



HAL
open science

Construire des stratégies de production adaptées aux débouchés à l'échelle du bassin de collecte

Luc Champolivier, Philippe P. Debaeke, Jérôme Thibierge, Jean-François Dejoux, Stéphanie Ledoux, M Ludot, F Berger, Pierre Casadebaig, Pierre Jouffret, Christophe Vogrincic, et al.

► To cite this version:

Luc Champolivier, Philippe P. Debaeke, Jérôme Thibierge, Jean-François Dejoux, Stéphanie Ledoux, et al.. Construire des stratégies de production adaptées aux débouchés à l'échelle du bassin de collecte. CIAG Tournesol et agriculture Durable, Jun 2011, Toulouse, France. hal-02810446

HAL Id: hal-02810446

<https://hal.inrae.fr/hal-02810446>

Submitted on 6 Jun 2020

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

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

Construire des stratégies de production adaptées aux débouchés à l'échelle du bassin de collecte

Champolivier L.¹, Debaeke P.², Thibierge J.³, Dejoux J.-F.⁴, Ledoux S.¹, Ludot M.¹, Berger F.¹, Casadebaig P.¹, Jouffret P.¹, Vogrincic C.¹, Lecomte V.¹, Merrien A.¹, Mestries E.¹, Thiard J.², Noël M.³, Caumes E.³, Edeline T.³, Provot M.⁵

(1) : Cetiom, 12 avenue George V, 75008 Paris,

(2) : INRA Toulouse, UMR AGIR, BP 52627, 31326 Castanet-Tolosan Cedex,

(3) : Invivo, 83-85 avenue de la Grande Armée, 75782 Paris Cedex 16,

(4) : CESBIO, 18 avenue Edouard Belin, BPI 2801, 31401 Toulouse Cedex 9,

(5) : Laboragro, La Grande Paroisse, BP 102, 77871 Montereau Cedex

Correspondance : champolivier@cetiom.fr

Résumé

L'objectif de ce projet est de mettre au point différents outils permettant de construire, évaluer et favoriser la mise en œuvre de stratégies de production du tournesol adaptées aux débouchés à l'échelle du bassin de collecte. Un travail de diagnostic agronomique associant des approches de typologie, d'enquête auprès d'agriculteurs, de suivi de parcelles agricoles (au sol et par voie satellitale) et de modélisation à l'échelle de bassin de collecte a permis d'identifier les principaux facteurs limitant la production et de construire des scénarios d'amélioration. Un prototype d'outil informatique « COLLECTO » a été construit. Il permet de tester des scénarios d'amélioration de la production à l'échelle d'un bassin de collecte et a été construit sur la base du modèle de culture « SUNFLO » (fonctionnant au niveau de la situation homogène) auquel ont été associés des modules d'agrégation (par typologie), de prise en compte des facteurs limitants non gérés par SUNFLO et de calculs économiques. Enfin, une action a été consacrée à une première approche de mise au point de méthodes rapides, simples et peu onéreuses de mesure de la teneur en huile (par spectrophotométrie infrarouge) utilisables au silo dès la livraison ou dans un laboratoire.

Mots-clés : tournesol, rendement, teneur en huile, bassin de collecte, diagnostic agronomique, SUNFLO, COLLECTO, analyseur infrarouge.

Abstract: Defining production strategies adapted to markets at the production basin scale

The goal of this project is to create tools which allow us to define, assess and simplify the development of sunflower production strategies suitable to issues concerning a supplying area. An agronomical diagnosis work, associating approaches of typology, interviews with farmers, field observations (on the field and from satellites) and the use of models on the supplying area allow the identification of the main production limiting factors. A prototype of a computer tool called "COLLECTO" has been built. It allows for testing of production improvement scenarios at the supplying area level. Its central component is the crop model "SUNFLO" (which works at the homogeneous situation level) in which are added models of aggregation (typology based), taking into account limiting factors which are not managed by SUNFLO, and economical calculations.

Lastly, we managed to propose quick, simple and cheap measurement methods of the oil content (infrared spectrophotometry based) which could be used in silos when farmers deliver harvested seeds or in a laboratory.

Keywords: sunflower, yield, oil content, production basin, agronomical diagnosis, SUNFLO, COLLECTO, infrared analyse

1. Contexte et objectifs du projet

L'amélioration de la compétitivité économique de la culture du tournesol passe par une augmentation et une régularisation des rendements, mais également des teneurs en huile. En effet, les industriels de la trituration recherchent des graines plus riches en huile et les paient plus cher. Au niveau de la production, la réponse à la demande de graines riches en huile se limite très souvent au seul choix de variétés riches en huile, sans revoir les autres éléments de la conduite de culture qui peuvent être très influents sur cette variable (Champolivier et Reau, 2005). Le conseil technique gagnerait à être plus souvent diffusé sous forme d'un conseil d'itinéraire technique complet adapté à la variété et plus globalement au contexte et aux objectifs de l'agriculteur. Une voie de progrès consiste à rechercher comment mieux valoriser le potentiel génétique des variétés en exploitant les interactions « variété x milieu x conduite de culture ». Pour cela, il convient de fournir aux producteurs et aux organismes de collecte des outils d'aide à la décision utilisables à l'échelle de la parcelle agricole et du bassin de collecte, leur permettant d'optimiser l'offre variétale et les conseils de conduite de culture et d'intrants vis-à-vis des objectifs de productivité et de qualité recherchés (Champolivier et al., 2004 ; Debaeke et al., 2010). Le bassin de collecte est l'échelle la plus pertinente pour étudier les conséquences agronomiques des choix réalisés par les organismes d'approvisionnement et de collecte en matière de stratégie de conseil de production (Le Bail, 2002).

Toutefois, un des principaux freins à l'augmentation des teneurs en huile réside dans le fait que très peu d'organismes de collecte mettent en place un système de rémunération individuelle des producteurs leur permettant de valoriser de façon différenciée leur propre résultat. La raison principale en est qu'il n'existe pas de technique d'analyse permettant de mesurer rapidement, simplement et de façon économique la teneur en huile des graines au silo, lors de leur livraison. A l'heure actuelle, la rémunération des producteurs vis-à-vis de la teneur en huile est la plupart du temps collective (la même pour tous) via un complément de prix. Il est probable qu'un système permettant une rémunération individuelle inciterait les producteurs à adapter la conduite de leur culture à des objectifs de teneur en huile élevée, ce qui « tirerait » les résultats du bassin de collecte vers le haut.

Partant de ce constat, le Cetiom, l'INRA de Toulouse (UMR AGIR) et le groupe coopératif InVivo se sont associés dans le cadre d'un projet visant à construire des outils pouvant contribuer aux objectifs d'amélioration du rendement et de la teneur en huile à l'échelle d'un bassin de collecte. Ce projet avait trois grands objectifs, structurés en trois actions :

- Décrire, comprendre et expliquer la variabilité des résultats obtenus sur des parcelles de tournesol par les agriculteurs en volume (rendement), qualité (richesse en huile) et marge brute, dans un bassin de collecte selon le climat de l'année, les situations agronomiques (sols, précédents ...), les variétés et les conduites de culture afin de construire des scénarios d'amélioration ;
- Mettre au point un outil informatique simulant la collecte en quantité, en qualité et en performance économique à l'échelle de la parcelle puis du bassin de collecte, basé sur la prise en compte des interactions « variété x milieu x conduite de culture », et permettant de tester des scénarios d'amélioration sur un grand nombre de situations ;
- Mettre au point une méthode d'analyse rapide et fiable de la teneur en huile des graines de tournesol utilisable lors de la livraison au silo, condition d'une valorisation par l'agriculteur de son effort pour augmenter la teneur en huile de sa récolte.

Le propos de cette communication est de présenter les principaux résultats de ces travaux conduits dans le cadre d'un projet qui s'est déroulé de 2007 à aujourd'hui et qui a été soutenu financièrement par le Ministère de l'Alimentation, de l'Agriculture et de la Pêche de 2008 à 2010 (projet CASDAR).

2. Etat des lieux et compréhension de la variabilité de la collecte de tournesol en quantité et en qualité dans un bassin de collecte

L'objectif de cette action était de décrire, comprendre et expliquer les variations de volume et de richesse en huile des récoltes dans un bassin de collecte de tournesol, selon le climat, le sol et les pratiques des agriculteurs, pour construire des scénarios d'amélioration. Ce travail a été conduit en collaboration avec deux coopératives du Sud-Ouest qui nous ont permis d'accéder pour chacune à l'un de leurs secteurs de collecte : le secteur Lauragais de Haute-Garonne avec la coopérative Arterris et le secteur du nord et de l'est du Gers avec la coopérative Terres de Gascogne (figure 1).

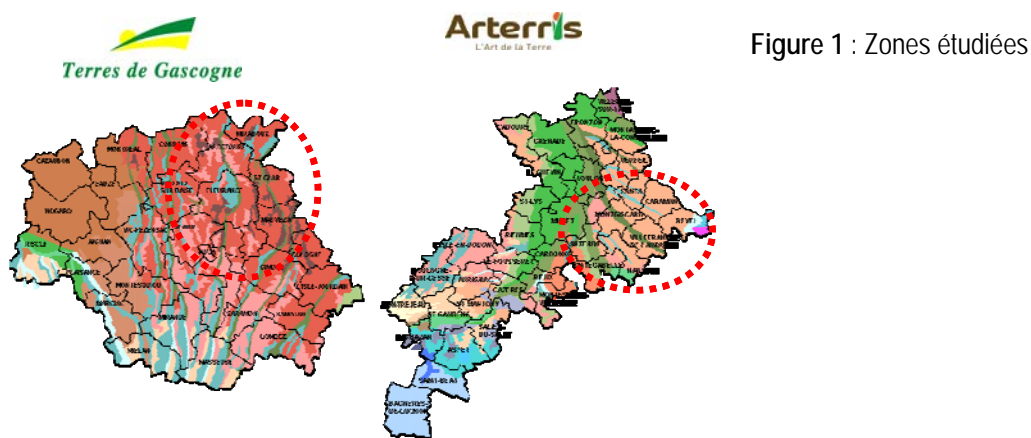


Figure 1 : Zones étudiées

2.1 Démarche mise en œuvre

La démarche mise en œuvre a consisté à associer trois approches :

- Le Diagnostic Agronomique réalisé sur la base d'un réseau de parcelles agricoles représentatives des secteurs de collecte (enquête sur les pratiques et observations sur le terrain) ; la saisie des données a été réalisée avec les logiciels de Services InVivo développés sous OSMOSE et leur analyse réalisée par le Département Agronomique
- L'utilisation de modèles :
 - Le modèle de culture du tournesol « SUNFLO » (Casadebaig, 2008 ; Casadebaig et al., 2011) développé par l'INRA et le Cetiom qui a permis de calculer plusieurs variables pertinentes pour qualifier l'état de la culture, mais trop difficiles à acquérir par observation : indice de stress hydrique pour différentes périodes du cycle de la culture, indice de stress azoté sur l'ensemble du cycle
 - Le modèle Epiclès développé par InVivo pour le calcul du reliquat d'azote minéral au semis et du conseil de fertilisation
- Le recours aux images satellitales (collaboration avec le CESBIO sur le secteur de collecte du Gers) pour reconstituer les dynamiques d'évolution de l'indice de végétation.

En 2007 et 2008, nous nous sommes placés en posture d'observation des pratiques des agriculteurs, sans chercher à les influencer. A l'issue de ces deux années, notre compréhension des facteurs limitants nous a semblé suffisante pour construire des itinéraires techniques « améliorants » susceptibles d'améliorer le rendement et la teneur en huile et les proposer à des agriculteurs volontaires pour les mettre en œuvre sur quelques parcelles du réseau.

2.1.1 Constitution des réseaux de parcelles observées

En 2007, 2008 et 2009, des réseaux de parcelles d'agriculteurs ont été construits sur chaque secteur de collecte (de l'ordre de 100 parcelles en tout chaque année). Le choix des parcelles s'est appuyé sur un travail de typologie réalisé en 2007 et simplifié à partir de 2008. Cette étape a consisté à décrire les différentes conditions de culture du tournesol dans les bassins de collecte, chaque condition de culture correspondant à une combinaison de facteurs réputés influents sur la productivité et la richesse en huile. En 2007, les facteurs retenus à dire d'experts (Cetiom et coopératives) sont le potentiel de production de la parcelle (élevé, moyen ou faible), le type de préparation du sol (travail profond ou travail superficiel), et la fréquence de retour du tournesol dans la rotation (tous les 2, 3 ans ou plus). A chaque type de conditions de culture a été associé son pourcentage de surface de la sole totale de tournesol sur les bassins considérés (expertise des techniciens de coopérative). A partir de 2008, compte tenu des faibles surfaces concernées par le travail superficiel et les rotations longues, il a été décidé de ne retenir que le facteur « potentiel du milieu » et ses trois modalités (élevé, moyen, faible).

Les réseaux ont ensuite été construits de façon à ce que les parcelles soient distribuées en nombre aussi égal que possible dans les 2 bassins de collecte et dans les 3 niveaux de potentiel du milieu par bassin. Ce potentiel du milieu est défini à partir des rendements habituels déclarés par les agriculteurs sur les parcelles, en tournesol et/ou blé dur et/ou blé tendre (par exemple, moins de 20 q/ha en tournesol en milieu à faible potentiel et plus de 28 q/ha en milieu à fort potentiel). Au sein de chacune de ces 3 classes, une grande variabilité de systèmes et de conduites de cultures a été recherchée.

Le choix a également été fait de limiter le nombre de variétés représentées (2 ou 3 variétés de type oléique chaque année) pour limiter la fonte d'effectif lors de la segmentation de l'échantillon. Les variétés ont été choisies de façon à présenter des potentiels de teneur en huile différents. Parmi ces variétés, la variété NK Countri, présente les 3 années et bien caractérisée vis-à-vis du modèle de culture SUNFLO, a permis d'établir des comparaisons inter-annuelles des performances des différents types de parcelles.

2.1.2 Construction et test des itinéraires techniques « améliorants » en 2009

Les itinéraires techniques « améliorants » ont été construits en interaction entre les partenaires du projet et les deux coopératives, sur la base des résultats des enquêtes conduites en 2007 et 2008, des connaissances acquises par ailleurs par les partenaires du projet (expertise, résultats expérimentaux...), des simulations SUNFLO sur différents éléments de l'itinéraire technique et du positionnement technique des coopératives.

Les parcelles ont été distribuées en nombre aussi égal que possible dans les deux bassins de collecte, dans les trois niveaux de potentiel du milieu par bassin et dans les deux types d'itinéraires techniques (« classique » et « améliorant »).

2.1.3 Observations réalisées et renseignements recueillis sur les parcelles du réseau

Toutes les parcelles ont fait l'objet d'observations et de mesures à des stades clés de la culture. Les variables à observer ont été choisies selon 2 critères : leur pertinence vis-à-vis des variables à expliquer (rendement et teneur en huile) et leur possibilité d'acquisition avec une charge en travail raisonnable. Les observations ont porté sur la topographie de la parcelle et son hétérogénéité, la structure du peuplement, l'enherbement, l'état sanitaire et les symptômes de carences nutritionnelles. Le rendement parcellaire et un échantillon de graines (prélevé par les agriculteurs, au moment de la récolte, pour la détermination de la teneur en huile) ont été recueillis auprès des agriculteurs pour chaque parcelle. La détermination de la teneur en huile a été réalisée selon la méthode RMN en double au Laboratoire du CETIOM à Ardon). Chaque année, quelques parcelles ont fait l'objet d'un suivi plus approfondi au cours d'une visite supplémentaire pour réaliser les observations suivantes : profondeur de sol, suivi d'indice foliaire (début floraison et 20 à 30 jours plus tard).

Elles ont été choisies en fonction de leur pertinence vis-à-vis du travail de simulation avec SUNFLO: homogénéité et absence de facteurs limitants non pris en compte par le modèle (topographie simple, faible enherbement et peuplement régulier). Sur certaines parcelles, la prise en compte de l'hétérogénéité intra-parcellaire a conduit à distinguer 2 ou 3 zones homogènes. Chaque zone a fait l'objet de toutes les observations mentionnées précédemment. En complément de ces observations agronomiques sur les parcelles, une enquête auprès des agriculteurs a permis de recueillir des informations sur l'histoire culturale de chaque parcelle, ainsi que les pratiques culturales de l'année.

En 2009, le respect par les agriculteurs concernés des itinéraires techniques « améliorants » n'a pas été aussi fidèle qu'espéré, malgré de fréquents contacts. Il n'a donc pas été possible de se baser sur la répartition initialement prévue des parcelles pour comparer les itinéraires techniques. Une méthode de classement *a posteriori* des pratiques effectivement mise en œuvre a été mise au point. Elle a finalement été appliquée à l'ensemble des parcelles suivies depuis 2007 dans l'objectif de vérifier l'hypothèse suivante : les parcelles dont la conduite de culture s'approche le plus d'une conduite optimale telle que définie par les partenaires du projet obtiennent en moyenne les meilleures performances (rendement, teneur en huile, marge brute).

Deux types de classement ont été adoptés :

- Un classement sur une base technique : itinéraire technique au moins conforme au conseil ; les pratiques « de luxe » par rapport au conseil ne sont pas pénalisées ;
- Un classement sur une base économique : itinéraires techniques conformes au conseil ; les pratiques « de luxe » par rapport au conseil générant des charges supplémentaires sont pénalisées.

Ce classement a été élaboré grâce un système de notation permettant d'évaluer l'écart entre les pratiques mises en œuvre par les agriculteurs et l'itinéraire technique « améliorant ». Ce système repose sur cinq éléments de la conduite de culture pondérés par expertise : l'implantation, le désherbage, la fertilisation azotée, la protection fongicide et la fertilisation boratée. La note globale de 40 (note maximale) équivaut à une conformité totale à l'itinéraire technique conseillé.

Chaque année, les parcelles ont ainsi été réparties *a posteriori* en 3 groupes de conduite de culture selon la note qui leur a été attribuée : « conduite classique », « conduite intermédiaire » ou « conduite améliorante ». Une analyse factorielle des correspondances a été réalisée chaque année afin d'identifier les principales sources de variation du rendement et de la teneur en huile. Des comparaisons de moyennes ont également été réalisées après segmentation de l'échantillon selon des critères variés : variété, potentiel du milieu, densité de peuplement, type d'itinéraire technique (« classique », « améliorant »).

2.2 Principaux résultats sur la compréhension de la variabilité de la collecte

2.2.1 Principaux facteurs explicatifs de la variabilité des rendements et des teneurs en huile identifiés d'après l'analyse statistique

Les facteurs explicatifs du rendement le plus souvent identifiés sont :

- Le potentiel de production du milieu qui traduit principalement le type de sol et du niveau de réserve utile en eau
- La densité et l'hétérogénéité du peuplement
- L'alimentation en azote
- Les aspects d'infestation par les maladies et de protection fongicide
- Le niveau d'enherbement

Les deux principaux éléments qui influencent la teneur en huile sont le choix variétal et la densité de peuplement. Certaines de ces sources de variabilité vont maintenant être analysées de façon plus détaillée. Il ne faudra toutefois jamais perdre de vue que dans le cadre d'enquêtes, ce type d'analyse

facteur par facteur peut générer des confusions d'effet dans la mesure où l'on ne peut pas travailler toutes choses égales par ailleurs.

2.2.2 Des rendements très variables au sein d'une année donnée et entre années

Les rendements¹ réalisés sur les trois campagnes varient de 8 à 37 q/ha (figure 2). La valeur moyenne sur les 3 ans est de 25 q/ha. Chaque année, l'amplitude observée entre les rendements les plus faibles et les plus élevés est de l'ordre de 20 q/ha et le niveau des rendements diffère entre les campagnes. Les rendements de 2009 sont notamment très inférieurs à ceux de 2007 et 2008 (de 4 à 5 q/ha), du fait de la contrainte hydrique plus forte qui a caractérisé cette campagne (figure 3). Au total, seulement 16 % des parcelles atteignent des rendements supérieurs à 30 q/ha.

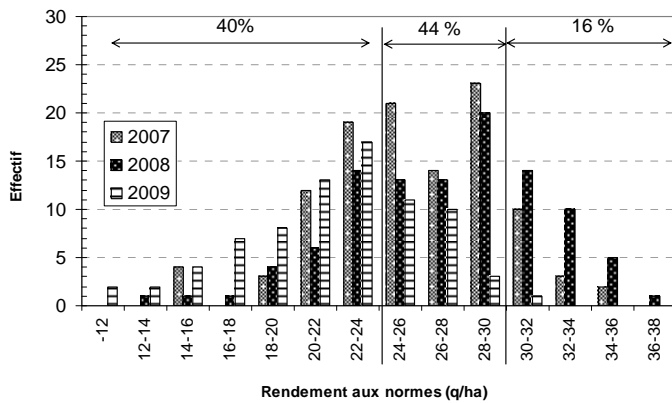
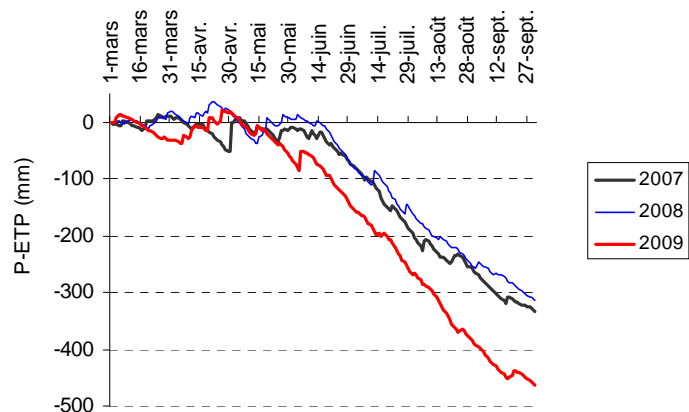


Figure 2 : Distribution des rendements de l'ensemble des parcelles suivies en 2007, 2008 et 2009 (297 parcelles représentées)

Année	Rendement moyen (q/ha)
2007	26.0
2008	27.2
2009	21.9
3 ans	25.3

Figure 3 : Evolution moyenne du déficit hydrique pour chaque campagne (cumul journalier des écarts entre les précipitations « P » et l'évapotranspiration potentielle « ETP » du 01/03 au 30/09 ; station d'En Crambade)



2.2.3 Un fort effet du milieu et de la conduite sur la teneur en huile

En raison du fort effet de la variété sur la teneur en huile, les distributions sur 3 ans de cette variable ne sont présentées que sur la variété NK Countri, étudiée chaque année (figure 4). La teneur en huile moyenne des graines sur les 3 ans est de 42 %. Chaque année, la variabilité observée est de l'ordre de 10 points d'huile entre les parcelles les plus basses et les plus hautes. Il s'agit d'un résultat classique également observé sur des variétés plus riches en huile (figure 5) : la variabilité liée à l'environnement et à la conduite de culture est donc très supérieure à la variabilité liée à la variété qui est au maximum de 4 ou 5 points d'après les essais d'évaluation variétale conduits par ailleurs par le Cetiom et de 3

¹ : Les rendements et les teneurs en huile seront toujours exprimés aux normes commerciales, sur la base de graines avec 2 % d'impuretés et 9 % d'humidité.

points parmi les variétés suivies dans cette étude (figure 5). Il ne suffit donc pas de semer une variété riche en huile pour obtenir une teneur en huile élevée : il existe une marge de progrès importante au niveau de la conduite de culture. Dans notre référentiel, l'effet « année » est à l'origine d'un écart allant jusqu'à 2 points d'huile en moyenne (41 % en 2009 et 43 % en 2007).

Les teneurs en huile de la variété NK Countri obtenues dans cette enquête sont dans l'ensemble très inférieures à la norme commerciale de 44% (seulement 16% des parcelles pour lesquelles la teneur en huile des graines est supérieure à ce seuil), mais cette variété ne figure pas parmi celles connues pour leur forte teneur en huile.

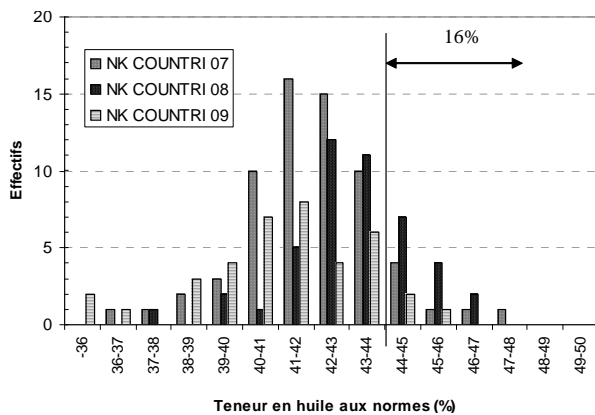


Figure 4 : Distribution des teneurs en huile des parcelles suivies en 2007, 2008 et 2009 semées avec la variété NK Countri (148 parcelles représentées)

Année	Teneur en huile moyenne (%)
2007	42.0
2008	43.1
2009	41.1
3 ans	42.1

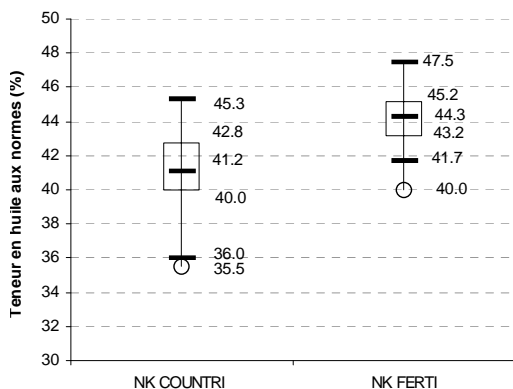


Figure 5 : Distribution des teneurs en huile en fonction de la variété (exemple des résultats 2009) ; étiquettes des boîtes à moustaches du bas vers le haut : symbole rond si existe : valeur atypique ; trait horizontal : valeur minimale hors valeurs atypiques ; bas du rectangle : 1^{er} quartile sur l'ensemble de l'effectif ; trait horizontal dans le rectangle : médiane ; haut du rectangle : 3^{ème} quartile ; trait horizontal : valeur maximale hors valeurs atypiques ; symbole rond si existe : valeur atypique).

2.2.4 Effet du potentiel du milieu sur le rendement

Le potentiel du milieu est un facteur important de la variabilité du rendement. Ceci est illustré à partir des données acquises en 2008 (figure 6) qui sont représentatives de la tendance sur les 3 années de l'étude. Un écart de 7 à 8 q/ha est observé entre les milieux à faible potentiel et les milieux à potentiel moyen et élevé qui se distinguent peu entre eux. Il convient toutefois de remarquer que des rendements du niveau de ceux atteints dans les milieux à potentiel élevé peuvent être obtenus dans les milieux à potentiel faible. Cela illustre la difficulté à classer les milieux *a priori*, mais aussi l'intérêt d'un itinéraire technique de qualité même sur les sols à faible potentiel.

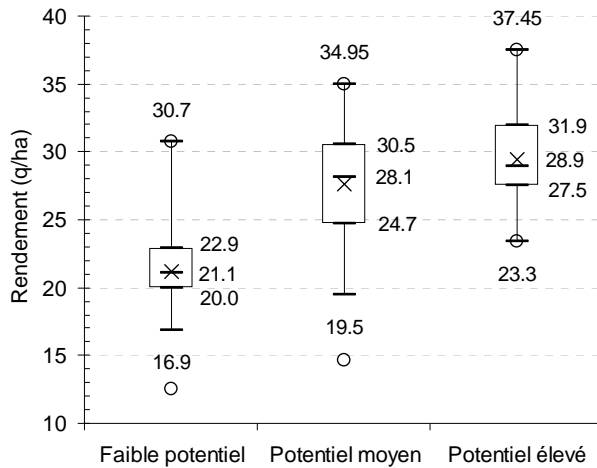


Figure 6 : Distribution des rendements aux normes selon le potentiel du milieu en 2008 (même légende que figure 5)

2.2.5 Des structures de peuplement souvent limitantes

Les densités de peuplement moyennes sont de l'ordre de 45000 plantes/ha en 2007 et 2009 et de 50000 plantes/m² en 2008. Chaque année, la gamme de variation de ces densités est large : par exemple de 30000 à 58000 plantes/m² en 2009 (mises à part 2 parcelles encore moins denses ; figure 7). Selon l'année d'étude, de 11 à 30 % des parcelles présentent une densité inférieure à 40000 plantes/m².

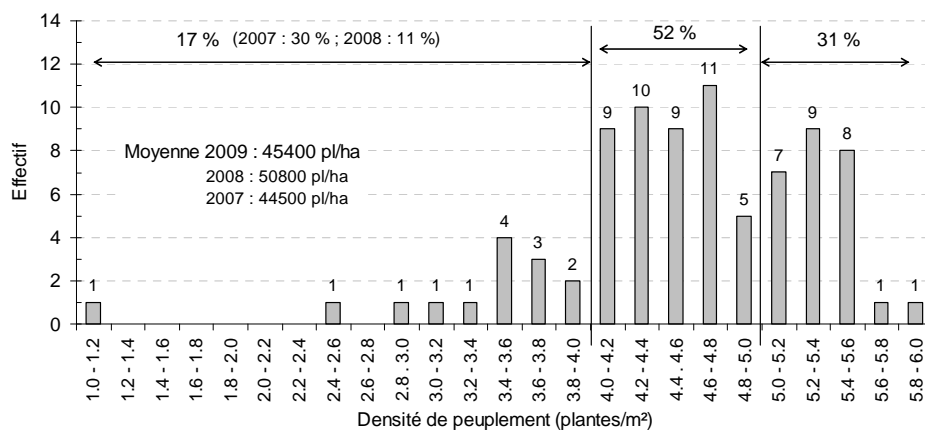


Figure 7 : Distribution des densités de peuplement en 2009

Des expérimentations conduites par ailleurs en micro-parcelles ont montré que des densités supérieures à 50000 plantes/ha étaient la plupart du temps suffisantes pour atteindre de hauts niveaux de rendement, en situation de peuplement homogène. Mais en parcelles agricoles, ces niveaux de peuplement sont souvent associés à des taux de perte à la levée élevés donc à de fortes hétérogénéités spatiales du peuplement (tableau 1).

Les peuplements à faibles densités et hétérogènes sont limitants pour le rendement et la teneur en huile comme l'illustre la figure 8 issue de l'exploitation des données acquises pendant les 3 ans de l'étude sur la variété NK Countri. En deçà de 40000 plantes/ha, il est rare d'atteindre un rendement supérieur à 25 q/ha. La probabilité d'obtenir ce rendement augmente avec la densité de peuplement. Au-delà de 55000 plantes/ha, il est rarement observé de rendement inférieur à 25 q/ha en sols moyens et profonds. Ce comportement est peu dépendant de la variété étudiée.

L'effet de la densité de peuplement sur la teneur en huile est plus inattendu et n'avait jamais été signalé auparavant. En situation de peuplement peu homogène, une densité de 55000 plantes/ha semble nécessaire pour espérer atteindre une teneur en huile élevée (supérieure à 42 % pour la variété NK

Countri) quel que soit le type de sol. En deçà de ce seuil, le risque de réduction de la teneur en huile augmente rapidement. En dessous de 40000 plantes/ha, il devient très rare d'atteindre les 42 % de teneur en huile. Ce comportement ne semble toutefois pas concerner toutes les variétés, puisque par exemple NK Ferti en 2009 semble insensible à la densité de peuplement (figure 9).

Tableau 1 : Corrélation entre la densité de peuplement et son hétérogénéité (enquête 2009)

	Densité de semis moyenne (graines/ha)	Densité de peuplement moyenne (plantes/ha)	Taux de perte à la levée moyen (%)	Effectif
Peuplement régulier	58360	53490	8	5
Faible absence de pieds avec des manques de 1 ou 2 plantes	59320	48900	18	34
Absence de pieds avec des trous de 4 à 5 plantes consécutives	58900	45600	22	22
Absence de pieds avec des trous de plus de 2 m ²	59910	40080	33	19

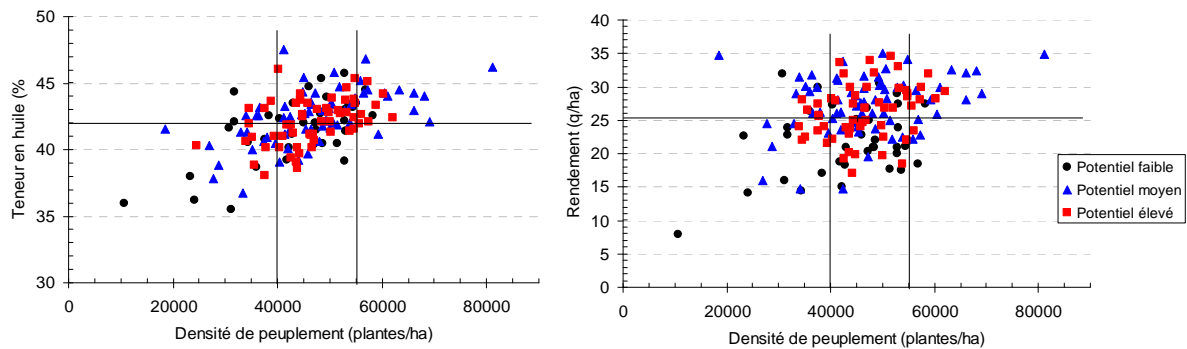


Figure 8 : Corrélation entre la densité de peuplement et le rendement (gauche) ou la teneur en huile (droite) ; variété NK Countri pendant 3 ans (triangles noirs : potentiel faible ; losanges bleus : potentiel moyen ; carrés roses : potentiel élevé)

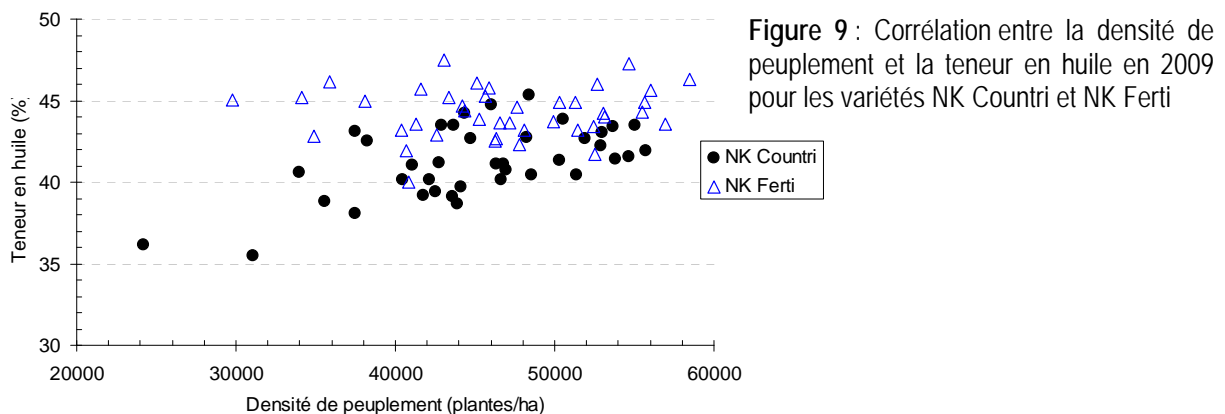


Figure 9 : Corrélation entre la densité de peuplement et la teneur en huile en 2009 pour les variétés NK Countri et NK Ferti

Les résultats d'un travail de décorticage des graines réalisé sur les échantillons collectés en 2008 contribuent à expliquer comment la densité de peuplement influence la teneur en huile, *via* le taux de coques de la graine. Une forte corrélation négative entre teneur en huile et taux de coques de la graine a en effet été mise en évidence (figure 10), le taux de coques étant lui-même dépendant de la densité de peuplement. Cet effet passe probablement par une modification de la structure des graines issues de cultures à peuplement faible et irrégulier : graines plus grosses, avec une part de coques (dépourvue d'huile) plus grande.

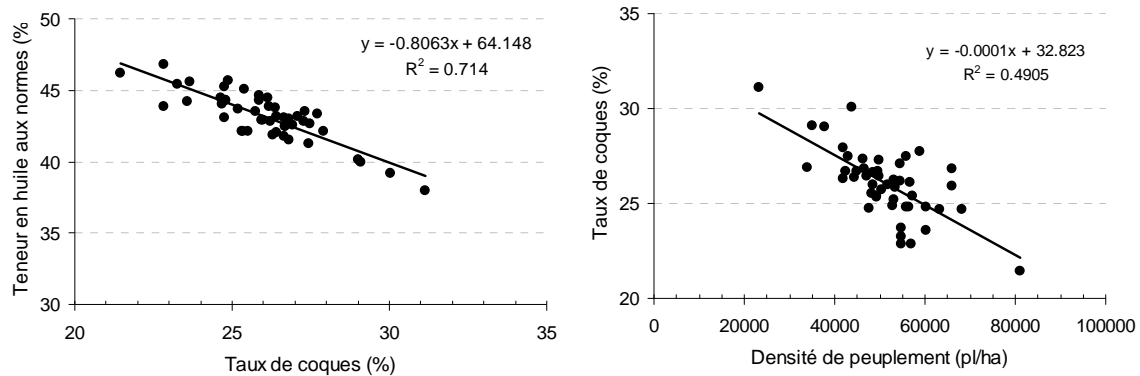


Figure 10 : Corrélations entre la teneur en huile, le taux de coques des akènes et la densité de peuplement (NK Countri, 2008)

2.2.6 Alimentation azotée : l'excès d'azote est préjudiciable à la teneur en huile

Ce point permet d'illustrer l'intérêt de l'utilisation de SUNFLO en appui au diagnostic *a posteriori*. Un indice de contrainte azotée cumulée de la levée à la floraison (CCN) a été calculé avec ce modèle après simulation de chacune des parcelles du réseau 2009. Une relation négative se dessine entre le niveau d'alimentation azotée et la teneur en huile pour la variété NK Countri, mais ne se manifeste pas pour la variété NK Ferti (figure 11). On retrouve donc de nouveau à ce niveau des spécificités variétales. Ce résultat confirme que la fertilisation azotée doit être ajustée sans excès de façon à concilier productivité et teneur en huile.

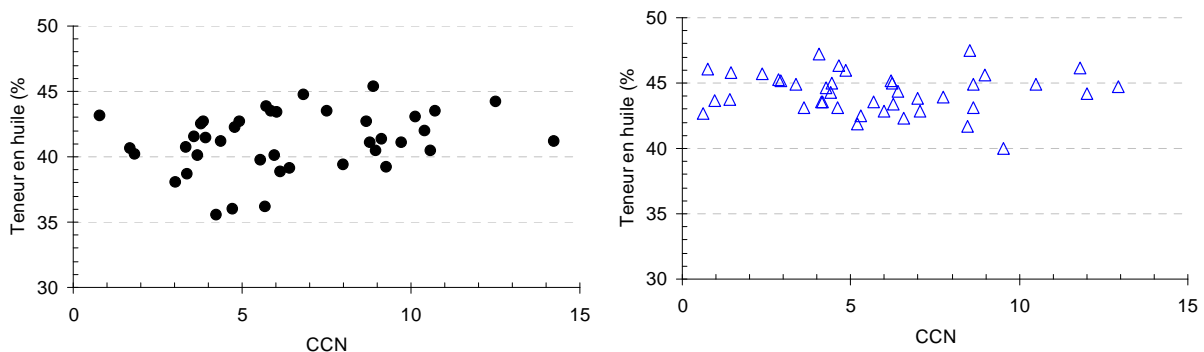


Figure 11 : Corrélations entre la teneur en huile et un indicateur de contrainte azotée cumulée (CCN) calculé avec SUNFLO en 2009 pour NK Countri (à gauche) et NK Ferti (à droite) (CCN = cumul journalier de (1-Indice de Nutrition azotée) de la levée jusqu'à la floraison ; si CCN=0 : pas de contrainte azotée)

La dose d'azote apportée par les agriculteurs sur chacune des parcelles d'enquête a été comparée à la dose « conseil » calculée à l'aide du logiciel Epiclès développé par Invivo. Il apparaît que sur 63 % des parcelles, la quantité d'azote apportée s'éloigne de plus de 20 kg N /ha de la dose conseillée. Il y a une tendance à la surfertilisation : 39 % des parcelles reçoivent une dose supérieure de plus de 20 unités à la dose « conseil » et seulement 23 % reçoivent une dose inférieure de plus de 20 unités à la dose « conseil ». Sur 30 % des parcelles, la dose apportée s'éloigne de la dose « conseil » de plus de 40 kg N /ha (20 % en plus et 10 % en moins).

2.2.7 L'indice foliaire : un bon indicateur du fonctionnement de la culture

Chez le tournesol, l'indice foliaire est reconnu depuis longtemps comme un bon indicateur du fonctionnement de la culture. Il s'agit toutefois d'une variable difficile à acquérir sur le terrain car les mesures allométriques classiques sont coûteuses en temps et de ce fait ne peuvent être réalisées que sur quelques plantes ce qui les rend peu représentatives de grandes surfaces surtout lorsqu'elles sont hétérogènes.

Elles n'ont donc pas été mises en œuvre au cours de cette étude. Les mesures indirectes à l'aide de capteurs de rayonnement au sol sont plus rapides et couvrent une surface plus grande, mais sont souvent trop imprécises, et restent trop lourdes pour être réalisées sur un nombre élevé de parcelles. Pour avoir accès à cette variable sur un nombre élevé de parcelles, nous avons eu recours à l'imagerie satellitale dans le cadre d'une collaboration avec le CESBIO². Huit images ont été acquises de mi-mai à fin août 2009 sur le secteur de collecte de Terres de Gascogne. Le traitement de ces images a permis d'estimer l'indice foliaire des parcelles de l'enquête à chaque date. Il apparaît une corrélation positive entre l'indice foliaire estimé au début de la floraison (non présenté) ou la durée de surface foliaire à partir de la floraison (cumul de l'indice foliaire journalier du début de la floraison à maturité) (figure 12) et le rendement. Les indices foliaires estimés sont un peu faibles par rapport à ceux mesurés sur le terrain, ce qui indique que le travail de calage de la méthode doit être poursuivi. En revanche, en valeurs relatives, les résultats sont corrects : les situations sont bien classées.

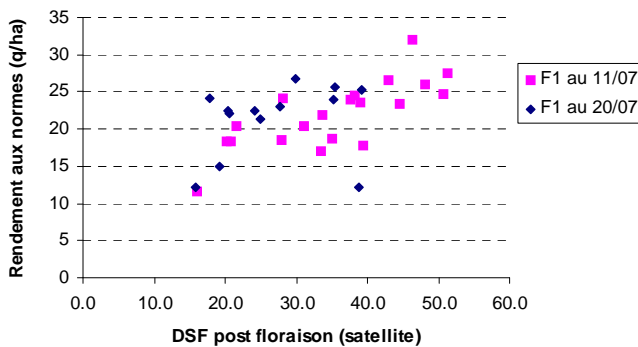


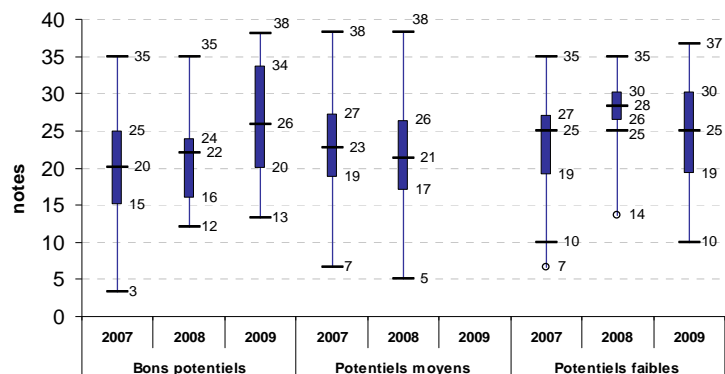
Figure 12 : Corrélation entre la durée de surface foliaire (DSF) du début de la floraison à la maturité et le rendement, selon la date de début de floraison (F1) (parcelles du Gers en 2009)

Ce travail nous a permis de mettre en évidence l'intérêt de l'imagerie satellitale en appui à la réalisation d'un diagnostic à l'échelle d'un bassin. Il confirme également l'importance de la dynamique de mise en place et de régression de l'indice foliaire dans le cadre de l'élaboration du rendement du tournesol. Tout ce qui favorise la mise en place et la persistance de l'indice foliaire (alimentation hydrique, état phytosanitaire...) sera favorable au rendement. En revanche, aucune relation n'a pu être mise en évidence avec la teneur en huile.

2.3 Test d'itinéraires techniques améliorants

A la lumière du diagnostic réalisé en 2007 et 2009, des itinéraires techniques supposés « améliorants » ont été construits (en fonction de la coopérative, de la variété et du type de sol). L'itinéraire technique de chaque parcelle enquêtée de 2007 à 2009 a été comparé à ces itinéraires techniques et une note de conformité lui a été attribuée (cf page 4). Pour chaque combinaison « année x potentiel du milieu » les notes techniques s'étalent de 13 à 35 (sur 40). Il existe donc une grande diversité d'itinéraires techniques (figure 13). Par la suite, seuls sont présentés les résultats obtenus en regroupant les données des trois années de diagnostic agronomique et en ne s'intéressant qu'à NK Country, seule variété présente chaque année. Cette restriction ne modifie que très peu la diversité des itinéraires techniques.

Figure 13 : Distribution des notes techniques par potentiel de milieu et par année (note minimale = 0, note maximale = 40) (même légende que figure 5)



² : CESBIO : Centre d'études spatiales de la biosphère, Toulouse

En milieu à potentiels faible et moyen, la moyenne des rendements des parcelles appartenant à la classe de conduite la plus conforme à l'itinéraire technique améliorant (groupe « améliorant ») est de 1,5 à 2 q/ha supérieure à celle des parcelles les moins conformes (groupe « limitant ») (figure 14). Il apparaît une tendance inverse en milieu à potentiel élevé. Dans les situations de potentiel fort et de potentiel faible, un gain moyen d'environ 1 point de teneur en huile est observé pour le groupe « améliorant » par rapport au groupe « limitant » (figure 14). Dans les situations à potentiel moyen, aucune différence n'est observée. Il convient de remarquer que dans tous les cas, les écarts-types sont élevés et les effectifs faibles, en particulier en milieu à faible potentiel.

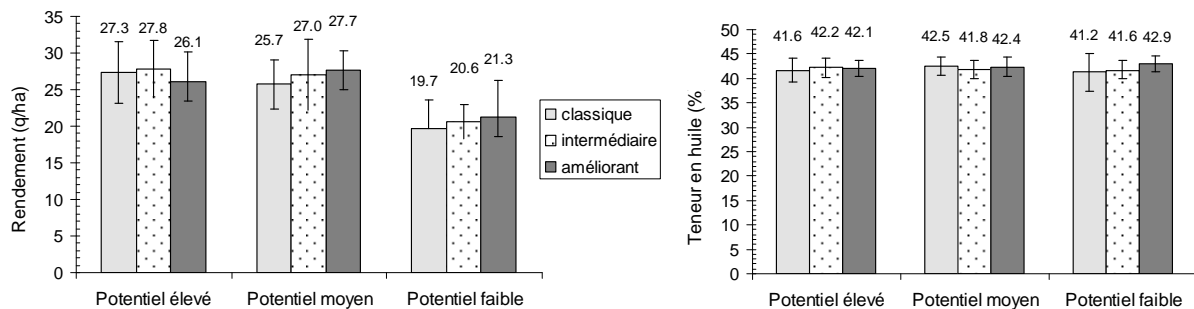


Figure 14 : Comparaison des rendements moyens (à gauche) et des teneurs en huile moyennes (à droite) entre groupes de conduite de culture (3 ans, NK Countri) par classe de potentiel du milieu

2.4 Conclusion

Le travail de diagnostic réalisé dans le cadre du suivi d'un réseau de parcelles d'agriculteurs a permis de mettre en évidence une grande variabilité du rendement et de la teneur en huile au sein de bassins de collecte et d'en identifier les principales sources grâce à l'utilisation conjointe d'informations recueillies auprès des agriculteurs, d'observations sur la culture au sol et par voie satellitale et de la modélisation. Pour ce faire, des protocoles ont été produits, ainsi qu'une méthode de construction de réseau de parcelles. Ce travail a permis de dégager des voies de progrès qui ont été formalisées sous forme de propositions d'itinéraires techniques « améliorants ». Un test de ces itinéraires techniques a été réalisé en vraie grandeur sur la base d'une méthodologie qui se voulait simple et qui est donc très certainement perfectible (choix des critères de classement pris en compte et du système de notation). Une autre difficulté réside dans le fait que ce travail a été réalisé en conditions réelles, sur un réseau de parcelles d'agriculteurs, sans que nous puissions maîtriser l'itinéraire technique, donc avec une grande variabilité des autres éléments de la conduite que ceux évalués. Malgré cela, une légère tendance à l'amélioration des résultats a été observée en moyenne grâce à l'adaptation des pratiques. Cette connaissance des principaux facteurs de variabilité nous a permis d'engager la construction d'un prototype d'outil informatique de simulation de la collecte à l'échelle d'un bassin permettant de rendre compte des interactions « variété x milieu x conduite de culture » vis-à-vis du rendement et de teneur en huile et de tester différentes stratégies de production.

3. COLLECTO : outil de simulation des interactions « variété x milieu x conduite de culture » à l'échelle du bassin de collecte

L'objectif de ce travail était de mettre au point un simulateur de la production en quantité et en qualité (teneur en huile) à l'échelle d'un bassin de collecte, représentant au mieux :

- Sa diversité de milieux et de pratiques,
- Les principales interactions entre la variété, le milieu et la conduite de culture, en vue de tester des scénarios d'amélioration de la production à une échelle agrégée

Le cahier des charges de l'outil a été construit à la lumière du recueil des besoins réalisé auprès des coopératives associées au projet.

Trois attentes principales vis-à-vis de ce type d'outil ont été exprimées :

- Test de stratégies de production : par exemple quel est le meilleur compromis entre teneur en huile et productivité au niveau du choix variétal ? Quelle variété avec quel itinéraire technique sur tel type de milieu pour tel type de débouché ?
- Prévision de la collecte (en rendement et teneur en huile), évolutive tout au long de la campagne (en « temps réel »)
- Outil pédagogique pour permettre aux techniciens d'illustrer (de démontrer) auprès des agriculteurs le gain permis par une technique

3.1 COLLECTO : le modèle SUNFLO associé à des modules périphériques

L'élément central de COLLECTO est le modèle SUNFLO auquel ont été associés trois modules complémentaires : un module de changement d'échelle (de la parcelle au bassin de collecte), un module de prise en compte des facteurs limitants non pris en charge par SUNFLO et un module de calculs économiques (figure 15).

- Le moteur de calcul est le modèle de culture spécifique au tournesol SUNFLO³ V1 développé conjointement par l'INRA et le Cetiom. Une version a été finalisée et « stabilisée » dans le cadre de ce projet. Le modèle présente l'avantage de ne nécessiter que peu de données d'entrée, de plus relativement simples d'acquisition ou de caractérisation dans le cadre d'un travail de typologie d'un bassin de collecte. Il travaille au pas de temps journalier, à l'échelle de la situation homogène et simule entre autres variables, le rendement et la teneur en huile. Il rend compte de la dimension variétale et représente les interactions « variétés x environnement x conduite ». Il prend en compte les facteurs limitants liés à la température, au rayonnement et à l'alimentation hydrique et azotée de la culture.

- L'option choisie pour prendre en charge le changement d'échelle, de la situation homogène (domaine d'utilisation de SUNFLO) à la diversité des situations au sein d'un bassin de collecte (domaine d'utilisation de COLLECTO) est de type agrégatif, sur la base d'une typologie plus ou moins simplifiée du bassin. Cette typologie des climats, types de sol et des conduites de culture doit au préalable être établie à partir de bases de données et/ou de l'expertise des techniciens locaux. Elle doit être structurée sur la base des besoins en données d'entrée de COLLECTO. La surface que représente chaque situation de la typologie (« situation type ») à l'échelle du bassin doit également être estimée. Lorsqu'une simulation est réalisée avec COLLECTO sur un bassin, SUNFLO calcule le rendement et la teneur en huile pour chaque situation type. Une moyenne pondérée au prorata de la surface de chaque situation type est calculée pour obtenir des résultats moyens à l'échelle du bassin.

- Afin de pouvoir rendre compte des effets de facteurs limitants non pris en charge dans la version actuelle de SUNFLO (maladies, carence en bore...), un module de modulation des sorties de SUNFLO a été inclus dans COLLECTO. Ces facteurs sont intégrés sur la base de fonctions de nuisibilité qui doivent être paramétrées par l'utilisateur sur la base de la littérature et/ou de l'expertise (exemple : sur telle situation type, le phomopsis entraîne une perte de rendement moyenne de 3 q/ha, 2 années sur 10). Ces fonctions de corrections ne sont pas intégrées dans SUNFLO. Elles s'appliquent sur les sorties du modèle : rendement et teneur en huile.

- Un module « économique » (facultatif) permet de calculer les marges brutes simplifiées du point de vue des agriculteurs et du point de vue de l'organisme d'approvisionnement et de collecte, pour chaque situation type et à l'échelle du bassin.

³ : Pour plus de précisions, se reporter à l'intervention de P. Debaeke sur le modèle Sunflo « Evaluer les interactions variété-milieu-conduite en tournesol »

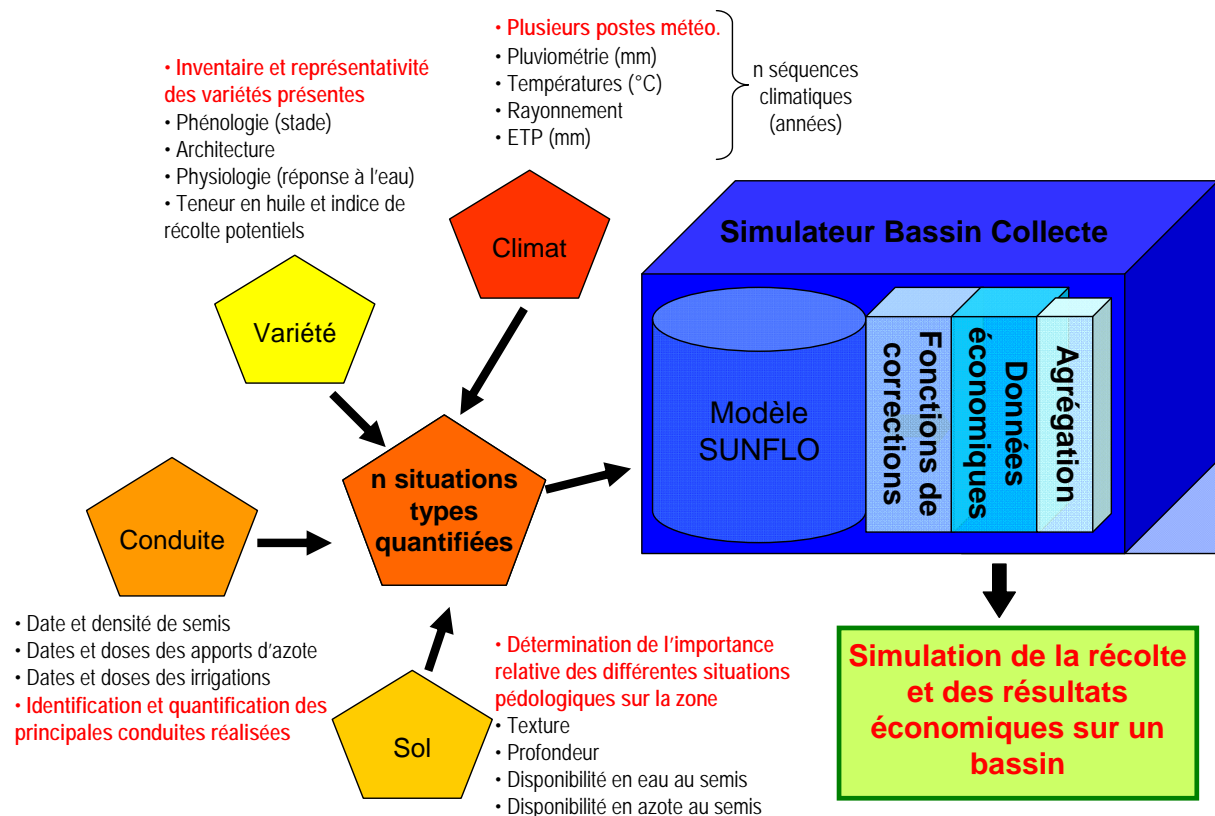


Figure 15 : Schéma de construction de COLLECTO

3.2 Comment utiliser COLLECTO

Les principales données d'entrée de COLLECTO sont :

- Les données météorologiques journalières : température, rayonnement, précipitations, évapotranspiration potentielle
- La variété décrite à l'aide de paramètres génotypiques phénologiques, architecturaux et éco-physiologiques nécessaires au modèle ; pour paramétrer de nouvelles variétés, ces éléments sont mesurables sur des expérimentations
- *Via* des paramètres génotypiques phénologiques, architecturaux et éco-physiologiques mesurables ; une base de données de variétés de référence est incluse dans COLLECTO
- Des éléments de conduite de culture ; date et densité de semis et/ou de levée, dates et doses d'apport de fertilisation azotée et d'irrigation
- La description du sol en 2 couches (de 0 à 30 cm et de 30 cm à la profondeur maximale d'enracinement) : teneur en eau à la capacité au champ et au point de flétrissement, taux de cailloux, densité apparente, vitesse potentielle de minéralisation de l'azote, reliquat d'azote minéral initial et teneur en eau initiale
- Les données économiques (facultatives) :
 - o Du point de vue des agriculteurs : coût des intrants (semences, N, P, K, B, pesticides, eau...), prix de vente de la récolte
 - o Du point de vue de l'organisme économique : barème de valorisation de la teneur en huile, marges sur la vente des intrants, marge sur le stockage...

A ce jour, les données d'entrée élaborées telles que la vitesse potentielle de minéralisation ou la teneur en eau à la capacité au champ doivent être déterminées en amont par la mesure ou à l'aide de tables ou de modèles de calcul indépendants (fonctions de pédotransfert).

A terme, il est prévu d'intégrer de telles fonctions dans COLLECTO pour en faciliter l'utilisation.

La construction du bassin de collecte à simuler suit plusieurs étapes :

- Déclaration des variétés (une base de données de référence est proposée)
- Description des conduites et association d'une variété à chaque conduite
- Description des sols
- Sélection des climats (d'après une base de données climatiques alimentée par l'utilisateur)
- Construction de situations types : association de conduites, de sols et de climats (1 situation type = 1 combinaison) et définition des états initiaux du sol (N et eau)
- Construction de bassins : association de situations types (1 bassin = n situations types), affectation d'un pourcentage de surface à chacune et déclaration des données économiques.

Les simulations peuvent être lancées pour une ou plusieurs années climatiques. Dans ce dernier cas, COLLECTO génère des sorties (tableaux exportables sous tableur et graphiques) par année ainsi que les moyennes interannuelles. Les effets des facteurs limitants gérés par le module de correction du rendement et de la teneur en huile ne sont calculés que sur la moyenne pluriannuelle car leur prise en compte intègre une dimension fréquentielle.

Les sorties sont de deux ordres :

- Performance : rendement, teneur en huile, marges brutes (facultatif)
- Diagnostic : quelques indicateurs de fonctionnement de la culture issus de SUNFLO (indice de nutrition azotée au début de la floraison, indice intégré de stress hydrique pour 3 phases du cycle)

3.3 Les domaines d'utilisation de COLLECTO

COLLECTO peut bien entendu être utilisé dans le cadre de sa vocation première, à savoir tester différentes stratégies de production à l'échelle d'un bassin de collecte. Le schéma agrégatif choisi pour le changement d'échelle permet de traiter différentes échelles de bassin (l'exploitation agricole, les bassins de collecte, le département, la région...) dès lors que l'utilisateur est capable de proposer une typologie relativement simple du cas choisi. Une variante de cet usage est l'utilisation de COLLECTO comme outil de prévision de la collecte en cours de campagne. Il suffit alors de l'alimenter avec le climat réel jusqu'à la date de simulation, puis avec un ou plusieurs scénarios climatiques prévisionnels à partir de cette date. COLLECTO peut également permettre de réaliser des simulations avec le modèle SUNFLO de façon plus simple dès lors que l'on ne s'intéresse qu'aux sorties de rendement et de teneur en huile. Il est par exemple possible de créer des situations types correspondant à différentes modalités d'un essai (« variété », « irrigation », « dose d'azote »...) réel ou fictif et d'analyser le comportement du modèle ou de comparer les résultats simulés et observés. Il est également possible de tester des variétés fictives en jouant sur les paramètres variétaux et ainsi de définir des idéotypes pour différents types de conditions de culture. COLLECTO est accessible *via* une interface web (figure 16).



Figure 16 : Page de crédits de l'interface web de COLLECTO



Il a été entièrement construit sur la plateforme de modélisation « Record » développée par l'INRA (<http://record.toulouse.inra.fr>). Dans la mesure où il s'agit d'un prototype, il n'est pas encore en libre-service. Dans le cadre de sa première phase de déploiement, il pourra être utilisé par les agents du Cetiom, de l'INRA et d'Invivo, en interaction avec des organismes d'approvisionnement et de collecte.

4. Travaux de mise au point d'une méthode simple de détermination de la teneur en huile des graines à la collecte

La construction de meilleures façons de produire pour atteindre des rendements et des teneurs en huile plus élevés grâce aux actions de diagnostic et à l'utilisation d'outils de simulation tels que COLLECTO est une étape nécessaire. Toutefois, elles ne pourront être mises en application par les agriculteurs que si ces derniers y trouvent un intérêt direct. Concernant la teneur en huile, le système de rémunération actuel est peu incitatif puisqu'il est la plupart du temps collectif. Un système de rémunération individuel des agriculteurs en fonction de leurs propres résultats serait plus stimulant. Sa mise en place serait grandement facilitée s'il existait une méthode de détermination de la teneur en huile simple, rapide et économique et réalisée pour chaque benne livrée. Dans l'idéal, cette analyse devrait être effectuée au silo, dès la livraison, plutôt que dans un laboratoire ce qui implique un délai de quelques jours. En effet, l'analyse immédiate serait beaucoup plus pédagogique vis-à-vis des producteurs et permettrait un allotement de façon à constituer des lots particulièrement riches en huile qui pourraient trouver une valorisation économique supérieure. Une analyse différée, dans un laboratoire, permettrait la mise en place d'une rémunération individualisée, mais ne permettrait pas l'allotement. De plus, cela générerait une charge supplémentaire (gestion d'un circuit d'expédition d'échantillons, coût de l'analyse...). Dans le cadre de cette étude, les deux voies ont été étudiées : la première en collaboration avec la société Chopin Technologies et la seconde avec le laboratoire de InVivo (Inzo Laboragro). Les deux méthodes étudiées font appel à la technologie de spectrophotométrie infra-rouge (rapide et économique par rapport aux méthodes de référence) mais avec des appareils différents en matière de coût d'acquisition et de complexité d'utilisation.

Le travail a principalement été réalisé à partir des échantillons de graines collectés au cours des trois années d'enquête du projet ainsi que de graines issues d'essais « irrigation » du Cetiom pour élargir la gamme de variabilité (de l'ordre de 400 échantillons en tout). A la fin de chaque campagne, les échantillons ont été centralisés au laboratoire d'analyses de graines du Cetiom où chacun d'eux a été divisé en 3 sous-échantillons (procédure standard). Ceux-ci ont été distribués, avec (2007) ou sans séchage et nettoyage préalables (2008 et 2009), à chaque partenaire :

- 1 sous-échantillon a été conservé par le laboratoire du Cetiom pour la détermination de la teneur en huile par résonance magnétique nucléaire (RMN) (NF EN ISO 10565)
- 1 sous-échantillon a été envoyé à Chopin Technologies
- 1 sous-échantillon a été adressé à Inzo-Laboragro

4.1 Analyse au silo, dès la livraison (collaboration avec Chopin Technologies)

L'appareil utilisé est l'Infranéo qui présente l'avantage d'être déjà utilisé dans de nombreux silos pour la détermination de la teneur en protéines des céréales. Il travaille en transmittance sur une gamme de longueurs d'ondes allant de 850 à 1048 nm (gamme qui n'est pas la plus informative vis-à-vis de la teneur en huile car initialement, cet appareil n'a pas été développé pour cela).

Trois types de matrices ont été étudiés : graines entières non séchées et non nettoyées (telles qu'à la livraison au silo), graines entières non nettoyées et non séchées broyées et graines décortiquées nettoyées et non séchées. Les essais pratiqués sur graines entières, puis sur graines broyées ont révélé un certain nombre de contraintes matérielles, méthodologiques ou pratiques, de sorte que le

projet s'est finalement concentré sur un protocole de mesures sur graines décortiquées. Le choix a été fait d'estimer la teneur en huile sur graines sèches en faisant les mesures avec l'Infranéo sur des graines décortiquées humides. Lors de la même mesure, sont donc déterminées la teneur en eau des graines décortiquées et leur teneur en huile. La teneur en eau est très bien estimée ($r^2 = 0.97$ en validation de la courbe de calibration élaborée).

La corrélation entre les valeurs de teneur en huile mesurées par RMN et les valeurs prédites par analyse en spectrophotométrie infrarouge est encourageante ($r^2 = 0.63$). Les teneurs en huile des échantillons ayant servi à développer cette calibration sont comprises entre 40 et 55 %. Les résultats de la validation indépendante de la calibration confirment les performances encourageantes obtenues en développement de calibration ($r^2 = 0.71$, pente = 1.32, ordonnée origine = -16.4) sur une gamme de teneur en huile allant de 41 à 55 % (23 échantillons ; 41 spectres, les spectres étant collectés deux fois par échantillon après rotation de la chambre). Le décortiquage a été réalisé à l'aide d'un dispositif mis au point par Chopin Technologies. Celui-ci fonctionne sur le principe de la meule actionnée manuellement, le décortiquage s'effectuant par frottement. Les graines décortiquées sont ensuite prélevées manuellement et individuellement à l'aide d'une pince et introduites dans la cuve d'analyse de l'Infranéo. L'ensemble des opérations dure environ 5 minutes par échantillon. Un test de faisabilité de la méthode (décortiquage + dosage avec l'Infranéo) a été réalisé dans un organisme de collecte. La rapidité et la facilité pour sélectionner les graines décortiquées et remplir la cuve d'analyse puis analyser avec l'Infranéo sont jugées satisfaisantes. Seules quelques suggestions ont été formulées, concernant notamment l'automatisation du processus de décortiquage.

En conclusion du travail, la calibration « teneur en huile sur graines décortiquées » apparaît être une voie prometteuse. Il reste encore à évaluer plus précisément la robustesse de la méthode. Ce travail est poursuivi par Chopin Technologies.

4.2 Analyse au laboratoire (collaboration avec Inzo Laboragro-Groupe InVivo)

Le spectromètre infrarouge à transformée de Fourier utilisé par Laboragro est un MPA de la marque Bruker. Cet instrument travaille en réflectance dans une gamme de longueurs d'ondes allant de 800 à 2500 nm. Il s'agit d'un appareil de laboratoire qui ne peut pas être utilisé dans un silo. Des échantillons supplémentaires ont été ajoutés au référentiel pour élargir les gammes de variabilité des teneurs en eau et en huile. Deux types de matrices ont été étudiés : graines brutes (non séchées et non nettoyées) entières ou broyées. Le travail sur graines entières a été rapidement abandonné car, comme dans les travaux menés par Chopin Technologie, les résultats se sont vite révélés non concluants. La coque est responsable d'une forte atténuation du signal en raison de son épaisseur et de sa couleur sombre. Les impuretés éventuellement présentes dans l'échantillon peuvent perturber le spectre en raison du signal atypique qu'elles génèrent. Le laboratoire Inzo-Laboragro disposait déjà depuis plusieurs campagnes de ses propres courbes de calibration sur graines broyées pour la teneur en eau et la teneur en huile. Les valeurs de référence ont été déterminées par Inzo Laboragro, par étuvage pour la teneur en eau et par extraction à l'hexane pour la teneur en huile. Les corrélations obtenues sont étroites ($r^2 = 0.95$) pour la teneur en eau sur 407 échantillons et $r^2 = 0.97$ pour la teneur en huile sur 483 échantillons) (figure 17).

Une validation de ces courbes de calibration a été réalisée avec des échantillons indépendants pour lesquels les valeurs de référence ont également été déterminées par étuvage et par extraction à l'hexane. Les relations entre valeurs mesurées et valeurs prédites sont très étroites : $r^2 = 0.87$ pour la teneur en eau (84 échantillons) et $r^2 = 0.94$ pour la teneur en huile (90 échantillons) (figure 18).

Inzo-Laboragro propose aujourd'hui cette offre d'analyse par spectrophotométrie infrarouge, plus rapide et moins coûteuse que la méthode de référence d'extraction à l'hexane

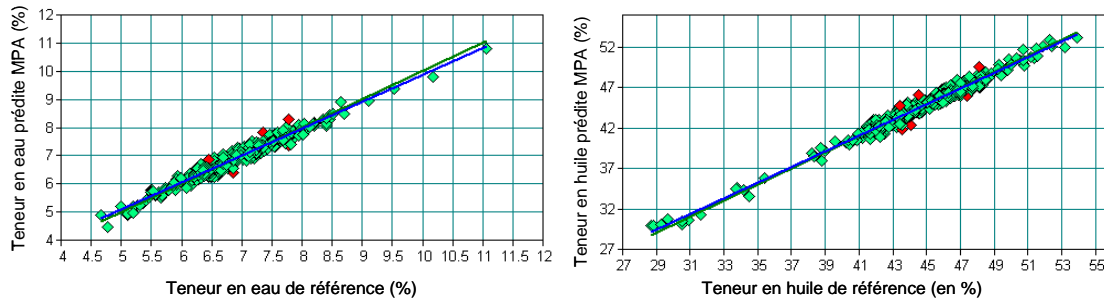


Figure 17 : Construction des courbes de calibration : corrélations entre les teneurs en eau de référence (étuvage) et les teneurs en eau déterminées avec le MPA sur graines broyées (à gauche ; $r^2 = 0.95$) et entre les teneurs en huile de référence (extraction à l'hexane) et les teneurs en huile déterminées avec le MPA sur graines broyées (à droite ; $r^2 = 0.97$)

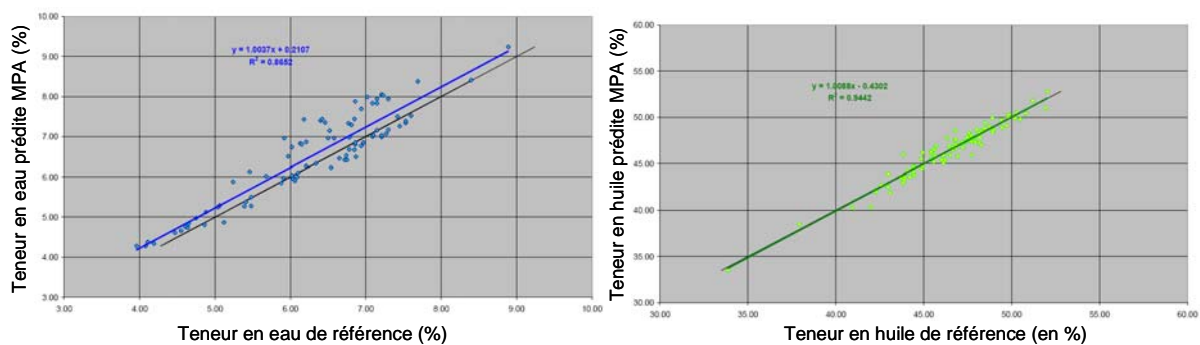


Figure 18 : Validation des courbes de calibration : corrélations entre les teneurs en eau de référence (étuvage) et les teneurs en eau déterminées avec le MPA sur graines broyées (à gauche ; $r^2 = 0.87$) et entre les teneurs en huile de référence (extraction à l'hexane) et les teneurs en huile déterminées avec le MPA sur graines broyées (à droite ; $r^2 = 0.94$)

5. Conclusion et perspectives

Ce projet a contribué à la mise au point d'outils et de méthodes mobilisables dans le cadre d'une démarche d'amélioration de la production du tournesol à l'échelle d'un bassin de collecte. La démarche de diagnostic alliant la collecte d'informations sur les itinéraires techniques auprès d'un échantillon d'agriculteurs, la consultation des experts locaux, l'observation de parcelles sur le terrain, l'utilisation de la modalisation permet de dresser l'état des lieux initial d'un bassin de collecte (typologie des sols, climats et conduites, identification des principaux facteurs limitant la production et identification de voies de progrès). A l'avenir, ce travail devrait être grandement facilité grâce au développement des services informatisés dans le monde agricole qui conduit à la constitution de bases de données pluriannuelles de plus en plus documentées qui pourront être mobilisées pour de telles études et alléger le travail d'enquête. Ce projet a également montré l'intérêt potentiel de l'apport de la télédétection satellitale pour le diagnostic à l'échelle d'un bassin, ce qui permettrait également d'alléger la démarche. Le prototype de l'outil informatique COLLECTO peut d'ores et déjà être utilisé pour tester différentes stratégies de production au sein d'un bassin. Le choix du modèle agrégatif pour le changement d'échelle (de la parcelle homogène au bassin dans sa diversité) le rend utilisable à diverses échelles : exploitation, bassin de collecte plus ou moins complexe, région... Différentes voies d'amélioration de cet outil vont être suivies :

- Amélioration de la prédiction du rendement et de la teneur en huile par SUNFLO : une thèse va démarrer sur ce thème en 2011

- Élargissement de la gamme de facteurs limitants pris en compte par SUNFLO : une thèse est en cours
- Amélioration de la structuration informatique de COLLECTO en particulier au niveau de la gestion des bases de données
- Enrichissement des listes de références : variétés, sol, conduites
- Construction de modules d'aide à la détermination des données d'entrée (fonctions de pédotransfert, estimation des teneurs en eau et des reliquats d'azote minéral du sol initiaux...)

Enfin, la piste de l'analyse rapide au silo, dès la livraison, avec un appareil de type Infranéo reste à consolider avant de pouvoir en envisager un développement. Ce travail est poursuivi par Chopin Technologies. La voie de l'analyse rapide et économique dans un laboratoire à l'aide d'un appareil plus sophistiqué a permis d'aboutir à une méthode fiable et utilisable. Il s'agit donc d'une solution alternative d'ores et déjà disponible.

Remerciements aux coopératives qui ont participé activement à l'animation des groupes d'agriculteurs et facilité la collecte des informations sur le terrain.

Références bibliographiques

Le Bail M., 2002. Le bassin d'approvisionnement : territoire de la gestion agronomique de la qualité des productions végétales. *In* : Agronomes et Territoires, Entretiens du Pradel, 13 p.

Champolivier L., Kichey S., Reau R., Le Bail M., 2004. An analysis of the economical effects of crop management modifications in order to improve the sunflower oilseed content at the scale of a primary elevator supplying area. 16th International Sunflower Conference, Fargo, USA, 1, 207-212.

Champolivier L., Reau R., 2005. Améliorer la richesse en huile des oléagineux pour répondre aux besoins du marché. *Oléoscope*, 82, 10-13.

Casadebaig P., 2008. Analyse et modélisation des interactions génotype - environnement - conduite de culture : application au tournesol (*Helianthus annuus*). Thèse de Doctorat de l'Université de Toulouse, Paris, France, 195 p.

Debaeke P., Champolivier L., Jouffret P., Lecomte V., Salvi F., Thibierge J., Vogrincic C., 2010. A model to simulate sunflower oilseed production on the supplying area of an agricultural cooperative. Proc. 11th ESA Congress, AGRO2010, Montpellier, pp 873-874.

Casadebaig P., Guilioni L., Lecoœur 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, 2, 63-178.