

Evaluation des variétés nouvelles pour un usage en interculture: identification et choix des indicateurs, des méthodes transférables et des outils expérimentaux adaptés aux cultures intermédiaires.

Leclercq D.¹, Bagot P.², Bourdon P.³, Crignon R.¹, Dürr C.⁴, Dutheil J.¹, Duval R.⁵, Gensollen V.⁶, Grimault V.⁷, Hellou G.⁸, Héno S.⁵, Houdault S.⁷, Julier B.⁹, Justes E.¹⁰, Labreuche J.¹¹, Minette S.¹², Perrot S.⁷, Raveneau M-P.⁸, Tribouillois H.¹⁰, Trottin Y.¹³, Wagner M-H.⁷, Walczak P.¹⁴

¹ GEVES - Unité Expérimentale de Lusignan – INRAE Domaine des Verrines, F-86600 Lusignan

² GEVES - Unité Expérimentale de l'Anjouère, F-49370 La Pouèze

³ Carneau SA - Station de sélection de plantes fourragères et à gazon et de plantes d'interculture, F-59358 Orchies

⁴ INRAE – UMR1345, Institut de Recherche en Horticulture et Semences, F-49045 Angers

⁵ ITB Institut Technique de la Betterave, F-75008 Paris

⁶ GEVES - Unité Expérimentale de La Valette, F-34000 Montpellier

⁷ GEVES - Station Nationale d'Essais de Semences, F-49071 Beaucozé

⁸ Groupe ESA - Laboratoire d'Ecophysiologie Végétale et Agroécologie, F-49007 Angers

⁹ INRAE – UR4, Unité de Recherche Pluridisciplinaire Prairies et Plantes Fourragères, F-86600 Lusignan

¹⁰ INRAE - UMR1248, AGRoécologies, Innovation, Ruralités, F-31326 Castanet-Tolosan

¹¹ ARVALIS Institut du Végétal, F-91720 Boigneville

¹² Chambre Régionale d'Agriculture de Poitou-Charentes, F-86600 Lusignan

¹³ CTIFL Centre technique interprofessionnel des fruits et légumes – Balandran, F-30127 Bellegarde

¹⁴ INRAE - UE1373, FERLUS Fourrages Environnement Ruminants, F-86600 Lusignan

Correspondance : denis.leclercq@geves.fr

Résumé

L'approche méthodologique de l'évaluation des variétés pour leur usage en interculture a démarré en 2010 dans le sillage de la mise en œuvre des programmes d'action départementaux 2009-2013 relatifs à la protection des eaux contre la pollution par les nitrates d'origine agricole, qui favorisent l'introduction de cultures intermédiaires dans la rotation. Ce projet repose sur un double objectif :

- Promouvoir une sélection variétale émergente dans ce domaine, et disposer des méthodes et indicateurs d'évaluation du progrès génétique dans le cadre de l'inscription au catalogue français,
- Rechercher l'adhésion des agriculteurs à cette pratique culturale en dehors des zones vulnérables soumises à la réglementation, en valorisant le potentiel agronomique et économique des plantes d'interculture dans différents systèmes de culture.

Dans cette optique, des travaux ont été engagés selon trois axes de recherche méthodologique complémentaires, portant sur la facilité d'installation des cultures intermédiaires en conditions limitantes ainsi que leur capacité à capter et restituer l'azote du sol, et leur potentiel de lutte contre les bioagresseurs. Les résultats obtenus concernent à la fois la détermination d'indicateurs prédictifs des fonctions associées aux cultures intermédiaires, l'adaptation et le transfert de méthodes de recherche en protocoles expérimentaux usuels et économiquement supportables, l'évaluation de la variabilité génétique existante et l'esquisse d'idéotypes variétaux répondant aux fonctions ciblées.

Mots-clés : Cultures intermédiaires, Couvert végétal, Piège à nitrate, Interculture, Variabilité inter- et intra espèces

Abstract: Assessment of new varieties used as intermediate crops: identification and selection of indicators, transferable evaluative methods and adapted experimental tools.

Methodological approach of the assessment of varieties used as intermediate crops began in 2010 with 2009-2013 regional action plans concerning the protection of watersheds against pollution caused by nitrates from agricultural sources, which promoted introduction of cover crops in crops rotation. This project is based on two objectives:

- To encourage an emerging plant breeding which requires assessment methods and indicators of genetic progress from registration of new varieties in the French catalogue,
- To seek acceptance of this practice by farmers, outside the nitrate-vulnerable and regulated zones, valuing agronomical and economic potential of intermediate crops in different cropping systems.

For this purpose, methodological research has been initiated in three complementary axes: i) on the ease of the cover crops establishment, ii) their ability to capture and return nitrogen in stress conditions, and iii) on their capacity to control pests, diseases and weeds. Results included both the identification of predictive indicators of functions associated with intermediate crops, adaptation and transfer of research methods in routine experimental protocols at economically viable costs, assessment of existing genetic variability and the design of ideotypes for excepted functions.

Keywords: Intermediate crop, Cover crop, Catch crop, Intra- and inter-species variability, Seeds germination, Emergence, Nitrogen, Biopest, Biofumigation, Evaluation of plant varieties.

Introduction

Dynamisée par la mise en œuvre à l'échelle départementale des 4^{èmes} programmes d'action déclinant la directive 91/676/CEE dite Directive Nitrate, prévoyant la généralisation de la couverture totale des sols pendant la période de lessivage dans les zones vulnérables, l'implantation de cultures intermédiaires représentait 17% de la sole en grandes cultures en 2011 (Agreste, 2014). Les surfaces semées durant l'interculture, en progression constante, étaient ainsi estimées en 2013 à 1,3 millions d'hectare (Straebler M., GNIS, communication personnelle). Les cultures intermédiaires limitent en effet la pollution des eaux de surface et des nappes phréatiques en absorbant les nitrates de la solution du sol dans les périodes de risque de lessivage (Ouvrage collectif, 2013).

Cependant, l'essor potentiel de variétés utilisées en interculture est confronté à des contraintes d'au moins deux natures, d'une part l'acceptation par les agriculteurs en dehors des zones vulnérables, s'ils ne leur associent pas d'intérêts agronomiques et économiques, et d'autre part l'absence de cadre réglementaire et de dispositifs d'évaluation variétale au CTPS qui leur soient spécifiques.

Pour pallier ces obstacles à la diffusion de cette pratique culturale, il est proposé d'identifier les attributions des plantes d'interculture afin de les évaluer selon leurs spécificités affichées dans le cadre de systèmes de culture définis.

Le programme de recherche méthodologique lancé en 2012, porté par le GEVES et soutenu par le ministère en charge de l'agriculture, propose de déterminer les indicateurs et traits variétaux prédictifs des fonctions associées aux cultures intermédiaires, d'adapter les méthodologies existantes et d'élaborer les protocoles expérimentaux correspondants, d'évaluer la variabilité génétique existante répondant aux fonctions ciblées. Cinq groupes de fonctions et services ont été définis lors de la réflexion et l'étude bibliographique préalables au projet (Pottier, 2011), et trois ont été développés :

- Facilité d'installation en conditions limitantes (sous-projet 1),
- Capacité à capter et restituer l'azote en conditions limitantes (sous-projet 2),
- Lutte contre les bioagresseurs (sous-projet 3).

Les sous-projets 1 et 2 s'intéressent aux fonctions prioritaires qui doivent être systématiquement évaluées chez les variétés destinées à un usage en Culture Intermédiaire Piège A Nitrate, par la nécessité d'implanter des couverts s'installant rapidement y compris en conditions limitantes pour remplir efficacement leur fonction de capture de l'azote lixiviable, et par le caractère obligatoire de couverture des sols à l'interculture en zone vulnérable. Le sous-projet 3 correspond à des fonctions de valeur ajoutée agronomique et économique qui apportent à l'agriculteur des intérêts concrets et perceptibles : lutte contre les maladies telluriques (biofumigation), contre les nématodes (biofumigation, plantes pièges), contre les plantes adventices (allélopathie, compétition). Les services rendus par ces espèces et variétés utilisées en interculture ne participent pas uniquement à la définition des CIPAN mais doivent être considérés et étudiés dans le cadre de l'évaluation de cultures intermédiaires pour les zones non vulnérables. En parallèle, le niveau de gélivité des variétés et l'approche de l'association d'espèces ou variétés présentant des compétences complémentaires, seront également pris en considération.

1. Facilité d'installation en conditions limitantes

1.1 Phénotypage de la phase imbibition-germination

Le phénotypage de la germination de 57 génotypes de 34 espèces appartenant à 6 familles botaniques (Brassicacées, Poacées, Fabacées, Hydrophylacées, Polygonacées, et Asteracées) a été réalisé sur bancs automatisés à la SNES entre 2012 et 2013, à 7 modalités de température et 4 de potentiel hydrique, et en collaboration avec deux équipes de l'INRA de Toulouse et d'Angers (Tribouillois, 2014). En 2013 et 2014, les travaux se sont recentrés sur les 15 variétés de 4 espèces (moutarde blanche (4), radis fourrager (4), avoine rude (3) et vesce commune de printemps (4)) implantées au champ en 2013 et 2014 pour l'étude de leur capacité de piégeage et de restitution d'azote (sous-projet 2). Des cinétiques de germination à 25°C et des tests de germination standards ont ainsi été réalisés sur 2 lots de semences. Des tests de germination en boîte de Pétri et sur buvard ont été également réalisés sous double contrainte thermique (30°C) et hydrique (- 0.75 MPa) simulant une germination en conditions chaudes et sèches.

Le phénotypage de la germination a montré des différences marquées entre familles botaniques et espèces susceptibles d'être utilisées en interculture. Les Brassicacées sont capables de germer dans une large gamme thermique et dans des conditions de stress hydrique modéré (- 0.5 MPa), tandis que Poacées et Fabacées ont une germination globalement plus lente à haute température (30°C). Les Fabacées sont plus sensibles à un stress hydrique modéré que les Poacées (Tableau 1 (a)(b)).

Si au sein de chaque famille, la germination des différentes espèces présente des réponses variées à la température et au stress hydrique, peu voire pas de différence entre variétés a été observée quand plusieurs variétés étaient disponibles dans une espèce. Seules certaines Fabacées et la phacélie (Hydrophylacées) ont montré des différences variétales en condition de stress hydrique modéré.

Tableau 1 : Taux moyens de germination des 34 espèces regroupées par famille botanique selon des conditions progressives de température (a) et de potentiel hydrique (b).

Famille (nb espèces)	Température (a)						
	10°C	15°C	20°C	25°C	30°C	36°C	40°C
Brassicacées (8)	76.0	80.4	88.5	94.2	93.3	82.9	33.6
Poacées (8)	83.7	89.6	82.7	82.2	81.1	40.8	20.8
Fabacées (14)	81.8	90.0	91.0	74.7	24.5	59.6	25.8
Polygonacées (1)	74.0	80.0	89.0	78.0	81.0	85.0	0.0
Hydrophylacées (1)	80.5	63.7	84.0	51.0	10.0	2.0	0.0
Astéracées (2)	47.0	85.7	92.0	87.5	85.0	47.0	61.0
Moyenne par condition	73.8	81.6	87.9	77.9	62.5	52.9	23.5

Famille (nb espèces)	Potentiel hydrique (b)			
	-0,1 MPa	-0,25 MPa	-0,5 MPa	-0,75 MPa
Brassicacées (8)	91.6		85.6	51.9
Poacées (8)	82.4		78.4	75.1
Fabacées (14)	85.7	57.1*	50.8	61.8**
Polygonacées (1)	87.0		82.0	76.0
Hydrophylacées (1)	78.0		48.0	5.0
Astéracées (2)	95.0		83.0	65.0
Moyenne par condition	86.6	57.1	71.3	55.8

* 6 espèces

** 8 espèces

L'étude de la variabilité variétale réalisée avec les 15 variétés des 4 espèces étudiées en parallèle au champ et en laboratoire a mis en évidence des résultats de qualité moindre sur les lots plus âgés de quelques variétés, notamment chez la vesce. Cet effet du lot de semences peut masquer l'effet variétal (Wagner et al., 2015). Néanmoins, la vitesse de germination exprimée par le temps moyen de germination (TMG) concorde avec les levées moyennes observées au champ en 2013 sur 6 lieux après $\Sigma 250$ °C.J (Héno, 2014). Une bonne corrélation ($R^2 = 0.77$) a également été mise en évidence pour la vesce en 2013 et 2014 (Héno, 2014 ; Crignon, 2015).

Un test de germination combinant température élevée et stress hydrique modéré a été développé par espèce pour comparer les variétés proposées à une utilisation en interculture sur leur facilité de germination et donc d'implantation en conditions limitantes de fin d'été (Figure 1). Les cinétiques obtenues permettent de discriminer les variétés, notamment d'avoine rude et de vesce de printemps. Ces tests rapides (5 à 10 jours selon la famille botanique) pourraient être menés en laboratoire préalablement à l'étude variétale au champ.

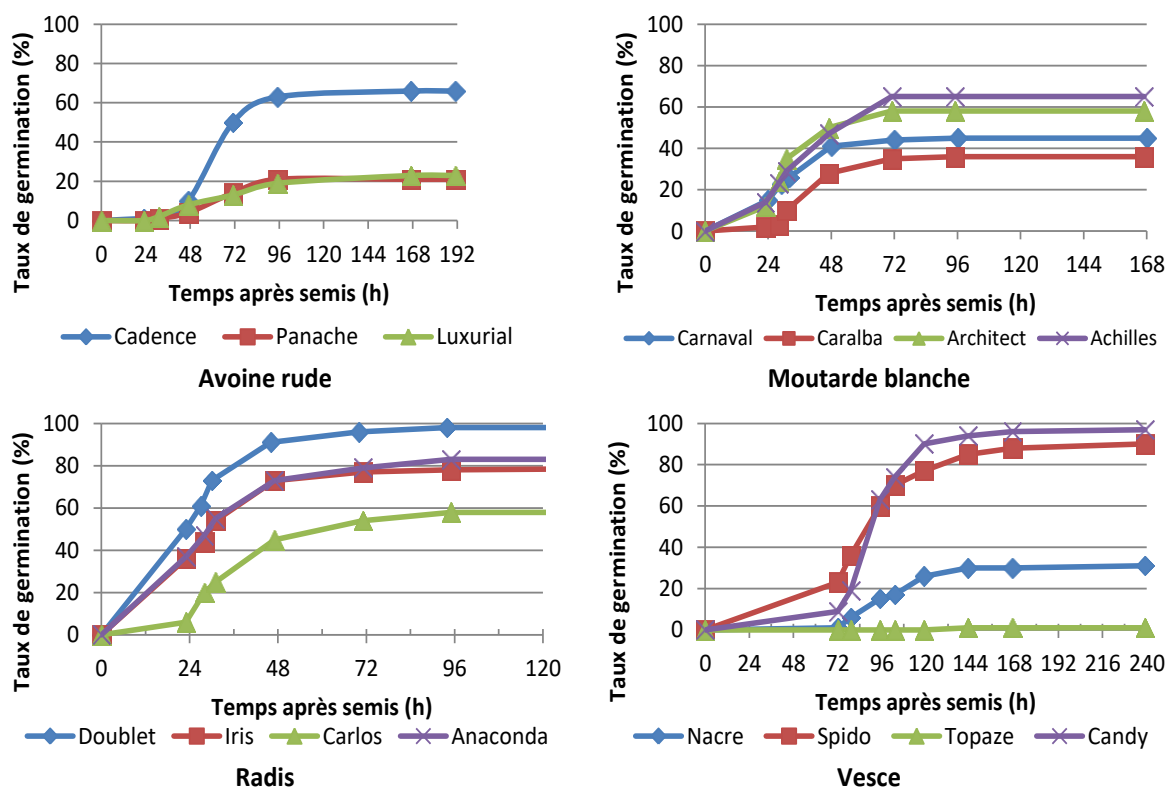


Figure 1 : Cinétiques de germination à 30°C et -0,5 MPa pour Poacées et Brassicacées, et à 25°C et -0,5 MPa pour les Fabacées.

1.2 Corrélations entre vitesse de germination, de croissance post-germination, et reprise du métabolisme au laboratoire

Une autre approche de la vitesse de germination par la mesure de la respiration des semences a été développée à l'ESA. En 2013, 33 génotypes de 5 familles botaniques parmi ceux phénotypés à 20°C à la SNES ont été choisis sur leurs différences de poids de 1000 grains (PMG) au sein d'une même famille, les génotypes à grosses graines comprenant surtout des légumineuses. Les mesures ont été réalisées à l'oxymètre à 22°C (2013) et 21°C (2014-2015) sur lots de graines d'au moins 1 g ou 10 graines selon le PMG, et la qualité de la respiration s'est exprimée par différents paramètres dont la vitesse maximale de respiration (V_{max}), le temps d'imbibition des semences pour atteindre la vitesse maximale de respiration (tV_{max}), et le temps nécessaire pour atteindre une consommation constante d'oxygène (t_a).

En 2014 et 2015, la vitesse de germination des lots variétaux 2014 des 15 variétés de 4 espèces implantées au champ en 2013 et 2014 pour l'étude de leur capacité de piégeage et de restitution d'azote (sous-projet 2) a été mesurée à l'ESA sur buvard plat (moutarde, radis) ou plissé (avoine, vesce) et les résultats comparés aux cinétiques réalisées à la SNES. On observe quelques différences de classement des espèces et variétés, notamment une vitesse de germination plus élevée pour la vesce du fait d'une meilleure imbibition en buvard plissé.

Enfin, des indicateurs de croissance post-germination ont été recherchés. La croissance à l'obscurité des plantules de Fabacées de 5 variétés appartenant à différentes espèces (vesces Candy et Spido, trèfle incarnat Cegalo, et pois Lucy et Assas) a été suivie, et la mobilisation des réserves cotylédonaire a été évaluée, soit en considérant l'évolution de la biomasse des cotylédons, soit par dosage en chromatographie HPLC de la teneur en sucres solubles RFO (famille du raffinose).

Les mesures de respiration réalisées en 2013 n'ont pas permis d'observer une relation commune à toutes les espèces testées, entre les indicateurs obtenus à l'oxymètre et les cinétiques de germination réalisées à 20°C, mais des indicateurs préférentiels selon les familles botaniques. L'étude réalisée en 2014 confirme l'intérêt des indicateurs tV_{max} ($R^2 = 0.77$) ou t_a (R^2 par espèce > 0.8). Plus le temps est court pour atteindre une consommation d'oxygène constante ou maximale et plus la vitesse de germination est rapide. Une très bonne qualité germinative des lots de semences est néanmoins nécessaire, au risque de mobiliser l'oxygène pour des réparations cellulaires.

Concernant les indicateurs de croissance post-germination, une corrélation a été trouvée entre la vitesse de croissance post-germination (entre 48 et 120 h après semis) et le temps pour atteindre la vitesse maximale de respiration. Plus le temps pour atteindre la vitesse maximale de respiration est long et plus la croissance post-germination de la plantule sera importante à l'obscurité. Cependant, ce temps peut être lié à la taille de la graine.

Enfin, la mobilisation des réserves semble être corrélée à la croissance post-germination. Plus la mobilisation de la biomasse sèche des cotylédons est rapide et plus la vitesse de croissance (MS) de la plantule est élevée (Figure 2). De même, plus la teneur en sucres solubles RFO est élevée dans les axes cotylédonaire à 12h d'imbibition et plus la croissance de la plantule est importante.

Les données au laboratoire ont été confrontées aux résultats de l'essai de croissance précoce au champ obtenus à Lusignan (86) en 2013. Il y aurait un lien entre la teneur en sucres solubles RFO des semences à l'émergence de la radicule, et la biomasse aérienne mesurée après $\Sigma 100$ °C.J. La teneur en sucres solubles RFO et sucres totaux des graines avant germination est également corrélée au taux de couverture du sol entre 200 °C.J et 400 °C.J. Ces indicateurs ont donc un intérêt pour l'évaluation variétale dans ce contexte, sous réserve de disposer d'outils de mesure de routine pour les sucres solubles comme la spectrophotométrie en proche infrarouge.

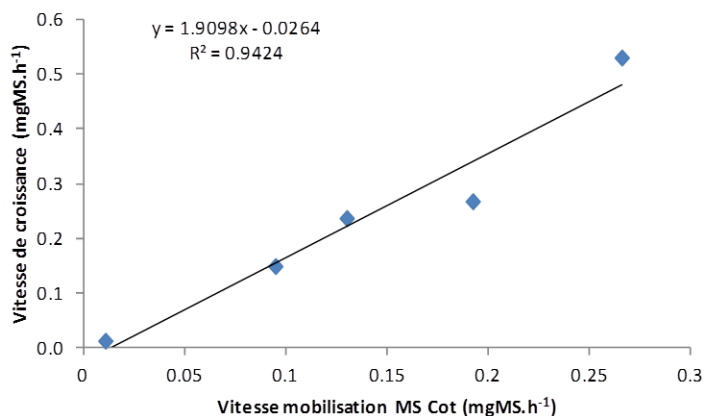


Figure 2 : Relation entre le temps pour atteindre la vitesse maximale de respiration et la vitesse de croissance des axes cotylédonaux.

1.3 Evaluation de la croissance précoce au champ

L'évaluation de la croissance précoce des cultures intermédiaires a été réalisée en essais au champ à Lusignan en 2012 et 2013. La croissance précoce impacte la rapidité de couverture du sol, le potentiel de captation de l'azote minéral, et la production de biomasse en fin de cycle. Les essais à 4 répétitions ont été conduits avec 6 génotypes de 5 espèces végétales en 2012, et 9 génotypes de 6 espèces (moutarde blanche, radis fourrager, vesce de printemps, vesce velue, avoine rude et ray-grass d'Italie alternatif) en 2013 sur la même parcelle et avec les mêmes lots de semences que dans l'essai Cycle de l'azote (sous-projet 2). Un suivi du couvert végétal a été réalisé depuis la levée jusqu'à $\Sigma 440$ °C.J, par prélèvements de biomasse et prises de vues numériques. Une estimation du statut azoté du couvert végétal a été réalisée après $\Sigma 440$ °C.J au Chlorophyll Meter.

Des différences importantes de couverture du sol après $\Sigma 440$ °C.J sont mises en évidence en 2013 entre espèces et entre variétés, malgré une plus forte variabilité des résultats entre espèces avec les mesures de biomasse. Sur 2 ans, les mesures de biomasse aérienne réalisées 100 °C.J⁻¹ après la levée permettent de prédire les taux de couverture ultérieurs (Figure 3). Cette corrélation entre les mesures précoces de biomasse et les mesures réalisées en 2013 à la destruction du couvert (environ $\Sigma 1000$ °C.J) dans l'essai Cycle de l'azote de Lusignan est néanmoins insuffisante pour prédire précisément les écarts entre variétés sur des périodes d'interculture longue donc le potentiel de restitution de l'azote à la culture suivante.

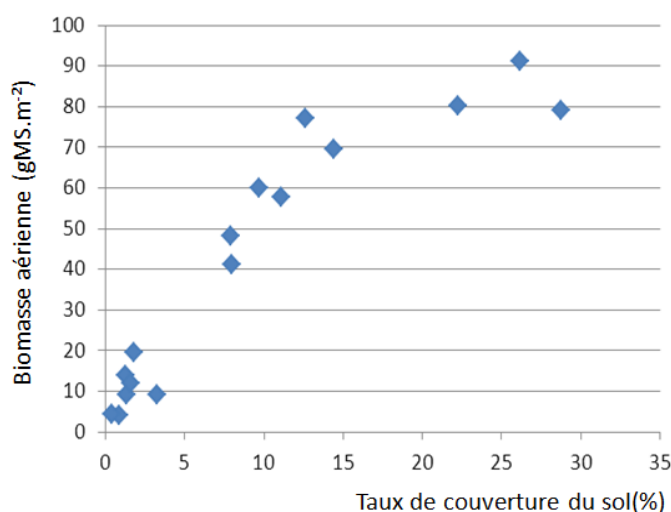


Figure 3 : Relation entre la biomasse aérienne mesurée à $\Sigma 100$ °C.J et le taux de couverture du sol par prises de vue numériques à $\Sigma 400$ °C.J

La corrélation négative a été mise en évidence entre la biomasse aérienne après $\Sigma 400$ °C.J et les mesures au Chlorophyll Meter. L'avoine rude a une croissance précoce plus limitée que les crucifères mais probablement une concentration plus élevée en azote, potentiellement apte à soutenir la croissance

ultérieure. Les mesures précoces de biomasse aérienne ou du taux de couverture après $\Sigma 100$ °C.J présentent un intérêt dans l'évaluation de la compétitivité de la culture intermédiaire vis-à-vis des adventices, et du potentiel de piégeage de l'azote.

3. Capacité à capter et restituer l'azote du sol en conditions limitantes

3.1 Dispositif et protocole expérimental du réseau d'essais de plein-champ

Cette expérimentation conduite en 2013 et 2014 a pour objectif de tester la mise en œuvre pratique d'un ensemble de mesures sur le sol et les plantes dans un dispositif multi-local, afin d'évaluer la variabilité variétale sur les critères de piégeage et de restitution de l'azote, d'évaluer l'incidence de la disponibilité en azote minéral du sol ou des conditions pédoclimatiques sur la réponse variétale, et d'une manière générale de compléter les références pour la caractérisation des espèces testées.

Le dispositif est constitué de 8 essais à 3 blocs randomisés, essentiellement au nord d'un axe Bordeaux-Strasbourg et un à Montpellier, décrivant une réelle diversité de zones agro-pédo-climatiques (Figure 4). Le protocole expérimental se décline en deux versions selon les capacités expérimentales des sites, un protocole complet dans 3 lieux (Boigneville, Chéry-les-Pouilly et Lusignan), et un protocole dit « allégé » sans dosage de l'azote dans le sol ni dans les racines dans 5 lieux (La Pouëze, Orchies, Montpellier, Viâpres et Vienne-en-Val). Le facteur variétal présente les 15 modalités végétales déjà décrites (moutarde blanche (4), radis fourrager (4), avoine rude (3) et vesce commune de printemps (4)), avec une 16ème modalité Sol Nu. Chaque essai fait l'objet de descriptions relatives au sol, aux données climatiques et à la conduite culturale.

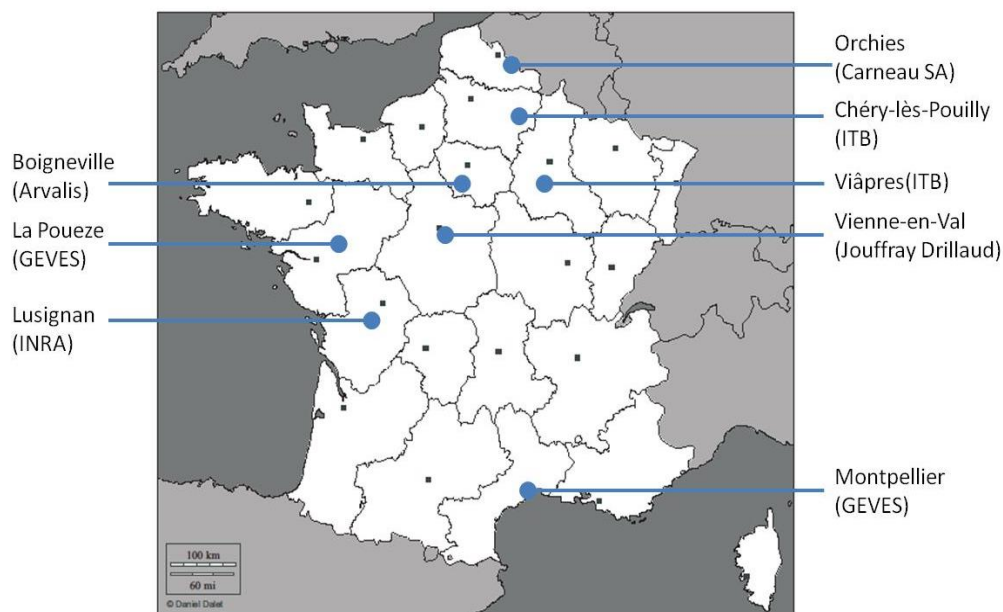


Figure 4 : Dispositif multi-local mis en place en 2013 et 2014.

Les essais ont été semés de début août à mi-septembre du nord au sud. La durée de végétation a été plus longue en 2014 ($\Sigma 1120$ °C.J) qu'en 2013 ($\Sigma 950$ °C.J) en raison du semis globalement plus précoce. La plupart des essais s'inscrivent dans une rotation céréalière (précédent blé).

Les données d'entrée et modes opératoires définis en 2013 ont été reconduits ou ajustés en 2014 :

- Pré-semis et semis : mesures du reliquat initial N du sol et de l'humidité du lit de semence,
- Phase germination-levée : peuplement à la levée par comptage tous les 3 jours pendant 15 jours,

- Développement du couvert végétal : prises de vues numériques minimales à Σ 200 °C.J, Σ 350 °C.J et Σ 500 °C.J après la levée (jusqu'à Σ 1000 °C.J dans certains essais 2013),
- Mesures à la destruction du couvert : biomasse aérienne, teneur en azote du couvert, hauteur et stade de récolte dans les 8 essais, N minéral du sol et biomasse racinaire (en 2013) dans 3 essais.

Les principaux indicateurs retenus pour l'étude sont la production de biomasse aérienne à destruction, la teneur en azote du couvert comme variable intervenant dans le calcul de la quantité d'azote acquis par la culture, la hauteur du couvert et le pouvoir couvrant. Le ratio C/N des plantes à la destruction constitue un indicateur pertinent de la capacité à restituer l'azote à la culture suivante.

Pour rendre comparables les valeurs collectées localement, les dates de levée ont été obtenues après ajustement des mesures de peuplement à une fonction de Gompertz, de même que les paramètres de la cinétique de recouvrement d'après les valeurs mesurées du pouvoir couvrant. L'indice de nutrition azoté INN, ratio du pourcentage d'azote effectivement absorbé par la culture et du pourcentage optimal pour une quantité de matière sèche produite, a également été calculé. Les données prétraitées ont été soumises à l'analyse de la variance, et calcul de ppds pour estimer le plus petit effet perceptible par le dispositif. Par ailleurs, les interactions éventuelles entre facteurs principaux ont été analysées par la méthode AMMI (Addictive Main effect Multiplicative Interrection).

3.2 Sensibilité des indicateurs mesurés à la destruction du couvert

Pour les 4 indicateurs (biomasse aérienne, %N végétal, N acquis et hauteur du couvert) mesurés sur les 15 modalités végétales, le dispositif expérimental détecte un effet très significatif de l'espèce, mais en interaction avec le lieu et l'année. Un effet variétal est parfois mis en évidence par l'analyse espèce par espèce des données du réseau à l'échelle du réseau, mais dépendant de l'indicateur testé et souvent en interaction avec l'essai (= lieu * année). Pour la quantité d'azote acquis par la biomasse végétale, l'effet variétal est mis en évidence uniquement pour la vesce, dans un contexte de forte variabilité résiduelle du réseau. Enfin, l'effet variétal s'estompe à l'échelle de l'essai : il faut cerner les causes de perte de puissance statistique des essais pour la réduire, et également déterminer les lieux les plus discriminants selon les espèces à évaluer.

3.3 Pertinence du calcul de la quantité d'azote acquis pour évaluer la capacité de piégeage

Le taux d'abattement exprime la relation entre l'absorption d'azote par la plante et la réduction du pool d'azote minéral (= N mesuré sous sol nu - N mesuré sous couvert). Il est globalement inversement corrélé à l'azote acquis par le couvert végétal (Figure 5), avec des réponses différenciées selon la famille botanique (les non-légumineuses prélèvent plus de nitrates que la vesce) ou selon la position de l'azote (l'avoine capte relativement mieux que les autres espèces l'azote plus profond). La vesce contribue moins à la réduction du pool d'azote minéral, mais fixe de l'azote atmosphérique par voie symbiotique, qui sera restitué à la culture suivante.

La quantité d'azote acquis par les non-légumineuses sous-estime la réduction de l'azote minéral du fait de l'accumulation partielle d'azote organique dans le système racinaire, entre 10% (avoine rude, moutarde blanche) et 25% (vesce commune et surtout radis fourrager) de l'azote capté par la plante.

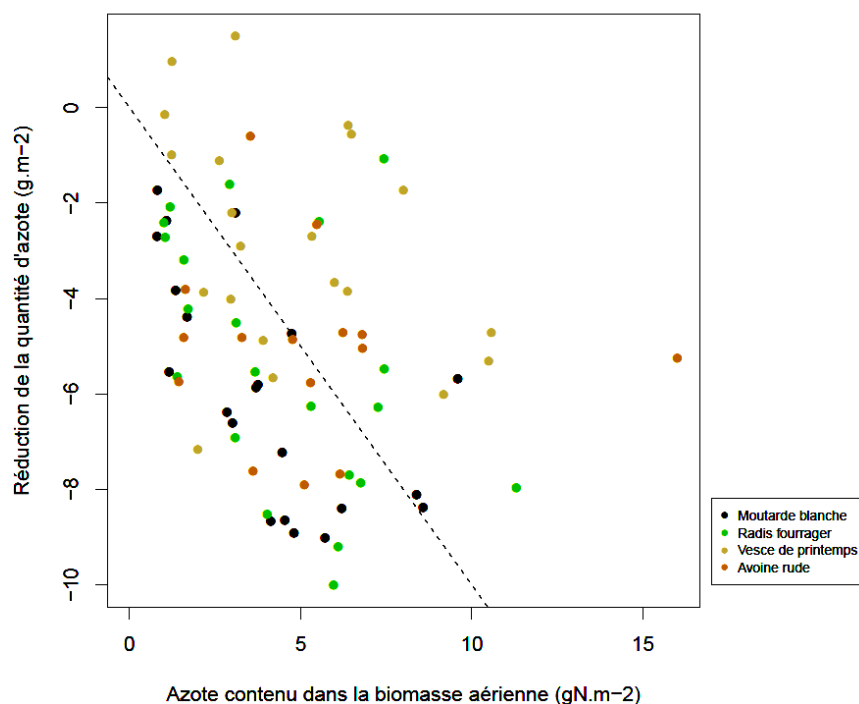


Figure 5 : Relation entre la réduction de N minéral et la quantité d'N dans les parties aériennes.

3.4 Diagnostic de la nutrition azotée et intérêts potentiels de la modélisation

Malgré des reliquats azotés très supérieurs à la pratique agricole, la comparaison des données collectées à la courbe de dilution de l'azote montre que la capacité d'acquisition des cultures intermédiaires non-légumineuses n'a pas été satisfaite, sauf sur le site d'Orchies (Figure 6). Le niveau du reliquat N après récolte du précédent n'est pas le seul facteur gouvernant la production de biomasse du couvert, il faut aussi prendre en compte l'importance de la minéralisation en azote du sol à l'automne et sa variabilité entre les sites (effet sol et climat).

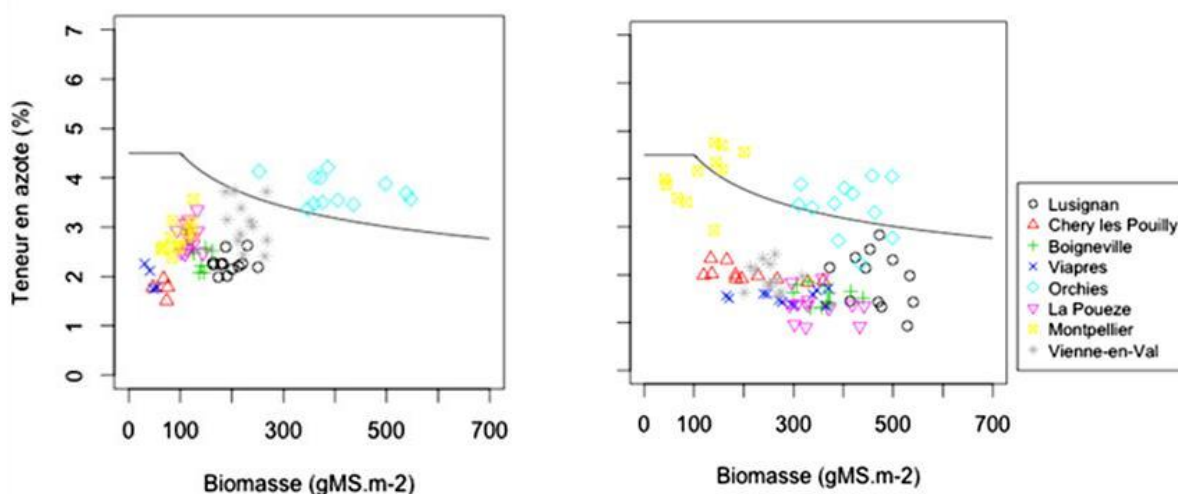


Figure 6 : Teneur en azote de la moutarde blanche et courbe de dilution de N en 2013 et 2014.

La conduite spécifique des essais de cultures intermédiaires (absence d'intrants, stress climatiques,...) affecte la valeur de discrimination variétale du dispositif expérimental. Pour mieux appréhender les facteurs de stress et les conditions de croissance du peuplement dans les essais, le modèle STICS développé par l'INRAE (Brisson et al., 1998, 2002, 2003, 2008) a été appliqué à l'estimation de la

fourniture en azote du sol. L'application du modèle aux données collectées a montré que la fourniture nette d'azote variait d'un facteur 10 d'un essai à l'autre, avec une valeur médiane très élevée (90 kg N/ha). Elle a également permis d'estimer que deux essais (Vienne-en-Val en 2013 et 2014, Montpellier en 2014) avaient subi une lixiviation nitrique durant l'expérimentation (Figure 7).

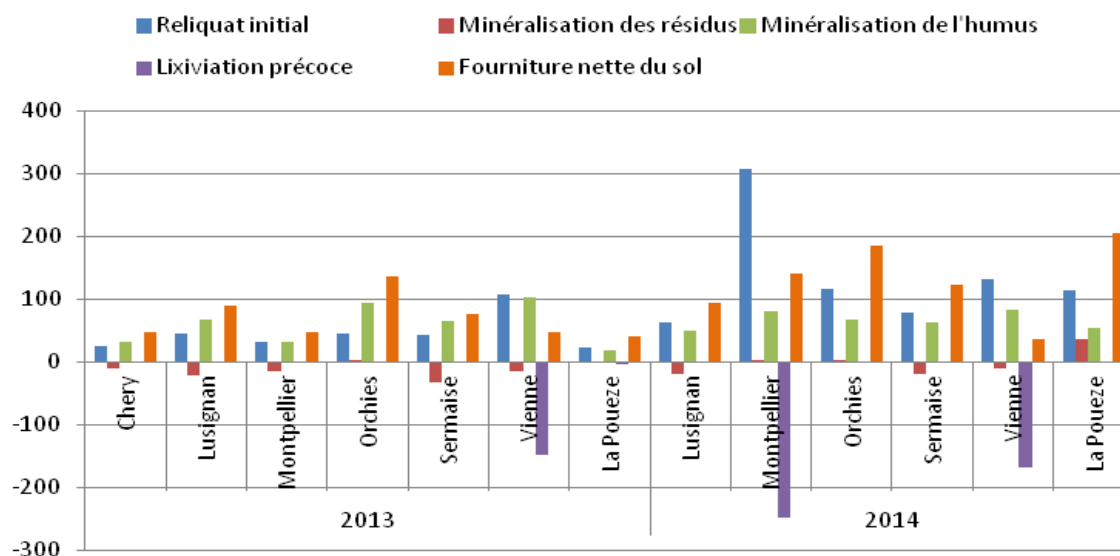


Figure 7 : Simulation avec STICS de la fourniture d'azote pour chaque essai

Sur la base de simulations de ce type, il est envisageable de regrouper des essais ayant des conditions de ressources en azote proches, ce qui présenterait un grand intérêt dans l'analyse des réseaux expérimentaux et des interactions génotype x environnement. Le modèle STICS a d'ailleurs été paramétré pour certaines espèces de cultures intermédiaires comme la moutarde blanche et la vesce pourpre (Constantin et al., 2015 ; Tribouillois et al., 2015).

4. Lutte contre les bioagresseurs

4.1 Résistance de crucifères vis-à-vis de *Heterodera schachtii*, nématode à kystes

En 2012, 8 variétés de 4 espèces de crucifères utilisées en interculture (moutarde brune, moutarde éthiopienne, cameline et navette fourragère) ont été comparées à 5 variétés témoins de moutarde blanche dans un biotest de résistance variétale à *Heterodera schachtii* développé à la SNES. Toutes les variétés testées sont plus sensibles et plus multiplicatrices du nématode que le témoin sensible Carla. Elles ne sont donc pas adaptées à un usage en interculture de betterave dans des sols contaminés par ce nématode.

4.2 Evaluation de l'effet assainissant de variétés de sorgho en interculture légumière sous-abris vs *Meloidogyne hapla*, nématode à galles

Cette expérimentation a été conduite en 2013 et 2014 au CTIFL et à la SNES pour évaluer l'effet assainissant du sorgho par mesure dans la plante de la teneur en durrhine (glucoside précurseur de l'acide cyanhydrique, biocide) et estimation du potentiel infectieux du sol. Le dispositif expérimental du CTIFL comporte 3 serres-tunnels (répétitions) au sol contaminé par *Meloidogyne hapla*, nématode polyphage des cultures légumières. 4 à 6 modalités variétales de sorgho fourrager (et une modalité de sol nu baché) ont été installées après culture de printemps, puis broyées et enfouies au bout de 6 à 7

semaines, avant semis d'un légume d'hiver (salade). La teneur en durhine a été dosée dans les parties aériennes (2013 et 2014) et les racines (2014) et des notations visuelles de galles sur les racines de salade ont été réalisées. La SNES a réalisé la quantification des nématodes par un biotest sur tomates cultivées dans le sol échantillonné avant le semis du sorgho, après l'enfouissement et en fin de culture de la salade suivante.

La teneur en durhine des parties aériennes est variable mais faible chez les variétés de sorgho sélectionnées pour ce critère (Piper, Luzar). Si cette teneur se réduit encore au cours de la croissance, le potentiel d'apport de durhine au sol par les tiges et feuilles augmente avec la quantité de matière sèche produite (Figure 8). Par contre, les teneurs racinaires sont élevées y compris chez Piper, beaucoup plus faibles pour Luzar. Le potentiel d'apport de durhine au sol est donc assez élevé avec la plupart des variétés mais reste modéré pour Luzar.

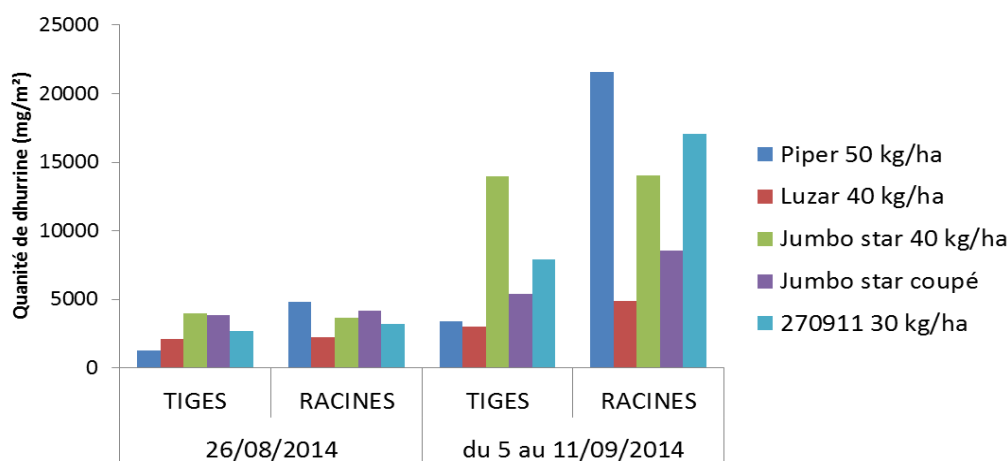


Figure 8 : Valeurs calculées du potentiel d'apport de durhine au sol en 2014.

Le niveau d'infestation des sols par le nématode est assez faible avec une variabilité spatiale importante, et il n'a pas été observé d'effet significatif du sorgho par rapport au sol nu bâché. Les tests biologiques n'ont pas permis non plus de mettre en évidence une réduction des populations de nématodes avec les différentes modalités variétales. Néanmoins, plusieurs facteurs diminuent la sensibilité du biotest (infestation initiale limitée, répartition des nématodes par foyer, cycles de reproduction sexuée plus longs, re-contaminations des sols, présence d'adventices...) qu'une adaptation des conditions expérimentales pourrait contribuer à améliorer.

5. Conclusions et perspectives

5.1 Facilité d'installation en conditions limitantes

La période estivale de semis des cultures intermédiaires correspond à des conditions de stress thermique et hydrique dans le lit de semences. Le **phénotypage de la germination** sur banc a montré des différences marquées entre familles botaniques et espèces soumises à différents niveaux de température et d'humidité. Si on observe globalement peu d'effet variétal, éventuellement masqué par des variations de qualité des lots de semences, cette technologie rapide permet de caractériser les exigences thermique et hydrique des différentes espèces. Les cinétiques de germination à 30°C pour Poacées et Brassicacées, à 25°C pour les Fabacées, et à -0,5 MPa pour les trois familles végétales, discriminent les variétés d'avoine rude et de vesce commune de printemps. Il conviendra néanmoins de rester dans la limite des températures observables sur le territoire français, afin de ne pas favoriser l'émergence de variétés exotiques adaptées à des conditions plus extrêmes. Par ailleurs, les tests de cinétique doivent

s'appliquer à des semences de qualité germinative standard, ceci dans l'intérêt du déposant qui est responsable de la qualité des lots fournis au CTPS.

Avec les **mesures de la respiration** à l'oxymètre, il a été établi que le temps d'imbibition nécessaire pour atteindre la vitesse maximale de respiration était un indicateur consensuel de la vitesse de germination pour l'espèce voire la famille botanique ou les plantes à petites graines, mais d'un intérêt néanmoins plus limité pour l'ensemble des familles étudiées. Une gamme plus large de variétés et des températures plus discriminantes permettraient de confirmer l'intérêt de cet indicateur. Par ailleurs, l'oxymètre ne permet pas de suivre la cinétique de respiration de plus de 10 lots simultanément durant 6 heures, ce qui peut limiter le transfert du test en routine.

Une relation étroite a été établie entre la vitesse de mobilisation de la biomasse sèche des cotylédons et la vitesse de croissance des plantules. La connaissance de la disponibilité en sucres des réserves des graines serait donc intéressante comme indicateur de la croissance post-germination, sous réserve d'assurer un transfert technologique de la chromatographie à la spectrophotométrie en proche infrarouge, bien plus économique et rapide.

Enfin, la **mesure précoce au champ** de la biomasse aérienne ou du taux de couverture par suivi photographique dès $\Sigma 100$ °C.J après la levée, permet de caractériser précocement la compétitivité vis-à-vis des adventices et l'aptitude à capter rapidement de l'azote. Ce type d'essai est en cela bien adapté aux plantes d'interculture courte. Pour les espèces d'interculture longue ou les variétés sensibles à la luminosité et/ou à la photopériode, les indicateurs pourront être utilisés en complément des mesures à la destruction du couvert. Dans tous les cas, cet essai au champ, simple et peu coûteux, semble bien adapté aux espèces non cataloguées, en autorisant la comparaison avec des espèces et variétés référencées. C'est également un outil complémentaire *in situ* des indicateurs de germination obtenus au laboratoire.

5.2 Capacité à capter et restituer l'azote du sol en conditions limitantes

Le dispositif multi-local et les protocoles expérimentaux sont efficaces pour évaluer les espèces utilisables en interculture, mais doivent être améliorés pour augmenter la sensibilité des indicateurs testés et bien discriminer les variétés. L'existence de cette variabilité intra-spécifique a d'ailleurs été révélée chez le radis fourrager et la vesce commune, et cette variabilité pourrait donc être explorée.

La relation entre la réduction du pool d'azote minéral du sol et la quantité d'azote accumulé dans la biomasse aérienne est pertinente, en particulier chez les crucifères. La sensibilité de l'indicateur pourrait être améliorée par des mesures racinaires pour les espèces tubérisantes comme le radis.

Les mesures du pouvoir couvrant, de mise en œuvre facile et peu coûteuse, discriminent les variétés moyennant un ajustement des modes opératoires à la rapidité de levée des espèces. Les résultats confirment l'intérêt de prises de vue précoces et échelonnées pour bien ajuster les résultats bruts : $\Sigma 100$ °C.J, $\Sigma 200$ °C.J, $\Sigma 400$ °C.J et $\Sigma 600$ °C.J (couvert total).

La conduite sans intrants des essais de cultures intermédiaires et l'exposition des jeunes plantes aux stress hydrique et thermique induisent de l'hétérogénéité et génèrent de l'erreur résiduelle. La modélisation peut contribuer à comprendre le fonctionnement et la dynamique des disponibilités en ressources abiotiques, et à mieux caractériser les lieux d'essais. L'ajustement des données brutes de levée et de pouvoir couvrant permet déjà de rendre comparables les résultats locaux. L'utilisation du modèle de culture STICS a fourni quelques résultats prometteurs pour l'optimisation des réseaux, et les données recueillies dans les essais ont permis de progresser dans la paramétrisation du modèle. Néanmoins, l'utilisation de la modélisation dans le cadre de l'évaluation variétale constituerait une réelle évolution pour le CTPS, et nécessiterait d'engager une réflexion approfondie.

Si le deuxième objectif de ce sous-projet relatif à la capacité des plantes à restituer l'azote à la culture suivante n'a pas été atteint, différentes pistes de travail ont néanmoins été avancées.

5.3 Lutte contre les bioagresseurs

Les partenaires ont rappelé leur intérêt pour la **lutte contre les maladies telluriques par biofumigation**, méthode alternative qui n'a pas pu être traitée ici. L'évaluation des variétés pour leur effet biocide en biofumigation nécessitera de relancer des activités de recherche méthodologique.

L'étude de l'**effet assainissant de variétés de sorgho en interculture légumière sous-abris vis-à-vis de *Meloidogyne hapla*** a permis de valider une méthode de dosage de la durrhine dans les organes aériens et les racines, et d'optimiser le protocole expérimental. Néanmoins, le dispositif n'a pas permis de mettre en évidence un effet variétal significatif du sorgho sur les populations de nématodes présentes dans le sol, malgré des différences variétales de teneur en durrhine et des potentiels d'apport au sol différents. Il serait souhaitable de comparer les pratiques et les résultats obtenus à l'INRA de Sophia-Antipolis pour améliorer la valeur discriminante des tests.

Les résultats obtenus dans le cadre de ce projet connaissent une mise en œuvre opérationnelle par la commission CTPS Inter-Sections Plantes de Services créée en 2014, dont la mission générale est d'étudier la Valeur Agronomique, Technologique et Environnementale des variétés candidates à l'inscription au catalogue français sous la rubrique « Plantes de services ». Cette commission d'experts a une approche transversale et pluridisciplinaire de l'étude des variétés. Elle valorisera le travail de pré-dépôt du sélectionneur, et favorisera l'accès au marché de variétés améliorées pour rendre des services écosystémiques.

Remerciements

Ce projet a été soutenu financièrement par le Ministère de l'Agriculture (CasDAR C2011-13,2012-2015). Les auteurs remercient chaleureusement Françoise Montfort pour sa contribution au montage du projet, ainsi que Annick Basset, Emilie Chardon, Lydie Ledroit et l'ensemble des équipes de recherche et d'expérimentation publiques et privées pour leur participation à sa mise en œuvre.

Références bibliographiques

- Agreste, 2014. Enquête sur les pratiques culturales 2011. <http://www.agreste.agriculture.gouv.fr>
- Brisson N., Launay M., Mary B., Beaudoin N., 2009. Conceptual basis, formalisations and parameterization of the STICS crop model. Collection Sciences & Technologie. Edition Quae
- Constantin J., Dürr C., Tribouillois H., Justes E., 2015. Catch crop emergence success depends on weather and soil seedbed conditions in interaction with sowing date: a simulation study using the SIMPLE emergence model. *Field Crops Research* 176, 22-33
- Crignon R., 2015. Evaluation de la variabilité inter- et intra-spécifique et recherche d'indicateurs de la capacité des cultures intermédiaires à capter et à restituer l'azote du sol. Mémoire de fin d'études d'ingénieur de l'Institut LaSalle de Beauvais, GEVES, Lusignan, France.
- Héno S., 2014. Caractérisation de variétés de culture intermédiaire, sur leur capacité de piégeage et de restitution d'azote, en vue de leur inscription. Mémoire de fin d'études d'ingénieur de l'ISA de Lille, ITB Champagne-Yonne, Reims, France.
- Pottier M., 2011. Les cultures intermédiaires et leurs fonctions. Etude bibliographique dans le cadre du projet CasDAR C2010-07, 2010-2011, GEVES, Lusignan, France.
- Ouvrage collectif, 2013. Les cultures intermédiaires pour une production agricole durable. Collection Matière à débattre et décider. Edition Quae
- Tribouillois H., 2014. Conception et évaluation de règles génériques d'assemblage d'espèces pour des cultures intermédiaires produisant divers services agro-écologiques. Thèse de doctorat de l'Université de Toulouse, INP Toulouse, France, soutenue le 4 décembre 2014

Tribouillois H., Cohan J.-P., Justes E., 2015. Cover crop mixtures including legume produce ecosystem services of nitrate capture and green manuring: assessment combining experimentation and modeling. *Plant and Soil* 397, 1-18

Wagner M.-H., Tribouillois H., Leclercq D., Justes E., Duval R., Dutheil J., Dürr C., Demilly D., Ducournau S., 2015. Germination automated phenotyping can help to select species or adapted cultivars for catch crop. Ordinary General Meeting of ISTA, Montevideo, Uruguay, 15-18 juin 2015.

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).