

## CARABIOT - Comment mieux caractériser les stress abiotiques dans les réseaux d'essais variétaux

Bernicot M.H.<sup>1</sup>, Masson F.<sup>1</sup>, Mistou M.N.<sup>2</sup>, Bagot P.<sup>1</sup>, Maupas F.<sup>3</sup>, Lorgeou J.<sup>4</sup>, Mailhol J.C.<sup>5</sup>, Gauffreteau A.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> GEVES Domaine de l'Anjouère La Pouëze, F-49370 Erdre-en-Anjou

<sup>2</sup> INRA UMR Agronomie, Avenue Lucien Brétignières, F-78850 Thiverval-Grignon

<sup>3</sup> ITB, 45 Rue de Naples, F-75008 Paris

<sup>4</sup> Arvalis-Institut du végétal, F-91720 Boigneville

<sup>5</sup> IRSTEA, Rue Jean-François Breton, F-34090 Montpellier

Correspondance : [fabien.masson@geves.fr](mailto:fabien.masson@geves.fr)

### Résumé

L'objectif de ce projet est de mettre au point des outils d'aide à la caractérisation des essais d'évaluation des variétés, en vue de d'acquérir des co-variables environnementales décrivant aux différentes phases du cycle cultural le climat ainsi que les ressources en eau et en azote de ces milieux. La stratégie privilégiée est d'utiliser des modèles de simulation disponibles chez les partenaires du projet. Ce projet, a donc associé des organismes développeurs de modèles (INRA, IRSTEA, Instituts techniques) et de potentiels utilisateurs (GEVES, Obtenteurs, Instituts techniques). Il a permis aux utilisateurs de se familiariser à l'utilisation de ces modèles de culture.

**Mots-clés** : Essais, Diagnostic agronomique, Stress abiotiques, Modèles de culture

### Abstract: Carabiot project: how to better characterise the abiotic stress in variety trial networks

The objective of this project is the development of tools to help to characterize variety evaluation trials, in order to acquire environmental co-variables describing the climate, as well as the water and nitrogen resources of these environments, at the different phases of the crop cycle. The chosen strategy is to use simulation models available from the project partners. This project involved model development organizations (INRA, IRSTEA, Technical Institutes) and potential users (GEVES, Breeders, Technical Institutes). It allowed users to familiarize themselves with the use of these culture models.

**Keywords**: Trial, Agronomic diagnosis, Abiotic stress, Crop model

### Introduction

Mieux décrire le comportement des variétés face aux principaux stress environnementaux (bioagresseurs, climat, eau, azote...) est une nécessité pour aider à leur positionnement et leur mode d'emploi dans les différents contextes de culture de plus en plus variés en raison de l'évolution du climat et des modalités de production. Cette caractérisation des tolérances variétales aux principaux stress peut se faire dans des essais spécifiques où le type et le niveau de stress sont a priori contrôlés : par exemple, des essais en contaminations artificielles ou naturelles forcées pour l'évaluation de la tolérance à une maladie ou des essais avec plusieurs régimes hydriques ou azotés. Elle peut aussi se faire par une analyse fine de l'interaction génotype x environnement x conduite (IGEC) dans un réseau d'essais multi-sites construit pour couvrir *a priori* la diversité des principales conditions agro-climatiques des zones de

culture. Pour réaliser cette analyse des IGEC, une étape préalable et indispensable est de disposer d'une **caractérisation suffisante du milieu expérimental** de chacun des sites d'essais.

Le projet Carabiot avait pour objectif de mettre en œuvre et comparer différentes méthodes de caractérisation de l'environnement abiotique d'essais variétés. Le choix a en effet été fait de **se focaliser sur les stress abiotiques** car, comparativement aux stress biotiques, les essais dédiés sont plus rares et l'on cherche donc à valoriser les IGEC sur un réseau multi-sites pour progresser dans la connaissance du comportement des variétés vis-à-vis de ces stress. De plus, il y a un besoin d'accompagnement méthodologique pour la description des stress abiotiques dans les essais variétés alors que les notations de symptômes d'attaque de différents bioagresseurs permettent de décrire les stress biotiques.

Ces méthodes pour la caractérisation abiotique des milieux d'évaluation visent à acquérir des **co-variables environnementales** décrivant en dynamique le climat ainsi que les ressources en eau et en azote de ces milieux. Différentes voies sont possibles pour estimer ces co-variables environnementales : (i) la première consiste à utiliser des capteurs permettant une mesure précise et dynamique de l'état du milieu. Cette solution n'a pas été retenue à l'époque de la construction du projet (2011-2012) même si depuis, il a été observé une multiplication des instruments proposés sur le marché, dont certains auraient peut-être pu répondre à des questions de Carabiot ; (ii) la seconde est **le recours à des modèles** de culture. C'est cette dernière approche qui a été mise en œuvre dans Carabiot car moyennant une description *a minima* du milieu et en général quelques mesures simples sur des variétés témoins, elle présente l'avantage de ne pas exiger un niveau d'instrumentation supplémentaire que ce soit en termes d'équipement en capteurs ou de mesures lourdes à réaliser par les expérimentateurs.

La question des stress purement climatiques (excès ou déficit de température, déficit de rayonnement) pose peu de problèmes méthodologiques hormis l'accès à des modèles stades qui permettent de positionner l'événement au cours des phases de croissance et le choix de la localisation de la station d'acquisition des données météorologiques. En revanche, les stress engendrés par l'état hydrique ou azoté de la parcelle d'essai sont plus complexes à estimer car ils nécessitent de connaître les propriétés hydriques du sol. Une action du projet a par conséquent porté sur l'amélioration de la connaissance de ce compartiment avec en particulier l'objectif de proposer une ou des méthodes permettant **d'estimer plus précisément la réserve utile**, donnée d'entrée de tous les modèles.

Le projet Carabiot a associé des équipes proposant des méthodes (description du sol, modèles) et des évaluateurs de variétés utilisateurs potentiels des outils proposés pour caractériser les contraintes abiotiques dans leurs réseaux. A travers l'implication de différents maillons de l'évaluation des variétés (Obtenteurs, GEVES, Instituts techniques), l'objectif était de proposer des recommandations et méthodes communes de caractérisation des stress abiotiques dans les essais variétés, ce qui est un élément favorable au croisement de données dans le cadre d'un continuum d'évaluation variétale entre les différents acteurs.

C'est aussi dans cette optique de partage et mutualisation d'expériences que différentes espèces ont été travaillées dans le projet : le Blé tendre d'hiver, le Maïs grain, le Sorgho grain, le Colza oléagineux d'hiver, la Betterave sucrière et le Pois de printemps.

## 1. Acquisition de données de caractérisation des sols

Cette première action a porté sur l'amélioration de la connaissance du compartiment sol avec, en particulier, l'objectif de proposer une ou des méthodes permettant d'estimer plus précisément la RU et de définir la RU des différentes situations expérimentales du projet.

### 1.1 Démarche utilisée

La méthodologie retenue pour caractériser la RU des sites expérimentaux étudiés dans le projet est celle définie dans le programme « Estimation des RU de parcelles d'essais variétés » du GIS GC HP2E,

programme financé par FranceAgrimer. Cette méthode associe valorisation des données existantes et prospection sur le terrain. La RU est déterminée en tenant compte, pour les différents horizons, de la densité apparente, des humidités à la capacité au champ et au point de flétrissement et de leur profondeur ainsi que de la teneur en éléments grossiers.

A la différence du précédent programme, cette méthode n'a pas été mise en œuvre par un pédologue mais par un technicien du GEVES n'ayant pas de connaissance particulière en pédologie. On peut donc considérer l'action conduite dans Carabiot comme un test de la faisabilité de cette méthodologie par un non spécialiste.

## 1.2 Prospections réalisées

L'objectif était de caractériser les sites expérimentaux entrant dans le programme. Les sites déjà prospectés lors du programme FranceAgrimer (sites maïs et sorgho essentiellement) n'ont pas fait l'objet d'une seconde prospection même si les parcelles expérimentales des années 2013 et 2014 n'avaient pas été caractérisées. Il a été fait le postulat que les expérimentateurs de ces essais pouvaient fournir une estimation de la RU fiable à partir des résultats de cette étude.

Vingt sites ont été prospectés en 2013 et 2014, avec pour la plupart des sites la description chaque année de la parcelle en expérimentation. Le nombre de parcelles a été réduit en 2014 ; en effet il n'y a pas eu de deuxième campagne de mesures (i) pour le site ayant de fortes remontées capillaires du fait de l'inadaptation de la méthode à ces milieux, (ii) sur certains sites où les sols, des limons très profonds, donnent lieu à des RU très élevés et enfin (iii) sur les sites où il était impossible de faire un profil.

## 1.3 Conclusions sur la faisabilité de la démarche utilisée

Les personnes en charge de cette prospection ont rencontré différents obstacles.

La première est la difficulté à mobiliser les données existantes sur le sol quand on travaille sur de nombreux sites couvrant une grande diversité de situations en France. Ces données existantes ne sont pas facilement accessibles, et les données pédologiques ne sont guère utilisables par un non pédologue et ne correspondent pas souvent aux variables d'intérêt pour un agronome (ici le RU). Il est probable que cette situation s'améliorera dans le futur du fait de l'action du RMT Sols et Territoires (<http://www.sols-et-territoires.org>) et du projet ANR RUEdesSOLS (<https://www6.inra.fr/rue-des-sols>) qui ont pour objectif de favoriser l'accès aux connaissances déjà acquises sur les sols, en particulier le paramètre RU.

La seconde est la difficulté à définir les horizons pédologiques dans les profils quand on n'a pas d'expérience de pédologue.

La troisième difficulté est la prise en compte des sols caillouteux. Il n'est pas simple d'estimer précisément le taux de cailloux, leur nature (pour identifier s'ils peuvent contenir de l'eau) ainsi que leur densité apparente.

En dernier lieu, la difficulté d'organiser le calendrier des prospections laisse présager des observations et prélèvements faits dans des conditions non optimales, c'est-à-dire trop sèches ou trop humides. De plus, le manque d'expérience et d'expertise ne permet pas d'avoir un œil critique sur les données.

Les résultats sont en demi-teinte par rapport aux moyens déployés. Cette méthode doit être mise en œuvre par une personne expérimentée pour s'assurer que toutes les étapes soient réalisées dans les meilleures conditions. Elle ne peut être utilisée en routine dans le cadre de réseau d'évaluation des variétés où les sites sont nombreux, et pour partie non pérennes.

### 1.4 Conclusions et perspectives pour mieux documenter le compartiment sol dans un réseau d'étude des variétés

Le minimum serait qu'un expérimentateur puisse facilement rattacher sa parcelle à un sol type issu d'un référentiel et à partir duquel il sera possible de récupérer des valeurs moyennes habituellement rencontrées dans ce sol type pour les principaux paramètres physiques, en particulier la réserve utile. Le GEVES utilisera le référentiel sol d'Arvalis qui est déjà en partie connecté au système de gestion des résultats des essais CTPS. Un applicatif permettant d'aider l'expérimentateur à se positionner à partir de critères simples (cailloux, calcaire, texture, hydromorphie, profondeur de blocage de la tarière) sera rapidement relié au fichier de saisie.

L'utilisation des caractéristiques des sols types du référentiel ne permettra pas cependant d'être très précis dans la détermination des caractéristiques du sol de la parcelle d'essai. Une des possibilités pour avoir une estimation plus fine de la réserve utile d'une parcelle est la réalisation d'analyses granulométriques sur les différentes profondeurs du sol qui pourraient être réalisées sur des échantillons collectés au moment des prélèvements de sol pour le reliquat sortie hiver, puis l'utilisation de fonctions de pédo-transfert les plus adaptées au contexte pédologique. Les dossiers expérimentaux permettront d'enregistrer ces analyses.

Il est également indispensable de capter l'expertise de l'expérimentateur et de lui donner les moyens de l'accroître. L'animation des réseaux d'évaluation des variétés doit prévoir des formations pour les acteurs du réseau (gestionnaires des réseaux, homologateurs, et expérimentateurs) et transmettre les avancées du groupe thématique Sol du GIS GC-HP2E, du RMT Sols et Territoires ainsi que le projet ANR RUEdesSOLS.

## 2. Les indicateurs retenus pour caractériser l'offre climatique et les stress abiotiques des sites expérimentaux

Lors de ce programme, les partenaires du projet ont défini les indicateurs (Tableau 1) pour mesurer l'offre climatique et les stress abiotiques ressentis par les plantes dans les différents essais. Les indicateurs retenus sont des indicateurs éprouvés pour prédire le rendement. Ils sont calculés pour les différentes phases d'élaboration du rendement. Le travail a été fait espèce par espèce, mais de façon cohérente entre espèces.

Tableau 1 : Les indicateurs retenus

Indicateurs de l'offre climatique	Indicateurs de facteurs limitants origine climatique	Indicateurs de stress et statut hydriques	Indicateurs de stress et statut azoté
<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ Cumul des pluies</li> <li>◆ Cumul des pluies + irrigation</li> <li>◆ Rayonnement en Joules/m<sup>2</sup></li> <li>◆ Quotient photothermique (rayonnement cumulé / température moyenne)</li> <li>◆ Somme de température au seuil X°C</li> <li>◆ Température moyenne</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ Cumul des pluies + irrigation – ETP</li> <li>◆ Nb jours froid T<sub>min</sub> &lt; -X°C</li> <li>◆ Nb jours T<sub>max</sub> &gt; XX °C</li> <li>◆ Nb jours T<sub>moy</sub> &lt; X°C</li> <li>◆ Nb jours avec Rayonnement min &lt; 200 Cal/cm</li> <li>◆ Nb jours ETM &gt; X</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ ETR/ETM = somme ETR sur la période / somme ETM sur la période</li> <li>◆ Cumul Dh (mm manquant par rapport RU) = somme des différences ETR – ETM</li> <li>◆ Nb jours où ETR/ETM &lt; 1</li> <li>◆ Nb jours où ETR/ETM &lt; 0.8</li> <li>◆ Nb de jours où FTSW &lt; 0.8</li> <li>◆ Cumul Excès eau (mm dépassant la RU)</li> <li>◆ Nb jours où Etat Reserve Eau &lt; Reserve de Survie</li> <li>◆ + consommation réelle = ETR</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ INN en valeur absolue en fin de phase</li> <li>◆ Nb jours où INN &lt; 1</li> <li>◆ Nb jours où INN &lt; 0.8</li> <li>◆ ICDC = intensité * durée</li> <li>◆ Nb de jours durant lequel il y a stress pour l'indicateur propre au modèle</li> <li>+ Nabs (azote absorbé par la culture kg/ha)</li> </ul>
<p><i>Les nombres X et XX dépendent des espèces</i></p>			

Ces indicateurs sont calculés pour les différentes phases d'élaboration du rendement, en tenant également compte des phases de fortes sensibilités aux stress climatiques (Tableau 2) ; dans le cadre du projet Carabiot, ils n'ont pas été tous utilisés.

**Tableau 2** : Exemple des phases du cycle pour 3 espèces

Maïs	Pois	Betteraves
P1 : Semis à 10 feuilles visibles	P1 : Semis – initiation florale = Début floraison – 576 d°j)	P1 : du semis à la levée
P2 = Mise en place du peuplement : 10 feuilles (floraison – 450 d°j) à floraison – 250 d°j	P2 : Initiation florale – Début floraison observée (DF)	P2 : de la levée à la couverture complète du sol par les feuilles
P3 : Période de sensibilité pour la fertilité : floraison - 250 d°j à floraison + 250 d°j	P3 : Début floraison observée – début remplissage des grains (= DF + 260 d°j)	P3 : de la couverture foliaire à la récolte
P4 : Elaboration du PMG : floraison + 250 d°j à floraison + 750 d°j	P4 : Début remplissage des grains – Fin remplissage (DF + 610 d°j j)	P4 : ensemble du cycle

Pour tenir compte du décalage de précocité pouvant exister entre les variétés au sein d'un même essai (qui peut mener à des stress ressentis plus ou moins importants, certaines variétés pouvant échapper plus ou moins à ces stress), il est proposé de calculer ces indicateurs sur plusieurs variétés de rythme de développement couvrant la gamme de précocité des variétés en essai.

La pertinence de ces indicateurs pour mieux expliquer et comprendre l'interaction génotype environnement n'a pas été étudiée dans le cadre de ce projet, car cela était hors champ du financement accordé. Cependant, nous les avons utilisés pour classer les sites expérimentaux. Par exemple, les indicateurs issus du projet ont permis de classer les sites expérimentaux en betterave en 2015 et le classement produit est cohérent avec l'expertise des responsables du réseau.

### 3. Outils et modèles utilisés pour calculer les indicateurs

Les outils utilisés dans ce projet sont ceux couramment utilisés par les partenaires du projet (Instituts techniques, INRA, IRSTEA) pour tester des conduites innovantes par modélisation, suivre et piloter l'alimentation hydrique et azotée des cultures ou encore réaliser des diagnostics agronomiques *ex post* afin d'identifier les facteurs agro-climatiques ayant impacté le fonctionnement des cultures. C'est ce dernier usage qui est visé dans le cadre de ce projet.

Certains de ces modèles sont spécifiques à une espèce ou à quelques espèces, en particulier ceux développés par ou avec les Instituts techniques (Azofert, Irribet, Irrélis, Diacol, CHN), d'autres sont conçus pour pouvoir prendre en compte de nombreuses espèces (Azodyn, Pilote, BilHN).

Les modèles CHN, Azodyn, Pilote, BilHN sont des modèles fonctionnels à simulation journalière ;

CHN, modèle d'Arvalis, est développé pour les espèces de cet institut, blé et maïs actuellement. Il présente l'intérêt d'avoir une modélisation de la phénologie éprouvée, et d'être relié aux référentiels d'Arvalis (sols, météo, variétés) ;

Azodyn, BilHN et Pilote, modèles développés par la recherche publique s'inscrivent dans une logique de généralité. Cependant, pour être performants, ils nécessitent une calibration à l'espèce, parfois faite avec l'institut technique spécialisé de l'espèce ;

BilHN, outil conçu par un responsable d'un domaine expérimental, permet la prise en compte d'une expertise de l'état de la culture : qualité du travail du sol, vigueur de la levée, impact de bioagresseurs.

#### 4. Les essais supports du projet

Les essais utilisés dans ce projet sont une partie des essais conduits en 2013 et 2014 (années de récolte) dans le cadre des réseaux d'inscription du CTPS. Pour permettre la validation des modèles, des mesures supplémentaires ont été ajoutées au protocole habituel sur 2 variétés témoins.

Pour paramétrer les modèles, d'autres essais ont également été utilisés. Pour le pois, les essais du programme Peamust 2013-2014 (10 essais) et d'un précédent Casdar 2007-2010 (10 essais) ont été utilisés. Pour la betterave, des essais de l'ITB ont été mobilisés.

#### 5. Adaptation des modèles aux espèces étudiées

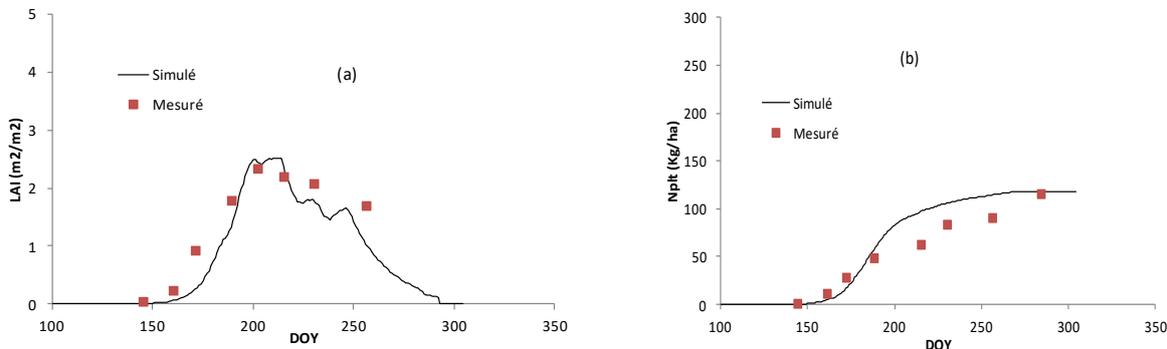
Le projet Carabiot a permis (i) de travailler à la mise au point de deux modèles de culture, Pilote pour la betterave et BilHN pour le pois, et (ii) de tester différentes versions d'Azodyn pour le colza (la V14 et la VRecord, version associée à la plateforme Record de l'INRA).

##### 5.1 Calibration de Pilote pour la Betterave

Le modèle Pilote a été calibré pour la betterave la première année du projet (Figure 1). Pour cela, des données expérimentales de l'ITB acquises en 1994, 2002 et 2010 ont été valorisées.

Les résultats de calibration pour la betterave sont satisfaisants : sur les 3 années et des fertilisations azotées très contrastées allant de 0 à 300 unités d'azote, la biomasse est prédite avec une erreur moyenne de 3.2 % et variant entre 0.3 et 10.2 %, l'azote absorbé est prédit avec une erreur moyenne de 7.7 % évoluant entre 0.7 et 20.4% selon la conduite et l'année.

Cette calibration a été utilisée par la suite dans le cadre du projet pour simuler des bilans hydriques et azotés sur chaque lieu d'essai.

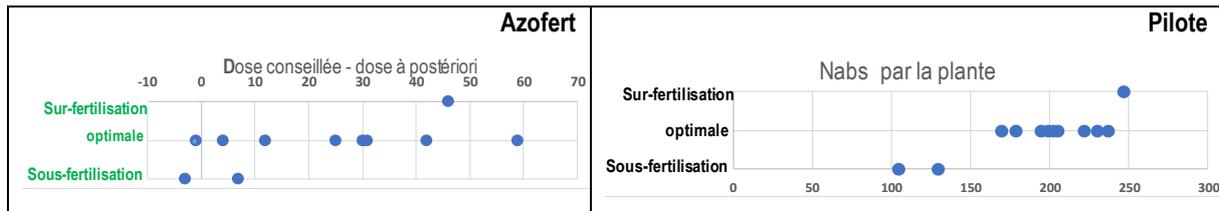


**Figure 1** : LAI (a) et absorption de l'azote (b) par la plante sur le traitement sous-fertilisé sans azote minéral en 1994

Le modèle Pilote a été ensuite comparé au modèle actuellement utilisé par l'ITB, Azofert. Les deux approches ont été comparées au diagnostic azote fait au champ sur la base du module azote implanté pour les 12 essais Carabiot. Le module azote est un petit dispositif expérimental implanté à côté de chaque essai CTPS, où la variété témoin reçoit trois doses d'azote, ce qui permet en fonction du rendement de déterminer si l'essai est à l'optimum de la fertilisation, en sous ou sur fertilisation.

Deux doses d'azote peuvent être fournies par Azofert : (i) la dose *a posteriori* qui correspond à celle simulée avec le climat réel de l'année jusqu'à la récolte et (ii) la dose conseillée *a priori* qui correspond à celle simulée en sortie d'hiver avant l'application de la fertilisation minérale azotée sur la base d'un climat moyen.

En considérant que le statut azoté calculé sur la base des modules azote correspond à la vérité terrain, les simulations obtenues avec le modèle Pilote et en prenant la variable simulée de quantité totale d'azote absorbée par la plante donnent les meilleurs résultats (Figure 2).



**Figure 2 :** Comparaison des résultats des modèles au diagnostic terrain (sous-fertilisation, optimale, sur-fertilisation) pour les 12 situations.

Pilote a montré de bonnes performances pour caractériser les lieux d'essais vis-à-vis du stress azoté.

Le modèle Pilote présente également plusieurs avantages : (1) il nécessite des données d'entrée facilement accessibles par les gestionnaires de réseaux d'essais variétés : une analyse de sol classique associée à une analyse de reliquats d'azote dans le sol avant le semis, réalisée sur trois horizons, et (2) il est libre d'accès.

Le modèle Pilote montre également des performances intéressantes pour caractériser les essais vis-à-vis du stress hydrique. Il en est de même pour le modèle Irribet de l'ITB.

## 5.2 Validation du bilan hydrique de BilHN pour le pois de printemps

Le stress hydrique étant le facteur limitant abiotique prépondérant de la culture du pois, l'objectif du projet pour l'espèce pois de printemps est d'évaluer la capacité du modèle BilHN à simuler les stress hydriques susceptibles d'impacter les essais et à les positionner par rapport aux stades de sensibilité de la culture. La plus-value de BilHN a été évaluée en comparant les sorties de simulation de ce modèle avec les simulations d'un bilan hydrique agro-climatique simplifié (Lhomme et Eldin, 1985) dans lequel la culture est représentée par un coefficient cultural  $K_c$  évolutif en fonction du stade de la culture ( $K_c=0.5$  de semis à 5 feuilles,  $K_c= 0.7$  de 5F-7F,  $0.9$  de 7F-9F,  $1$  de 9F-debfl,  $1.2$  de dflo-mat). Nous présentons des éléments de validation de ces bilans hydriques en comparant (1) les indicateurs de stress hydriques produits par ces 2 modèles aux mesures tensiométriques disponibles sur certains essais (et envisageables sur un réseau d'évaluation variétale) et (2) les biomasses simulées par BilHN aux mesures effectuées à floraison et récolte.

Sur l'ensemble des phases du cycle (Tableau 3), le rapport ETR/ETM simulé par BilHN est toujours supérieur (stress hydrique plus faible) à l'indicateur agro-climatique.

**Tableau 3 :** Situations présentant un stress hydrique selon le bilan agro-climatique et selon BilHN.

Phase de développement	Bilan agro-climatique		BilHN	
	Nb de situations où ETR/ETM < 0.8	ETR / ETM Min- max	Nb de situations où ETR/ETM < 0.8	Indicateur des besoins de satisfaction en eau TR_M Min- max
Semis-Init flo P1	7	0.61 - 0.79	0	0.91 - 0.98
Init flo – Dflo P2	12	0.36 - 0.77	1 (8%)	0.79 - 0.99
Dflo – Drem p P3	13	0.17 - 0.79	2 (15%)	0.57 - 1
Drem p - Fin rem p P4	20	0.08 - 0.79	12 (60%)	0.16 - 0.99
<b>Total</b>	<b>52</b>		<b>15 (28%)</b>	

La Figure 3, montrant les 2 variables simulées par BilHN en fonction de celles simulées par le bilan agro-climatique met en évidence que les ETR issus de BilHN (sauf en phase d'initiation florale) sont supérieurs et que l'ETM BilHN représente de 43 à 70% de celle obtenue par le bilan hydrique agro-climatique et semble plafonner à une valeur maximale d'environ 100 mm (contre 150 dans le cas du bilan agro-climatique).

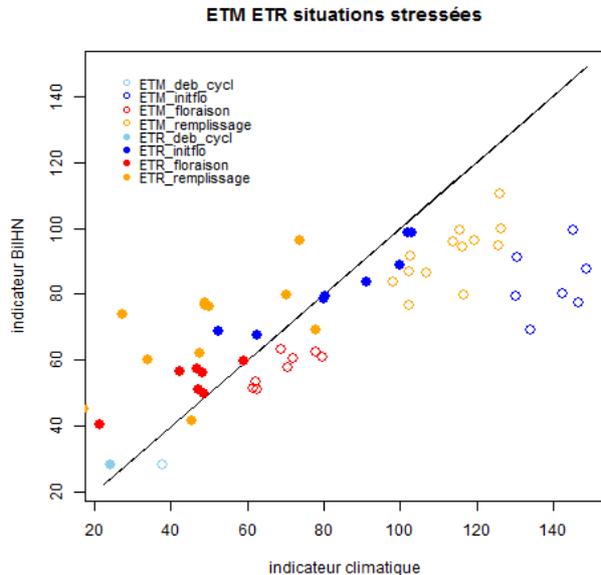


Figure 3 : Comparaison des ETR et ETM calculés

Ces différences s'expliquent notamment par une croissance progressive du couvert dans BilHN (contre  $Kc=0.5$  du semis à 5F pour le bilan agro-climatique) et par la prise en compte du stress hydrique passé sur le développement du couvert végétal dans le modèle BilHN contrairement à l'évolution du  $Kc$  fixé *a priori* dans le bilan agro-climatique, qui entraîne une valeur d'ETM plus élevée.

### 5.2.1 Comparaison à des données tensiométriques

On dispose de mesures tensiométriques effectuées à 30 et 60 cm de profondeur sur 12 essais de pois de printemps. Ces mesures sont réparties en 5 classes en fonction de leur signification en termes d'impact potentiel sur la plante : (1) 0-50 cb absence de stress (2) 50 – 70 cb stress léger (3) 70 -100 cb seuil d'irrigation (4) 100-130 et (5) 130-152 : impact possible sur la production de biomasse. La Figure 4 présente les distributions des valeurs de l'indicateur de satisfaction du besoin en eau de BilHN TR\_M (qui dépend de l'eau disponible dans le sol et du développement de la plante) (graph4.a) et du rapport ETR/ETM du bilan agro-climatique (graph4.b) correspondant aux classes tensiométriques définies. On observe une plus grande progressivité de l'indicateur de BilHN. L'indicateur climatique est trop sévère et peu discriminant en condition de stress faible (classes 2 et 3). TR\_M montre aussi une médiane peu différente entre ces 2 classes. En situations de stress plus marqué, BilHN simule un stress médian progressif de 0.7 à 0.5 alors que le bilan climatique atteint un niveau de stress maximal qui semble excessif considérant qu'à ces valeurs tensiométriques seule une partie de la réserve utile est consommée et que ces valeurs peuvent être abusives sachant que dans cette gamme les capteurs peuvent être désaturés. Par ailleurs, les valeurs tensiométriques ont été mesurées à des profondeurs inférieures à celles atteintes par les racines du pois. L'indicateur TR\_M est cohérent avec les mesures, une utilisation conjointe du modèle et de sondes tensiométriques sur une gamme de stress hydrique variée pourrait permettre de conforter ce résultat.

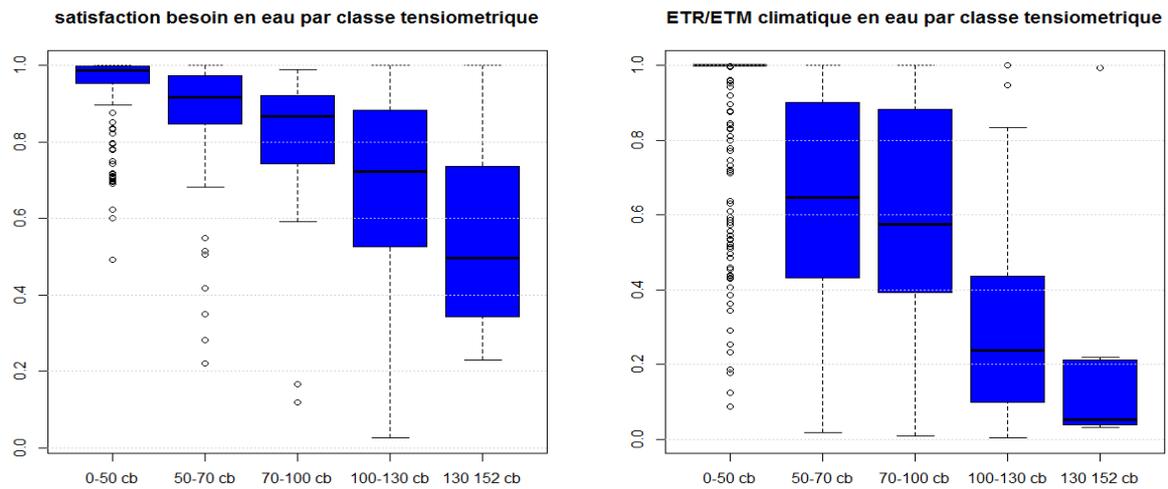


Figure 4 : TR\_M (a) et de ETR/ETM (b) par classe de valeurs tensiométriques (30- 60 cm de profondeur)

### 5.2.2 Comparaison des biomasses mesurées et prédites

Des estimations de production de biomasse peuvent constituer un élément supplémentaire de « validation » des bilans hydriques simulés et de l'impact potentiel d'un stress sur la culture (Figure 5).

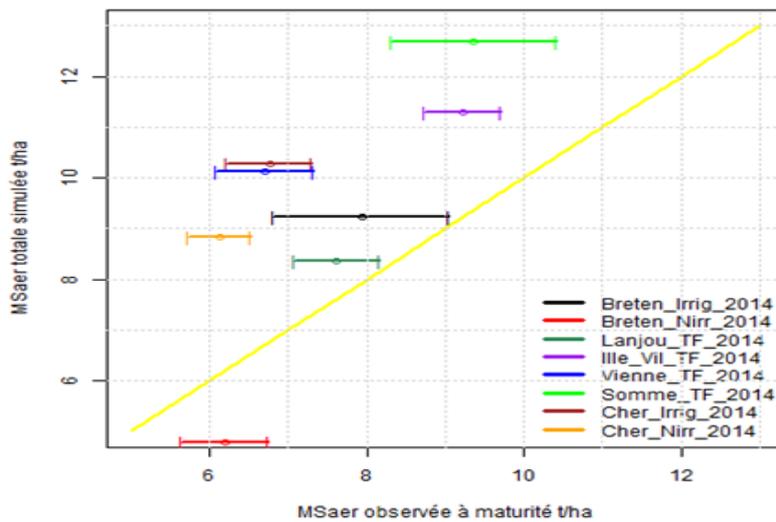


Figure 5 : Biomasse totale simulée et Biomasse observée à maturité

La matière sèche médiane mesurée à maturité sur les témoins des essais 2014 est représentée encadrée par un intervalle de confiance à 75% (3 témoins, 4 répétitions). L'année 2014 présente un potentiel faible en fin de cycle (les biomasses à floraison mesurées sont peu différentes de celles de 2013 qui n'enregistre pas de stress). BilHN met en évidence des stress hydriques sur les essais (la satisfaction du besoin en eau est inférieure à 80% pour 5 essais du réseau) mais surestime l'ensemble des biomasses à maturité à l'exception du site de Bretenière non irrigué. BilHN présente une gamme de variation des biomasses plus importante que mesurée. Une surestimation de la réserve utile ou des stress non pris en compte par le modèle peuvent expliquer ce résultat, notamment des stress thermiques pendant la phase de remplissage sur 8 essais du réseau (entre 8 à 14 jours avec des températures supérieures à 25°C sur 17 à 20 jours de durée de remplissage). Il apparaît nécessaire d'estimer l'importance des autres stress, notamment les fortes températures, souvent associées au stress hydrique, pour expliquer les éventuels écarts entre les simulations et les données réelles

Ces premiers résultats mettent en évidence l'intérêt d'un outil comme BilHN pour le diagnostic des conditions hydriques rencontrées dans les essais. La qualité des résultats de simulation est liée à la

qualité des données d'entrée du modèle (notamment la valeur de RU). Des données expérimentales bien renseignées sur le statut hydrique des sols pourraient permettre de valider plus précisément les sorties de BilHN. Les effets des stress thermiques sur l'évolution du développement de la culture (interception lumineuse, biomasse potentielle, durée du cycle) doivent être paramétrés dans BilHN car ils peuvent être prépondérants pour le pois.

## 6. Utilisation des modèles pour calculer les indicateurs

Les outils et modèles disponibles permettent de calculer les indicateurs recherchés.

Pour le sorgho, le modèle Pilote a été utilisé. Les prédictions de rendement et d'azote absorbé sont très bien corrélées aux mesures. Les résultats de la simulation sont présentés dans les Figures 6a et 6b. Le modèle rend bien compte du statut de la plante.

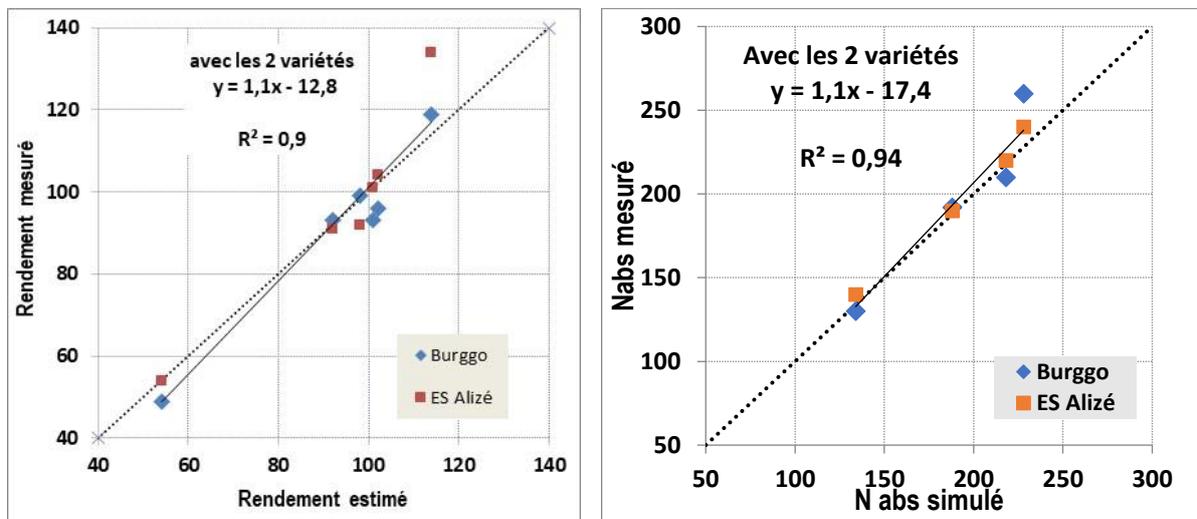


Figure 6 : Rendements (a) et N absorbé (b) simulés par PILOTE-N dans le réseau Sorgho 2014

Pour le blé tendre, les prédictions des modèles ont été comparées à trois variables mesurées sur les essais : la matière sèche en t/ha, l'azote absorbé en kg/ha et l'INN. Les mesures ont été faites sur deux variétés de précocité différente (une précoce et une  $\frac{1}{2}$  tardive) et à trois stades de la culture : 2 nœuds, floraison et récolte. Au total, nous disposons de 48 valeurs de biomasse et d'azote absorbé dans les parties aériennes et de 36 valeurs d'INN.

Pour quantifier la valeur prédictive des modèles, l'erreur de prédiction (RMSEP) et l'erreur relative de prédiction (RRMSEP), et les  $r^2$  ont été calculés. Une partie des résultats est présentée Tableau 4.

Pour la MS t/ha, si la valeur prédictive des modèles est d'un niveau correct quand on considère l'ensemble des données acquises sur tout le cycle de développement de la culture, elle est faible à mauvaise dès que l'on travaille par période de mesure et ce pour les 3 modèles. Seul Pilote a des bons résultats à la maturité. Les modèles savent classer des différences de biomasses mesurées à des stades différents mais pas à même stade entre sites.

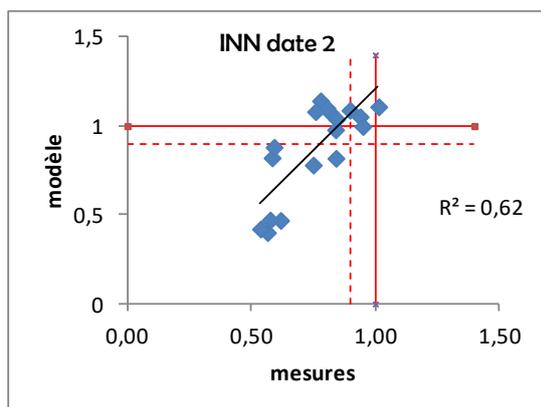
Au niveau de l'azote absorbé, la valeur prédictive des modèles est correcte à la récolte, et ce quel que soit le modèle.

**Tableau 4** : Valeur prédictive des modèles pour la MS totale, l'azote absorbé et l'INN

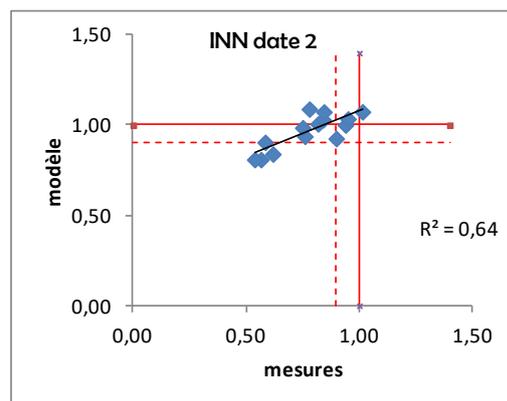
		MS t/ha			N abs kg/ha			INN		
		CHN	Pilote	BilHN	CHN	Pilote	BilHN	CHN	Pilote	BilHN
tous les points	RMSEP	2,44	2,6	2,6	41	32	28	0,2	0,25	0,17
	r <sup>2</sup>	85%	88%	82%	64%	72%	77%	68%	4%	43%
Stade 2 Nœuds	RMSEP	1,68	2,9	1,4	44	36	28	0,2	0,34	0,14
	r <sup>2</sup>	17%	11%	32%	56%	13%	43%	70%	22%	53%
Stade floraison	RMSEP	3,02	2,8	3,3	44	36	54	0,2	0,12	0,27
	r <sup>2</sup>	1%	2%	3%	53%	31%	58%	62%	34%	64%
Maturité	RMSEP	2,41	1,55	4,8	29	18	25			
	r <sup>2</sup>	26%	75%	21%	68%	79%	75%			

Pour les INN, BilHN et CHN ont des résultats convenables, en particulier au niveau du coefficient de détermination. Il est donc tout à fait possible d'utiliser les modèles pour classer les essais par rapport à la suffisance de l'alimentation azotée : les sites avec carence azotée forte (INN autour de 0,5) sont bien ceux qui ont les INN simulés les plus faibles (Figure 7).

CHN



BilHN

**Figure 7** : Mesures de l'INN et prédictions avec les modèles CHN et BilHN au stade floraison

Ces valeurs de prédictions restent tout de même globalement faibles, mais les situations de test de ces modèles étaient peu nombreuses et on renverra donc à d'autres travaux dont l'objectif est l'évaluation ou la comparaison de modèles qui ont pu être réalisés sur un plus grand nombre de points (Salo *et al.*, 2016 ; Constantin *et al.*, 2015).

Par ailleurs, ces faibles prédictions ne sont pas imputables uniquement aux modèles, et dépendent également de la qualité des mesures faites dans les essais et de celles des données entrées des modèles. Dans ce cas présent, les données mesurées sont imprécises car le nombre de prélèvements et leur surface sont faibles (par exemple en 2013 : 2 placettes de 2 lignes de 0,5 m pour la biomasse). En général, on considère les intervalles de confiance sont de l'ordre d'1 t/ha en biomasse.

## 7. Importance de la qualité des données à l'entrée des modèles

Pour que le modèle puisse fournir des indicateurs fiables, il est indispensable de lui fournir les données décrivant de façon correcte les conditions de la parcelle.

### 7.1 Accès à des données météorologiques représentatives des parcelles d'essais

Les modèles nécessitent des données climatiques. Les résultats fournis par les modèles traduiront d'autant mieux le vécu de la plante que ces données du climat sont représentatives de la parcelle d'essais. Il est nécessaire de pouvoir disposer d'informations précises sur les précipitations (pluviométrie à la parcelle), en particulier pour les cultures d'été ainsi que sur les doses d'irrigation et de fertilisation.

Lors du projet, on a vérifié pour le colza si l'on pouvait se contenter de la moyenne  $(T_{max}+T_{min})/2$ , ce qui économise l'achat d'un paramètre température moyenne fournie par une station. Sur les 11 plateformes Carabiot, le fait d'utiliser la  $T_{moy}$  fournie par la station ou une estimation par  $(T_{max}+T_{min})/2$  n'a globalement que très peu d'impact sur les indicateurs calculés. L'indicateur le plus impacté est celui des températures automnales mais les variations de source de données ne conduisent pas à basculer d'une classe à l'autre.

Acquérir des données météo à la parcelle, ou proche de la parcelle d'essai est de plus en plus envisageable. Les stations météorologiques se développent, et l'enregistrement des données sont de plus en plus automatisés. Dans le cadre du projet, l'acquisition de capteur de pluie a permis l'enregistrement des précipitations et des irrigations à la parcelle.

Par contre, des progrès sont encore à réaliser pour rendre facilement interoperables ces données météorologiques aux modèles. Ceci semble possible au vu des développements des solutions informatiques mais nécessite des investissements humains et financiers qui découlent de choix politiques dans la filière d'évaluation variétale.

### 7.2 Enjeu de la date du début de simulation

A toute simulation, il faut une situation initiale (date de début, état de la réserve hydrique, stock azote...). Dans le cadre de ce travail, il a été convenu que pour le blé tendre, par exemple, les simulations pour les calculs de bilan hydriques débutaient au 1<sup>er</sup> août de l'année du semis, avec une réserve utile vide. Ceci convient à la majorité des situations d'essais blé tendre car les précédents récoltés après le 1<sup>er</sup> août sont peu fréquents au niveau de l'expérimentation. Pour les autres cas, c'est la date de récolte du précédent qui a été retenue.

Pour regarder l'enjeu de la date de début du calcul du bilan hydrique, il avait été prévu, pour certaines situations de commencer la simulation l'année précédant la culture du blé. Ceci a été fait sur les 2 essais de Clermont avec le modèle BilHN. Sur les 8 points de disponibles (2 ou 3 stades de mesures, 2 années, 2 variétés), le fait de faire débiter la simulation avant le précédent du blé améliore la convergence entre modèle et mesures, la RMSEP diminue de 3,9 à 3,1 pour la biomasse, 40 à 31 pour l'azote absorbé, et 0,23 à 0,18 pour l'INN.

Ceci confirme que, si les données sont disponibles, il est intéressant de prendre en compte la culture précédente.

Actuellement, dans les dossiers d'expérimentations, il y a peu d'information demandée par rapport à l'historique de la parcelle, uniquement la nature et devenir des résidus du précédent et des antécédents (rarement renseignés), la présence et la nature d'une inter-culture avant l'essai. Il n'y a pas de données sur le niveau de biomasse de l'inter-culture, le rendement de la culture et sa conduite. Cette collecte de données, si elle était réalisée avant l'implantation de l'essai permettrait par ailleurs à l'expérimentateur de s'assurer qu'il n'y a pas eu l'année précédente d'incident qui pourrait impacter la réussite de l'essai.

### 7.3 Connaissance de la taille du réservoir en eau, la RU

La réserve d'eau utilisable par la culture est une donnée d'entrée indispensable à tous les modèles. Cette donnée est difficile à acquérir et les données dont on dispose sont trop souvent peu précises.

Quelques simulations ont été faites pour rappeler l'enjeu de la qualité de sa bonne estimation.

Ainsi sur le colza, il a été regardé l'impact d'une modification de 20 mm de la RU sur la qualification du stress :

- Pour les situations où la RU est très faible, cela ne change rien, le stress hydrique reste élevé.
- Pour les sols à RU plus forte (supérieure à 120 mm), se tromper de 20 mm n'influe pas le niveau de stress des situations testées.
- Pour les sols à RU moyenne (entre 70 et 120 mm), les résultats sont variables selon les situations. L'indicateur déficit hydrique à floraison identifié comme non limitant peut devenir assez limitant avec une RU un peu plus faible (l'indicateur varie de 0.17 en moyenne et 0.3 au maximum, pour une variation de RU de 20 mm). Pour l'indicateur déficit hydrique post-floraison, il varie de 0.1 en moyenne et 0.2 au maximum, pour une variation de RU de 20 mm.

Pour estimer le déficit hydrique à la floraison et en post-floraison, la précision de l'estimation de la RU est donc plus importante dans les sols à RU moyenne car on est souvent en limite de seuil de détection de stress. Or, dans le réseau colza, ces sols à RU moyenne sont souvent des argilo-calcaires, sols dans lesquels il est plus difficile d'avoir une estimation fiable du réservoir utile.

Sur la culture blé tendre, la sensibilité des modèles à la valeur de la RU a été analysée, les indicateurs ont été calculés à trois niveaux de RU : RU, RU-20% et RU+ 20%, ce qui selon les sites correspond à des variations de réserve utile de 11 mm à 40 mm.

La réponse des modèles à ces variations n'est pas identique. Si en moyenne, une augmentation de la RU permet une augmentation de la consommation totale d'eau sur le cycle (ETR cycle) ; pour quelques sites, l'augmentation de la RU peut conduire à une légère diminution de l'ETR. Dans le cas d'une diminution de la RU, l'ETR totale est diminuée. Au niveau de l'azote absorbé, les modèles se différencient également : avec Pilote, une RU plus élevée peut conduire à une diminution du Nabs, pour CHN, il y a au contraire une forte augmentation du Nabs. Sur ces quelques situations, on constate que le modèle le moins sensible à une modification de la RU est BilHN.

### 7.4 Stade de la culture

Certains outils, comme Diacol nécessite des observations sur la culture ; pour les autres, les dates de stades (épiaison, floraison) ou le stade à une date (nombre de feuilles) permettent d'améliorer le calage du modèle. Ces observations de stade peuvent être faites par l'expérimentateur ou l'homologateur de l'essai.

Pour le colza, il a été regardé l'impact de l'imprécision sur la date d'arrêt de végétation en colza. Il est, en effet, très difficile d'estimer visuellement les dates d'arrêt de végétation en colza sur les dernières années tant les longues périodes de froid automnales ou hivernales se raréfient. Il faudrait pour être précis faire une cinétique de biomasse fin d'automne début d'hiver et pouvoir prendre en compte les feuilles mortes dans ce calcul, ce qui est difficilement faisable.

L'impact d'une erreur de 7 jours est limité sur l'indicateur somme des températures automnales : seuls 2 sites basculent de « non limité » à « assez limité » et démontre que les indicateurs doivent être utilisés avec expertise surtout lorsqu'ils sont proches d'une limite de classe de stress.

## Conclusions et perspectives

Ce programme a permis aux acteurs de l'évaluation, obtenteurs, GEVES, Instituts techniques et INRA, de développer des méthodes partagées et de retenir des indicateurs communs pour caractériser les conditions abiotiques des situations expérimentales.

Les différents modèles utilisés dans le cadre de Carabiot fournissent des informations sur le niveau des contraintes abiotiques dans les essais et sont capables de classer les essais en quelques groupes semblables présentant des contraintes abiotiques proches, ce qui permet d'envisager la réalisation de sous-regroupements par niveau de contrainte qui seront toutefois à comparer aux structurations d'interactions des données des variétés dans les essais. Pour classer les essais, il semble préférable d'utiliser le même modèle pour tous les sites expérimentaux d'une même espèce.

Pour obtenir des indicateurs précis, il est nécessaire de disposer de données d'entrée de qualité. Il est donc essentiel de s'assurer que les données élémentaires au fonctionnement des modèles soient collectées et renseignées par les expérimentateurs des réseaux. Un travail est en cours sur les dossiers d'expérimentations utilisés pour le réseau CTPS et des essais de post-inscription des Instituts techniques.

Comme le continuum de l'évaluation entre sélection, inscription et post-inscription est un des objectifs forts du plan Semences et Plants pour une Agriculture Durable (<http://agriculture.gouv.fr/plan-semences-et-plants-pour-une-agriculture-durable>), il est assez cohérent de chercher à utiliser les mêmes outils que ceux déjà utilisés par d'autres acteurs. Pour les essais d'inscription du CTPS, le choix a été fait d'utiliser les outils de l'Institut technique qui vient en post-inscription.

Ces outils commencent à être utilisés dans le cadre du réseau CTPS. Les sorties de CHN ont contribué à la validation des essais blé comportement des variétés vis-à-vis de l'azote à la récolte 2017. Pour envisager une plus large utilisation, il est nécessaire d'automatiser la connexion des données d'essais à l'outil d'Arvalis. Diacol est maintenant utilisé pour caractériser les sites colza. En attendant que Azodyn colza soit amélioré, pour une approche de la caractérisation du statut azoté des plateformes, la section CTPS a entériné la mesure de l'INN à début floraison, pour toutes les plateformes d'essais CTPS colza (18 plateformes).

Le projet Carabiot s'est arrêté à la caractérisation des sites d'expérimentations, étape préalable à l'enrichissement de l'information produite sur les variétés grâce à une meilleure compréhension des interactions géotypes environnement. La suite est l'objet du projet Caravage qui a démarré en 2017 et qui a pour ambition de mettre en œuvre quelques outils testés dans Carabiot sur des bases de données rassemblant les 2 années d'essais d'inscription et 1 à 2 ans d'essais de post-inscription puis d'étudier les IGEC sur ces réseaux, en particulier les interactions liées à la contrainte hydrique. Dans ce projet, des essais spécifiques type eau + / eau – conduits pour certains dans des plateformes de phénotypage haut débit et haute précision seront également valorisés. Ce type d'expérimentation peut en effet être complémentaire d'un réseau multi-environnements pour caractériser finement le comportement des variétés par rapport à des stress qu'il est difficile de caractériser à l'échelle de réseaux d'essais.

**Remerciements** : Ces travaux ont bénéficié du soutien financier du Ministère en charge de l'Agriculture, grâce au fond CASDAR semences (projet CARABIOT n° C2012-02).

Ce projet s'inscrit dans les travaux du Groupe innovations variétales du GIS GC-HP2E.

Les partenaires du projet sont le GEVES, Arvalis Institut du végétal, l'ITB, l'INRA, l'IRSTEA, Terres Inovia, et l'UFS. Les expérimentateurs du réseau CTPS et les responsables GEVES des études VATE pour les espèces concernées y ont contribué pour la mise en place des essais, la définition des protocoles et sa valorisation dans les études variétés. Le projet a également bénéficié d'un large appui des équipes INRA d'Orléans (Unité Infosol et UMR Science du sol) pour la partie sol et de l'UMR Agroécologie pour la modélisation du pois.

## Références bibliographiques

- Arvalis, 2012. Rapport du projet RU et parcelles d'essais variétés sous contraintes hydriques
- Al Majou H., Bruand A., Duval O., 2008a. Use of in situ volumetric water content at field capacity to improve prediction of soil water retention properties. *Canadian Journal of Soil Science* 88, 4, 533-541
- Al Majou H., Bruand A., Nicoullaud B., Duval O., Dupont J., 2005. Premiers Résultats de Validation des Classes de Pédotransfert établies à partir de la Base de Données SOLHYDRO 1.0 : Application à des sols de la Région Centre. *Etude et Gestion des Sols*, 11, 165-173.
- Bruand A., et al., 2004. Estimation des propriétés de rétention en eau des sols à partir de la base de données SOLHYDRO : Une première proposition combinant le type d'horizon, sa texture et sa densité apparente. *Etude et Gestion des Sols*, *Etude et Gestion des Sols*, 2004, 11, 323-334
- Casadebaig P., Guillioni L., Lecoeur J., Christophe A., Champolivier L., Debaeke P., 2010. SUNFLO, a model to simulate genotype-specific performance of sunflower crop in contrasting environments. *Agricultural Forest Meteorology* 151, 163-178.
- Constantin J., et al., 2015. The soil-crop models STICS and AqYield predict yield and soil water content for irrigated crops equally well with limited data. *Agricultural and Forest Meteorology* 206, 55-68
- Khaledian M.R., Mailhol J.C, Ruelle P., Rosique P., 2009. Adapting PILOTE model for water and yield management under direct seeding system (DSM). The case of corn and durum wheat in mediterranean climate. *AGWAT* 96, 757-770; doi: 10.1016/j.agwat/2008.
- Lecoeur J., Sinclair T.R., 1996. Field Pea Transpiration and Leaf Growth in Response to Soil Water Deficits. *Crop Sci.* 36, 331-335
- Lhomme J.P., Eldin M., 1985. Un modèle agroclimatologique de simulation du bilan hydrique des cultures. In : *Les Besoins en Eau des Cultures*, 11-14 Septembre 1984, INRA, pp 841-852.
- Mailhol J.C., Olufayo O., Ruelle P., 1997. AET and yields assessments based on the LAI simulation. Application to sorghum and sunflower crops. *Agricultural Water Management revue* 35, 167-182.
- Mailhol J.C., Ruelle P., Walser S., Schütze N., Dejean C., 2011. Analysis of AET and yield prediction under surface and buried drip irrigation systems using the crop model PILOTE and Hydrus-2D. *AGWAT* 98, 1033-1044.
- Roche R., Jeuffroy M.H., Ney B., 1999. Comparison of different models predicting the date of beginning of flowering in pea (*Pisum sativum* L.). *Ecol. Modelling* 118, 213-226
- Salo T.J., et al., 2016. Comparing the performance of 11 crop simulation models in predicting yield response to nitrogen fertilization. *Journal of Agricultural Science* 154, 1218–124
- Soenen B., Le Bris X., Cohan J.P., Le Souder C., 2015. Premières valorisations agronomiques du modèle de culture « CHN ». *Rencontres COMIFER-GEMAS 2015*, Lyon
- Tetegyan M., 2011. Modélisation des propriétés de rétention en eau des sols caillouteux. Application à l'estimation spatialisée de la réserve utile, Thèse de l'Université d'Orléans, 165 p
- Vocanson A., 2006. Evaluation ex ante d'innovations variétales en pois d'hiver (*Pisum sativum* L.) : approche par modélisation au niveau de la parcelle et de l'exploitation agricole. Thèse de doctorat en Agronomie. Institut national agronomique Paris-Grignon

Cet article est publié sous la licence Creative Commons (CC BY-NC-ND 3.0).



<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/fr/>

Pour la citation et la reproduction de cet article, mentionner obligatoirement le titre de l'article, le nom de tous les auteurs, la mention de sa publication dans la revue « Innovations Agronomiques », la date de sa publication, et son URL).