical image time series. *Remote Sensing* **8**(5) : 362.

Inglada J., Arias M., Tardy B., Hagolle O., Valero S., Morin D., Dedieu G., Sepulcre G., Bontemps S., Defourny P., Koetz B., 2015. Assessment of an operational system for crop type map production using high temporal and spatial resolution satellite optical imagery. *Remote Sensing* **7**(9) :12356-12379.

Osman J., Inglada J., Dejoux J. F., 2015. Assessment of a Markov logic model of crop rotations for early crop mapping. *Computers and Electronics in Agriculture* **113** : 234-243.

Claverie M., Demarez V., Duchemin B., Hagolle O., Ducrot D., Marais-Sicre C., Dejoux J.F., Huc M., Keravec P., Béziat P., Fieuzal R., Ceschia E., Dedieu G., 2012. Maize and sunflower biomass estimation in southwest France using high spatial and temporal resolution remote sensing data. *Remote Sensing of Environment* **124** : 844-857.

Dejoux J. F., Champolivier L., Berger F., Debaeke P., Marais-Sicre C., Huc M., Dedieu G., Demarez V., Claverie M., Colomes J.F., 2010. Utilisation de séries temporelles d'images SPOT 2, 4, 5 pour le diagnostic régional des facteurs limitants des rendements et de la qualité du tournesol dans le Gers. Proc. 12ème Journées Scientifiques du Réseau Télédétection de l'AUF, Monastir (Tunisie), 23-25 novembre 2010.

Identifier les freins et leviers (réglementation, technologie, marché) pour le développement d'éco-innovations variétales

Pour en savoir plus...

Galliano D., Magrini M.B., Tardy C., Triboulet T., 2015. Freins et leviers à la production et diffusion des éco-innovations variétales : le cas du secteur semencier du tournesol. 9^{es} Journées de recherches en sciences sociales (JRSS), 10-11 décembre 2015, Nancy, France, 24 p.

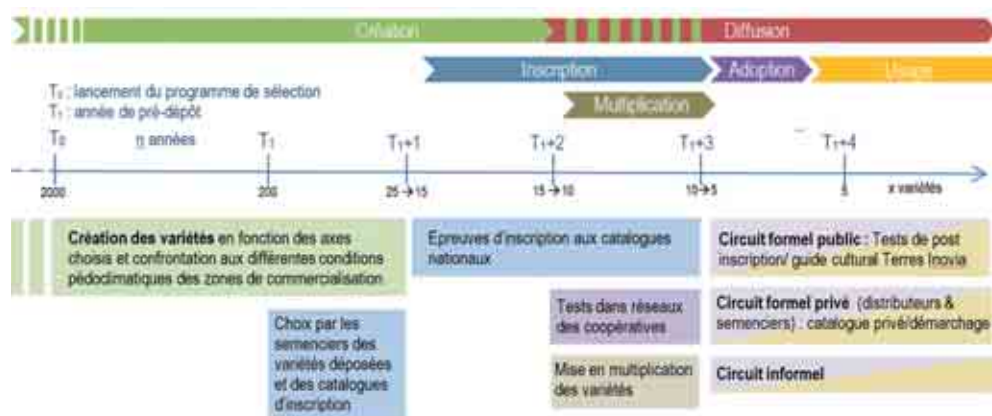
Galliano D., Nadel S., 2015. Firms' eco-innovation intensity and sectoral system of innovation: the case of French industry. *Industry and Innovation* 22(6) : 467-495.

Les semences sont reconnues comme un levier majeur de la transformation des systèmes agricoles et occupent donc une place de choix pour la transition agro-écologique de l'agriculture. La pression sociétale pour la réduction des externalités environnementales de l'agriculture a récemment amené le gouvernement français à imposer une dimension environnementale dans l'évaluation des variétés pour leur inscription au catalogue. Cette orientation vers plus de durabilité environnementale interroge la capacité des acteurs du secteur semencier à proposer de nouvelles variétés apportant un bénéfice environnemental.

Dans ce contexte, une analyse des conditions de production et de diffusion d'innovations variétales s'inscrivant dans le paradigme agro-écologique a été menée. Elle combine de manière originale deux approches théoriques des processus d'éco-innovation, aux échelles micro- et méso-économiques, pour appréhender les dynamiques d'innovation du secteur semencier. Basée sur une enquête auprès des principaux semenciers et autres acteurs de la filière tournesol, l'analyse met en évidence une faible, mais croissante orientation de ce secteur vers l'éco-innovation variétale. D'un côté, les interactions positives entre les dimensions technologique, réglementaire et marchande pour les processus d'éco-innovation sont confirmées. De l'autre, l'évolution du régime semencier dominant avec une internationalisation croissante des stratégies questionne sa capacité à favoriser les pratiques d'adoption et d'usage les plus aptes à favoriser l'expression du bénéfice environnemental d'une innovation variétale.

Contact : pierre.triboulet@toulouse.inra.fr

Schéma de développement d'une innovation variétale



Remerciements

Les animateurs de l'UMT Tournesol Emmanuelle Mestries (Terres Inovia) et Philippe Debaeke (Inra) tiennent à remercier tout particulièrement l'ensemble des personnes qui se sont mobilisées pour l'écriture de ce livret :

Jean-François Dejoux du CESBIO,
Grégory Dechamp-Guillaume et Pierre Maury de l'INP-ENSAT,
Célia Seassau de l'INP PURPAN,
Nicolas Langlade, Anne-Sophie Lubrano-Lavadera et Stéphane Muñoz de l'équipe Génétique et Génomique du Tournesol du LIPM,
Jean-Noël Aubertot, Philippe Burger, Pierre Casadebaig, Céline Colombet, Eric Justes et Pierre Triboulet de l'UMR AGIR,
Luc Champolivier, Sylvie Dauguet et Célia Pontet de Terres Inovia
Françoise Labalette de Terres Univia.

Au-delà de l'engagement des ministères en charge de l'agriculture et de la recherche et de l'investissement des parties prenantes du dispositif de recherche toulousain (Départements et centre Inra, partenaires académiques et professionnels, collectivités territoriales, agences régionales, nationales et européennes) et des nombreux soutiens financiers dont il a bénéficié et bénéficie à ce jour, tous ces travaux n'auraient pu être initiés ou réalisés sans l'engagement d'une large communauté de chercheurs, ingénieurs, enseignants-chercheurs, techniciens, doctorants et stagiaires. Ainsi, nous pensons à :

François Brun pour l'ACTA,
Ahmad Al Bitar, Marjorie Battude, Jérôme Cros, Valérie Demarez, Hervé Gibrin, Florian Helen, Mireille Huc, Claire Marais-Sicre et Olivia Mas-Erauso pour le CESBIO,
Guénolé Grignon pour le GIS GC-HPEE,
Philippe Grief pour l'INP-ENSAT,
Marie-Hélène Robin pour l'INP PURPAN,
Amandine Bordat, Laurence Godiard, Johann Louarn, Brigitte Mangin, Baptiste Mayjonade, Nicolas Pouilly et Patrick Vincourt pour l'équipe Génétique et Génomique du Tournesol du LIPM,
Jérôme Gouzy pour la plateforme Bioinformatique du LIPM,
Laurent Bedoussac, Danielle Galliano, Marie-Benoît Magrini, Guillaume Robaldo, Caroline Tardy, et Grégory Véricel pour l'UMR AGIR,
Yasmil Fernandez, Hélène Raynal, Nathalie Rousse et Ronan Trépos pour la plateforme de modélisation RECORD de l'Inra,
Arnaud Gauffreteau et François Delmotte pour les équipes Inra à Grignon et Bordeaux,
Bernard Garric, Christophe Jestin, Vincent Lecomte, Claire Martin-Montjaret, Arnaud Micheneau, Céline Motard, Jean-Pierre Palteau et Frédéric Salvi pour Terres Inovia,

Ainsi qu'à tous les responsables et personnels techniques du domaine expérimental de l'Inra à Auzeville, de l'UMR AGIR, de l'équipe de Génétique et Génomique du Tournesol du LIPM, des stations d'expérimentation de Terres Inovia et des laboratoires Inra et Terres Inovia, tous les doctorants qui ont contribué à une meilleure connaissance du tournesol : Afif Adiredjo, Clémentine Allinne, Fety Andrianasolo, Falah As-Sadi, Elena Cadic, Myriam Desanlis, Quentin Gascuel, Gwenaëlle Marchand et Hélène Tribouillois, et l'ensemble des stagiaires de BTS, Licence, Master et école d'ingénieurs.

Nous remercions également tous les partenaires de nos projets sans qui ces travaux n'auraient pu voir le jour : semenciers, coopératives, agriculteurs, GEVES, ...

Un grand merci également aux équipes de communication qui nous accompagnent au quotidien dans la mise en valeur de nos résultats.

Enfin, nous souhaitons remercier encore plus particulièrement Patrick Vincourt et les équipes Inra de Clermont-Ferrand et Montpellier, qui ont su accompagner la création de l'équipe de Génétique et Génomique du Tournesol sur le site de Toulouse, et notamment Felicity Vear et Denis Tourvieille de Labrouhe et transmettre la longue histoire de partenariat pour une recherche finalisée entre l'Inra et Terres Inovia.

Lexique

ANR :

Agence Nationale pour la Recherche

CASDAR :

Compte d'Affectation Spéciale « Développement Agricole et Rural »

CESBIO :

Centre d'Etudes Spatiales de la Biosphère Université Paul Sabatier (Toulouse III), CNRS, CNES et IRD

CNRGV :

Centre National de Ressources Génomiques Végétales

CPER :

Contrat de Plan Etat-Région

DGER :

Direction Générale de l'Enseignement et de la Recherche

ENSIACET :

Ecole Nationale Supérieure des Ingénieurs en Arts Chimiques et Technologiques

ENSAT :

Ecole Nationale Supérieure d'Agronomie de Toulouse

FASO :

Fonds d'Action Stratégique des Oléoprotéagineux

FEDER :

Fonds Européen de Développement Régional

FSRSO :

Fonds de Soutien à la Recherche Semencière Oléagineuse

FUI :

Fonds Unique Interministériel

GEVES :

Groupe d'Etude et de contrôle des Variétés Et des Semences

GIS GCHP2E :

Groupement d'Intérêt Scientifique Grandes Cultures à Hautes Performances Economiques et Environnementales

INP :

Institut National Polytechnique

ISA :

International Sunflower Association

LIPM :

Laboratoire Interactions Plantes-Micro-organismes, Inra-CNRS, Départements Biologie et Amélioration des Plantes et Santé des Plantes et Environnement

MAAF :

Ministère de l'Agriculture, de l'Agroalimentaire et de la Forêt

Plateforme RECORD :

Plateforme pour la modélisation et la simulation informatique des agro-écosystèmes

Promosol :

Association pour la promotion de la sélection des plantes oléagineuses

RMT :

Réseau Mixte Technologique

SRAL :

Service Régional de l'Alimentation

UMR AGIR :

Unité Mixte de Recherche AGroécologie-Innovations-territoires, INP-ENSAT, INP PURPAN, Enfa, Départements Sciences pour l'Action et le Développement et Environnement et Agronomie

UMT :

Unité Mixte Technologique

UMT CAPTE :

UMT « Capteurs et Télédétection pour caractériser l'état et le fonctionnement des grandes cultures »



Terres Inovia
1 avenue Lucien Brétignières - 78850 THIVERVAL-GRIGNON
www.terresinovia.fr



Inra Toulouse Midi-Pyrénées
24 Chemin de Borde Rouge - CS 52627 - 31326 CASTANET-TOLOSAN
www.toulouse.inra.fr



INP-ENSAT
Avenue de l'Agrobiopole - BP 32607 - Auzeville-Tolosane
31326 CASTANET-TOLOSAN Cedex
www.ensat.fr



INP-PURPAN
75 voie du TOEC - BP 57611 - 31076 TOULOUSE Cedex 3
www.purpan.fr



CESBIO
Adresse géographique
Complexe Scientifique de Rangueil - 13 avenue du Colonel Roche
31400 TOULOUSE
Adresse postale
18 avenue Edouard Belin - BPI 2801 - 31401 TOULOUSE Cedex 9
www.cesbio.ups-tlse.fr