



HAL
open science

Caractérisation et optimisation du réseau d'inscription des variétés de pois d'hiver en 2007, 2008 et 2009

Christophe Lecomte, Florent Batifoy, T. Bebin, V. Biarnès, Nicolas Blanc, S. Bouet, R. Bourgeot, I. Chaillet, Bernard Dagou, Bernard Debote, et al.

► To cite this version:

Christophe Lecomte, Florent Batifoy, T. Bebin, V. Biarnès, Nicolas Blanc, et al.. Caractérisation et optimisation du réseau d'inscription des variétés de pois d'hiver en 2007, 2008 et 2009. *Innovations Agronomiques*, 2013, 27, pp.71-88. hal-01190365

HAL Id: hal-01190365

<https://hal.science/hal-01190365>

Submitted on 28 May 2020

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

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



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0
International License

Caractérisation et optimisation du réseau d'inscription des variétés de pois d'hiver en 2007, 2008 et 2009

Lecomte C.¹, Batifoy F.², Bebin T.¹⁵, Biarnès V.¹⁰, Blanc N.⁵, Bouet S.¹³, Bourgeot R.¹⁶, Chaillet I.⁸, Dagou B.⁶, Debote B.², Declerck P.¹⁷, Devaux R.³, Franchet C.¹⁴, Janson J.P.¹², Lantoine F.X.⁷, Leguevaques B.⁹, Moussart A.¹¹, Retailleau J.M.⁷, Rivière J.P.⁴

¹ INRA UMRLEG, 17 Rue Sully, BP 86510, 21065 Dijon Cedex

² INRA UMR GDEC, Site de Crouël, 234 avenue du Brézet, 63100 Clermont-Ferrand

³ INRA UMR SADV, Domaine de Brunehaut, Estrées-Mons, BP 136, 80203 Péronne Cedex

⁴ INRA UMR APBV, Domaine de la Motte au Vicomte, BP 35327, 35653 Le Rheu Cedex

⁵ INRA Domaine expérimental d'Epoisses, 21110 Bretenière

⁶ INRA Domaine expérimental d'Auzeville, 24 Chemin de Borde-Rouge, BP 52627, 31326 Castanet-Tolosan Cedex

⁷ GEVES, Geves - Domaine de la Boisselière - 49250 Brion

⁸ Arvalis, La Minière, 78 280 Guyancourt

⁹ Arvalis, En Crambade, 31450 Montesquieu-Lauragais

¹⁰ UNIP, 12 av Georges V, 75008 Paris

¹¹ UNIP-INRA/AGROCAMPUS Rennes, UMR Bio3P, BP 35327, 35653 Le Rheu Cedex

¹² FNAMS, 2 bis rue Jeanne d'Arc, BP 4017, 10013 Troyes Cedex

¹³ FNAMS, 2701 Route d'Orléans, BP 10, 18230 St Doulchard

¹⁴ Agriobtentions, INRA Ferme du Moulon, 91190 Gif-sur-Yvette

¹⁵ Desprez, 35 rue du 16 Juin 1940, 28700 Houville la branche

¹⁶ Limagrain Verneuil Holding, 5 rue de l'égalité, 28130 Chartainvilliers

¹⁷ RAGT (Serasem), Ferme du paly, 91490 Milly La Forêt

Correspondance : christophe.lecomte@dijon.inra.fr

Résumé

L'étude visait à adapter sur le pois la méthode de diagnostic des facteurs limitants mise au point sur le blé, en s'appuyant sur le réseau d'inscription des variétés de pois d'hiver hr classiques (non réactives à la photopériode) et sur le nouveau réseau des variétés de pois d'hiver Hr réactives à la photopériode (qui peuvent être semées plus précocement). Un des objectifs était donc également de discuter de la construction de ce nouveau réseau. Le recours à des modèles agronomiques préexistants ou mis au point dans le cadre de l'étude a été nécessaire pour calculer les variables descriptives de certains facteurs limitants, notamment pour estimer la date de réalisation de certains stades (initiation florale, début du remplissage des graines), et pour décrire des facteurs limitants comme le gel hivernal, le stress hydrique, les carences en azote et la pression par l'ascochytose. Les diagnostics des facteurs limitants effectués sur 4 variétés-témoins (3 de type hr, 1 de type Hr) ont permis d'expliquer de 51 à 66% des variations du rendement avec 3 à 6 facteurs limitants, et de 43 à 84% des variations du rendement en protéines avec 3 à 7 facteurs limitants, très proches de ceux du rendement. Nous avons mis en évidence le poids prépondérant de l'ascochytose, des fortes températures entre début floraison et début remplissage des graines (qui ont un rôle moins marqué sur le rendement en protéines), de la sécheresse et du manque de rayonnement au cours de la même période (qui ont un rôle plus marqué sur le rendement en protéines). Les facteurs limitants de début de cycle (pertes de plantes, retard à la levée, et dans un milieu de montagne gel entre initiation florale et début floraison) ont plus particulièrement affecté les pois d'hiver à semis précoce. La structuration du réseau Hr a été réalisée avec la contribution de 4 facteurs limitants aux pertes de rendements. Elle permet de mettre en évidence le caractère particulier de certains milieux et suggère d'augmenter la diversité des facteurs

limitants par le choix de nouveaux sites, ou par des variations de conduites culturales. Le recours à au moins deux variétés-témoins est également souhaitable pour accroître cette diversité.

Mots-clés : Rendement ; Rendement en protéines ; Diagnostic des facteurs limitants ; Modèles agronomiques ; Classification automatique

Abstract

This study aimed at adapting on peas the diagnosis of limiting factors method previously developed on wheat, based on the multi-environmental trials for registration of new varieties applied to classical hr non-photoperiodic winter peas as well as to the new Hr photoperiod type. Thus, one of our aims was also to discuss the constitution of this new network. The use of preexisting agronomic models or of newly built ones was necessary to calculate certain limiting factor descriptive variables, including the estimation of development stages (floral initiation, beginning of grain filling) or the description of winter frost, water stress, lack of nitrogen and ascochyta intensity. The diagnosis of limiting factors carried out on 4 probe genotypes (3 hr types, 1 Hr type) permitted to explain 51 to 66% of yield variation with 3 to 7 limiting factors, and 43 to 84% of protein yield variations with 3 to 7 limiting factors, closely related to those of yield. We showed the main effect of ascochyta, of high temperatures between beginning of flowering and beginning of grain filling (being less important for protein yield), of drought and lack of radiation during the same period (being more important for protein yield). Limiting factors of the beginning of crop cycle (plant losses, delayed emergence and frost between floral initiation and beginning of flowering) have impacted more particularly early sown peas. Structuring the Hr network has been carried out with the contribution of 4 limiting factors to the yield losses. It underlined the particular status of certain environmental conditions and suggested increasing the limiting factor diversity by choosing new experimental sites or conditions. Using at least 2 probe genotypes is also advisable in order to increase this diversity.

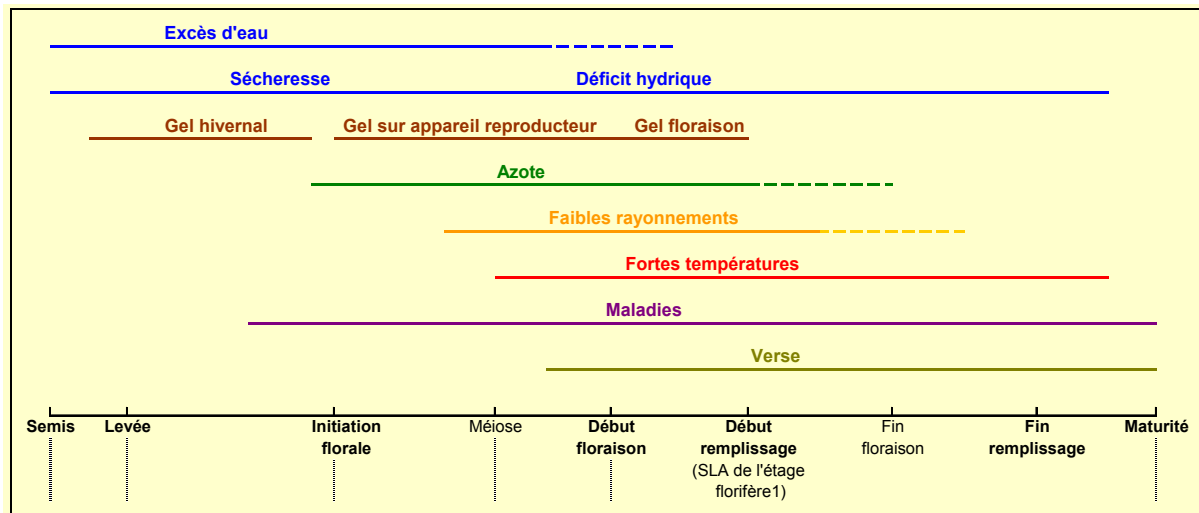
Keywords: Yield; Protein yield; Diagnosis of limiting factors; Agronomic modeling; Automatic classification

Introduction

Les cultures de protéagineux revêtent une importance particulière pour limiter la dépendance française et européenne vis-à-vis des protéines végétales importées. Mais un des principaux freins techniques au développement de ces espèces, et notamment de la culture du pois protéagineux, est l'instabilité de la production (rendement et qualité), due à l'action de différents facteurs limitants (Figure 1) pour lesquels de nouvelles variétés plus résistantes sont constamment recherchées (Baranger *et al.*, 2010).

Une des pistes abordées depuis plusieurs années par la recherche et les acteurs de la sélection pour augmenter et stabiliser la production du pois est de développer de nouvelles variétés de pois d'hiver, dont le cycle est à la fois plus long et avec une floraison plus précoce que les variétés de printemps, ce qui permet d'augmenter le potentiel de rendement de la culture, et d'échapper aux stress de fin de cycle. Mais les plantes sont alors exposées aux stress hivernaux comme le gel et certaines maladies, ce qui nécessite de développer des programmes d'amélioration des variétés pour ces facteurs limitants.

En poussant plus loin la logique des pois d'hiver, un nouveau type de développement est apparu récemment, les pois d'hiver Hr réactifs à la photopériode, qui permettent une implantation encore plus précoce de la culture. En effet, le caractère Hr induit une date d'initiation florale qui dépend de la durée du jour et donc de la date calendaire. Cela permet aux plantes de rester à l'état végétatif jusqu'à cette date, même si elles sont semées tôt, et donc d'échapper au gel de fin d'hiver sur l'appareil reproducteur en cours de formation.

Figure 1. Cycle de développement et principaux facteurs limitants du pois.

Avec l'objectif finalisé d'améliorer la stabilité de la production du pois d'hiver et de raisonner la constitution d'un réseau d'évaluation pour l'inscription des type Hr, un programme de recherche a été initié par le conseil scientifique du CTPS et financé par le Ministère de l'Agriculture depuis la fin de l'année 2007. Ce programme a regroupé un ensemble de partenaires impliqués dans la production et l'évaluation de variétés de pois : INRA et instituts techniques (Arvalis, Unip, Fnams), le Geves et 4 sélectionneurs privés (AgriObtentions, Desprez, Limagrain, Serasem-Ragt).

Ses deux principaux objectifs étaient :

- 1- de caractériser les milieux d'évaluation pour identifier les principaux facteurs limitants responsables des variations de la production (diagnostic des facteurs limitants) et connaître la réaction des variétés par rapport à ces facteurs (par une analyse de l'interaction génotype x milieu), et
- 2- de raisonner la constitution d'un nouveau réseau expérimental en pois d'hiver Hr (en utilisant notamment une méthode de classification des milieux basée sur les facteurs limitants).

Le premier de ces deux objectifs a supposé un travail d'amont pour l'estimation de la date de certains stades de développement, notamment l'initiation florale, le paramétrage d'un modèle d'estimation des dégâts de gel hivernal et l'utilisation de plusieurs modèles permettant de simplifier et de fiabiliser le recueil des données dans les essais (croissance racinaire et stress hydrique, indice de nutrition azotée, développement de l'ascochytose). Il supposait aussi d'adapter au pois la méthode de diagnostic des facteurs limitants mise au point chez le blé (Lecomte *et al.*, 2009).

Cet article présente les principaux résultats obtenus dans le cadre de cette étude : modèles agronomiques de phénologie et de calcul de certains facteurs limitants et diagnostic des facteurs limitants du pois d'hiver apparus sur le réseau d'inscription de 2007 à 2009. Nous en déduisons certaines recommandations pour la constitution du réseau expérimental Hr.

Matériel et méthodes

1. Réseau expérimental et témoins révélateurs

Le réseau étudié comportait un certain nombre de sites utilisés pour l'inscription des variétés de pois d'hiver, années de récolte 2007 à 2009. Les essais qui ont été exploités sont présentés dans le Tableau 1 ci-dessous.

Tableau 1. Essais valorisés de 2007 à 2009.

Sites	Organisme	2007	2008	2009	Total
Pois d'hiver « classiques »					
Saint Germain (18)	FNAMS		X		
Bretenièrre (21) – S1*	INRA		X	X	
Bretenièrre (21) – S2*	INRA	X	X	X	
Chartainvilliers (28)	LVH	X	X	X	
Houville (28)	Desprez	X	X	X	
Auzeville (31)	INRA		X		
Montesquieu (31) – T**	ARVALIS	X	X	X	
Montesquieu (31) – NTF**	ARVALIS	X	X	X	
Le Rheu (35)	INRA	X	X	X	
Mons (80)	INRA	X	X	X	
Milly (91)	Serasem	X	X		
Total		8	11	8	27
Pois d'hiver de type « Hr »					
Saint Pouange (10)	FNAMS	X	X	X	
Saint Germain (18)	FNAMS		X		
Bretenièrre (21) – S1*	INRA	X	X	X	
Chartainvilliers (28)	LVH	X	X	X	
Houville (28)	Desprez	X	X		
Le Rheu (35)	INRA	X	X	X	
Clermont-Theix (63)	INRA	X	X	X	
Mons (80)	INRA	X	X	X	
Brouessy (78)	INRA/AO		X		
Milly (91)	Serasem	X	X		
Total		8	10	6	24

* S1 = semis précoce, pour le type « Hr » et pour Isard (site de Bretenièrre) ; S2 = semis de fin octobre – début novembre

** T = traité aux fongicides (cas général) ; NTF = non-traité aux fongicides

Les essais ont été semés à la date de semis optimale dans chaque région, et les observations ont été réalisées conformément au protocole proposé par le GEVES pour les essais d'inscription. A ces essais ont été adjointes des variétés témoins-révélateurs (TR), en parcelles triples, sur lesquelles ont été réalisés un certain nombre de notations et prélèvements complémentaires pour décrire les milieux (Annexe 1) :

- en pois d'hiver "hr" classiques : variétés Isard, Cherokee, Cartouche
- en pois d'hiver "Hr" (réactifs à la photopériode) : lignée 886/01 (non inscrite)

2. Variables descriptives des milieux

Cinq variables météorologiques journalières ont été recueillies sur les sites : les températures minimales et maximales (Tmin, Tmax en °C), les précipitations et l'évapo-transpiration potentielle Penman (PP et ETP en mm), et le rayonnement global (Rgl en J/cm²). A partir de ces variables ont été calculés la température moyenne journalière, les sommes de températures moyennes journalières en base 0 (comptabilisées en degrés x jours), les sommes de rayonnements journaliers et le rapport somme de rayonnements/somme de températures par grande phase de développement.

Les phases de développement sur lesquelles ont été calculés les facteurs limitants sont : semis-initiation florale (IF), initiation florale-début floraison (DF), début floraison-début remplissage des graines (DRG), début remplissage-fin remplissage des graines (FRG). Les stades habituellement observés dans ce type d'essais étant le semis, la levée, le début de la floraison et la fin de la floraison, nous avons donc estimé la date des autres stades par des modèles basés sur les sommes de températures moyennes journalières en base 0°C.

Quand la **date de levée** n'a pas été déterminée avec précision, nous l'avons estimée en ajoutant 180 degrés x jours (°C.j) à la date de semis. Dans les cas où la date de levée était disponible, nous avons estimé le retard à la levée par les sommes de températures en excès par rapport à 180°C.j.

L'initiation florale délimite deux grandes phases du cycle qui ne présentent pas les mêmes caractéristiques de sensibilité aux facteurs du milieu. Par exemple, avant l'initiation florale, les seuils de résistance au gel se situent à des valeurs bien inférieures à celles qu'on peut observer après l'initiation florale. Dans le premier cas, seul l'appareil végétatif est concerné alors que dans le second l'appareil reproducteur est affecté, avec des conséquences importantes sur la floraison et la production de graines. La détermination exacte de la date d'initiation florale impose des observations fines de l'apex, qu'on ne peut pas préconiser dans le cadre d'un suivi d'essais variétaux. En vue de mettre au point un modèle simple d'estimation de cette date, nous avons identifié précisément la date d'initiation florale des témoins révélateurs (et de 3 variétés de pois de printemps : Athos Hardy et Lumina) sur deux années (2007 et 2008) dans trois sites (Dijon, Mons et Rennes), et nous avons calculé la somme des températures moyennes journalières en base 0°C à cette date. La valeur de la somme des températures entre initiation florale et début floraison retenue a été obtenue par validation croisée, une valeur déterminée sur un ou plusieurs sites (toutes les combinaisons possibles ont été utilisées) servant à tester les dates sur les autres sites. Nous avons ainsi obtenu 576.2°C.j +/- 83.5°C.j.

La date du stade **début remplissage des graines** a été estimée en ajoutant 260°C.j à la date de début floraison. Cette valeur a été déduite d'observations en 2007 sur une grande diversité de géotypes issus d'une collection de ressources génétiques disponibles à l'INRA de Dijon. La **durée du remplissage** dépend des conditions de déroulement de cette phase, elle est notamment plus courte en cas d'intervention de facteurs limitants comme les fortes températures, le stress hydrique ou certaines maladies. Les variables descriptives des facteurs limitants du remplissage des graines ont donc été calculées sur une période arbitraire de 350°C.j à partir du début du remplissage, en considérant que les facteurs limitants n'ont plus d'effet marqué au-delà de cette période.

Chaque facteur limitant a été décrit par une ou plusieurs variables spécifiques issues d'observations ou de modèles (Tableau 2). Le recours à des modèles est très utile, voire indispensable pour tous les facteurs limitants qui ne sont pas notés de façon systématique, ou pour lesquels il est difficile de mettre au point une méthode de notation objective conduisant à des notations homogènes.

C'est le cas du **gel hivernal**, pour lequel nous avons cherché à estimer les effets en paramétrant un modèle de calcul de la résistance au gel qui avait initialement été mis au point sur le blé (Lecomte *et al.*, 2003). Le paramétrage s'est appuyé sur des observations réalisées de 2007 à 2010 dans la station d'altitude de Chaux-des-Prés (Jura) sur une gamme de 15 géotypes de pois. Le Tableau 3 indique, pour quelques variétés incluant nos témoins-révélateurs, les valeurs de températures-seuil correspondant à la résistance maximale que peut atteindre une variété quand elle est correctement endurcie.

Ces seuils ne peuvent être atteints que si les plantes sont correctement endurcies, ce qui est un processus assez long, dépendant des températures auxquelles sont soumises les plantes. Nous avons pu estimer que la durée d'endurcissement chez le pois varie de 5 à 7 semaines selon la variété, mais les variétés ne sont pas encore bien caractérisées pour ce paramètre.

Tableau 2. Liste des variables utilisées pour décrire les facteurs limitants du pois.

variable	unité	descriptif
retlv	dj	retard à la levée (stmp > 180 dj)
dens	1-9	note de densité de parcelle
np	/m ²	nombre de pieds /m ²
dnp	/m ²	différence entre le nombre de pieds "objectif" et le premier nombre de pieds compté
dnpcc	%	différence entre le nombre de pieds "objectif" et le premier nombre de pieds compté en %
couv	0-100	taux de couverture de la parcelle en %
innndf	0-1	indice de nutrition azoté à début floraison
gelhvo	%	dégâts de gel hivernal observés en % de surface foliaire détruite
gelhvc_nj	n	nombre de jours de gel hivernal déduits du modèle
gelhvc_st	dC	somme de tmp mini journalières inférieures au seuil de résistance estimé par le modèle (cumul des dégâts de
gelhvc_tx	dC	écart maxi entre la tmp mini journalière et le seuil de résistance estimé par le modèle (dégâts maxi de gel hivi
gelDF_nj	n	nombre de jours de gel (tmp mini < 0) entre initiation florale (incluse) et début floraison (incluse)
gelDF_st	dC	somme des tmp mini journalières < 0 entre initiation florale (incluse) et début floraison (incluse)
gelDF_tx	dC	plus faible tmp mini journalière < 0 entre initiation florale (incluse) et début floraison (incluse)
gelDRG_nj	n	nombre de jours de gel (tmp mini < 0) entre début floraison (exclue) et début remplissage des graines (inclus)
gelDRG_st	dC	somme des tmp mini journalières < 0 entre début floraison (exclue) et début remplissage des graines (inclus)
gelDRG_tx	dC	plus faible tmp mini journalière < 0 entre début floraison (exclue) et début remplissage des graines (inclus)
ht4	cm	quatrième (ou dernière) note de hauteur
htx	cm	hauteur maximale atteinte au cours du cycle
dht	cm	différence de hauteur entre la hauteur maxi (entre ht1, ht2, ht3, ht4) et la dernière note de hauteur en cm
dhtpc	%	différence de hauteur entre la hauteur maxi (entre ht1, ht2, ht3, ht4) et la dernière note de hauteur en %
vx	%	note maximale de verse observée au cours du cycle
antx	0-100	note maximale d'Ascochyte observée au cours du cycle
antIFi	snep	note d'Ascochyte à l'initiation florale, estimée par le modèle snep, sans correction par les observations
antIFc	snep	note d'Ascochyte à l'initiation florale, estimée par le modèle snep, avec correction par les observations
antDFi	snep	note d'Ascochyte à début floraison, estimée par le modèle snep, sans correction
antDFc	snep	note d'Ascochyte à début floraison, estimée par le modèle snep, avec correction par les observations
antDRGi	snep	note d'Ascochyte à début remplissage estimée par le modèle snep, sans correction
antDRGc	snep	note d'Ascochyte à début remplissage estimée par le modèle snep, avec correction par les observations
antFRGi	snep	note d'Ascochyte à fin remplissage estimée par le modèle snep, sans correction
antFRGc	snep	note d'Ascochyte à fin remplissage estimée par le modèle snep, avec correction par les observations
oidx	0-100	note maximale d'oidium observée au cours du cycle
milx	0-100	note maximale de mildiou observée au cours du cycle
sit1	0-100	1ère note de sitone
puc1	0-100	1ère note de pucerons
puc2	0-100	2ème note de pucerons
acc1	0-100	note d'accident 1
acc2	0-100	note d'accident 2
stIF	dj	somme des tmp moy journalières en base 0 entre le semis et l'initiation florale
srIF	Jj	somme des rayonnements globaux journaliers entre le semis et l'initiation florale
rtIF	J/d	quotient photothermique entre le semis et l'initiation florale
stDF	dj	somme des tmp moy journalières en base 0 entre l'initiation florale et le début floraison
srDF	Jj	somme des rayonnements globaux journaliers entre l'initiation florale et le début floraison
rtDF	J/d	quotient photothermique entre l'initiation florale et le début floraison
stDRG	dj	somme des tmp moy journalières en base 0 entre le début floraison et le début remplissage des graines
srDRG	Jj	somme des rayonnements globaux journaliers entre le début floraison et le début remplissage des graines
rtDRG	J/d	quotient photothermique entre le début floraison et le début remplissage des graines
stFRG	dj	somme des tmp moy journalières en base 0 entre le début remplissage des graines et la fin du remplissage d
srFRG	Jj	somme des rayonnements globaux journaliers entre le début remplissage des graines et la fin du remplissage
rtFRG	J/d	quotient photothermique entre le début remplissage des graines et la fin du remplissage des graines
xeauhv	mm	excès d'eau hivernal (somme des P-ETP journalières si > 0 entre semis et stade initiation florale)
petpIF	dj	somme des p-etp journalières entre le semis et l'initiation florale
petpDF	dj	somme des p-etp journalières entre l'initiation florale et le début floraison
petpDRG	dj	somme des p-etp journalières entre le début floraison et le début du remplissage des graines
petpFRG	dj	somme des p-etp journalières entre le début du remplissage des graines et la fin du remplissage des graines
dfhdIF	mm	déficit hydrique cumulé entre le semis et l'initiation florale
dfhdDF	mm	déficit hydrique cumulé entre l'initiation florale et le début floraison
dfhdDRG	mm	déficit hydrique cumulé entre le début floraison et le début du remplissage des graines
dfhdFRG	mm	déficit hydrique cumulé entre le début du remplissage des graines et la fin du remplissage des graines
t25DF_nj	n	nombre de jours où tmp max > 25° entre l'initiation florale et le début floraison
t25DF_st	dj	somme des tmp max > 25° entre l'initiation florale et le début floraison
t25DRG_nj	n	nombre de jours où tmp max > 25° entre le début floraison et le début du remplissage des graines
t25DRG_st	dj	somme des tmp max > 25° entre le début floraison et le début du remplissage des graines
t25FRG_nj	n	nombre de jours où tmp max > 25° entre le début du remplissage des graines et la fin du remplissage des gr
t25FRG_st	dj	somme des tmp max > 25° entre le début du remplissage des graines et la fin du remplissage des graines

Tableau 3. Note de résistance au gel hivernal et résistance-seuil correspondante pour 15 variétés de pois.

	Variété	Note de 1 à 9	Seuil de résistance
1	Térèse	1	-8.0
2	Caméor	1.5	-9.0
3	Lucy	2.5	-11.5
4	Cheyenne	3	-12.5
5	Enduro	3.5	-13.0
6	Dove	4.5	-15.0
7	Victor	4.5	-15.5
8	Cartouche	5.5	-17.5
9	886-01	5.5	-17.5
10	Cherokee	5.5	-17.5
11	James	5.5	-17.5
12	Isard	6.5	-19.5
13	Blixt 195	7.5	-22.5
14	China	8	-23.0
15	Champagne	8	-23.0

La description du **stress hydrique** ne repose pas sur des notations visuelles, mais sur un modèle de bilan hydrique basé sur le calcul de l'évapotranspiration réelle (ETR) que l'on compare à l'évapotranspiration maximale (ETM), selon la méthode de Météo-France (Brochet et Gerbier, 1974). Le critère retenu pour décrire le déficit hydrique est alors la différence ETR-ETM quand celle-ci est différente de 0. Le calcul intègre un modèle d'élongation racinaire présenté par Vocanson *et al* (2006), pour estimer chaque jour la profondeur d'enracinement. Selon ce modèle, la profondeur d'enracinement est liée à la somme des rayonnements globaux interceptés : $P = 9 \times 10^{-4} \times Srgl$ (en $m.MJ^{-1}.m^{-2}$), avec une profondeur maximale qui est estimée ou indiquée par l'expérimentateur.

Dans un certain nombre de situations, le calcul du bilan hydrique a été conforté par des mesures de tensiomètres, qui permettent de mieux identifier le moment où les plantes commencent à manquer d'eau. Cela permet de préciser la profondeur maximale d'enracinement, de façon à ce que le bilan hydrique commence à être négatif en même temps que la valeur des tensiomètres commence à s'élever.

Le pois peut subir des carences en azote, malgré son caractère fixateur du N_2 atmosphérique. Celles-ci peuvent être induites par des problèmes de formation des nodules fixateurs, par la sécheresse ou tout problème qui perturbe la fixation symbiotique de l'azote. Nous avons donc décrit le statut azoté des plantes par le calcul de l'indice de nutrition azotée au stade début floraison, qui est l'écart entre la teneur en azote mesurée et la teneur en azote critique de la culture (Lemaire et Gastal, 1997). Cela a supposé de prélever des plantes à ce stade pour mesurer la biomasse produite par m^2 et en mesurer la teneur en azote. La teneur en azote critique est déterminée en fonction de la biomasse produite à DF par la relation (Sagan et al, 1993) :

si $MS > 1$ t/ha, $N_{crit} = 5.08 \times MS \exp(-0.32)$

si $MS < 1$ t/ha, $N_{crit} = 5.08\%$

Dans certaines situations la mesure de biomasse au stade début floraison n'a pas été effectuée. Nous avons donc cherché à l'estimer au moyen du logiciel Afisol (Vocanson, 2006), sachant que quelques plantes ont été prélevées pour mesurer la teneur en azote. Dans les situations où nous disposions des deux informations, il s'est avéré que les estimations de biomasse étaient systématiquement supérieures à la réalité. Par ailleurs, dans toutes les situations où l'INN a été calculé (sur la base des mesures effectuées), nous étions toujours en situation excédentaire. Ces constats nous ont conduits à ne pas retenir l'azote comme l'un des facteurs limitants possibles dans ce réseau.

L'ascochytose est typiquement une maladie difficile à noter, et le recours à un modèle était indispensable pour pouvoir estimer correctement le risque associé à ce facteur limitant, et comparer objectivement les essais. Nous avons donc utilisé le modèle SNEP mis au point à l'INRA de Rennes (Schoeny, 2005) qui utilise des données de températures et de précipitations pour décrire le degré potentiel d'infestation des essais par cette maladie. La prise en compte de cette note telle qu'elle, sans correction par les observations, conduit à surestimer le rôle de l'ascochytose, notamment quand des traitements fongicides ont été appliqués.

Toutes les variables descriptives des facteurs limitants ont été converties sur une échelle commune de 0 à 100, croissante avec l'effet du facteur, en utilisant comme valeurs – seuils les valeurs minimales et maximales observées sur le réseau.

3. Réalisation du diagnostic des facteurs limitants, nature des variables expliquées

Le diagnostic repose sur une régression linéaire multiple pas à pas dans laquelle sont introduites les variables descriptives des facteurs limitants par ordre de corrélation décroissante négative avec la variable expliquée (comme les variables décrivent des facteurs limitants, leur effet doit se traduire par une diminution du rendement, les variables corrélées positivement sont donc retirées). A chaque étape peuvent être retirées des variables précédemment introduites qui ne sont plus significatives. Quand la variable expliquée est le rendement, le modèle s'écrit :

$$Rdtr_j = \lambda_0 + \lambda_1.FL_{1j} + \lambda_2.FL_{2j} + \dots + \lambda_n.FL_{nj} + E_j$$

Avec : $Rdtr_j$: rendement obtenu dans le milieu j , FL_{1j} : variable décrivant le 1^{er} facteur limitant explicatif, λ_1 : paramètre associé à FL_{1j} , E_j : résiduelle

Le diagnostic est effectué témoin révélateur par témoin révélateur.

En appliquant cette méthode, on s'aperçoit que le résultat du diagnostic (part de variation expliquée, variables explicatives retenues) montre une certaine instabilité en fonction des milieux retenus dans l'analyse. Pour minimiser ce défaut, nous avons volontairement choisi un seuil d'introduction et de retrait des variables assez élevé (40%), et nous avons estimé les paramètres associés à ces variables par un mélange de modèles (Prost *et al.*, 2008), ce qui en augmente la fiabilité.

Le paramètre λ_0 est une estimation du rendement potentiel de la variété (valeur du rendement quand tous les facteurs limitants ont la valeur 0). La valeur obtenue dans le modèle est donc une indication de la vraisemblance du diagnostic.

L'application du modèle obtenu à chaque situation expérimentale (en utilisant les notes de FL observées) permet d'estimer la contribution de chacun des facteurs limitants aux diminutions de la variable expliquée.

Cette analyse a été réalisée sur les deux variables rendement et rendement en protéines. Nous n'avons pas étudié le taux de protéines car sa valeur dépend à la fois du rendement en protéines et du rendement, et il est très difficile de savoir si un facteur qui affecte à la fois ces deux variables est un facteur qui limite ou qui favorise le taux de protéines : si le rendement en protéines est proportionnellement plus affecté que le rendement, le facteur limite aussi le taux de protéines, alors que si le rendement est proportionnellement plus affecté, ce facteur favorise le taux de protéines.

Résultats

1. Corrélations entre variables descriptives des facteurs limitants

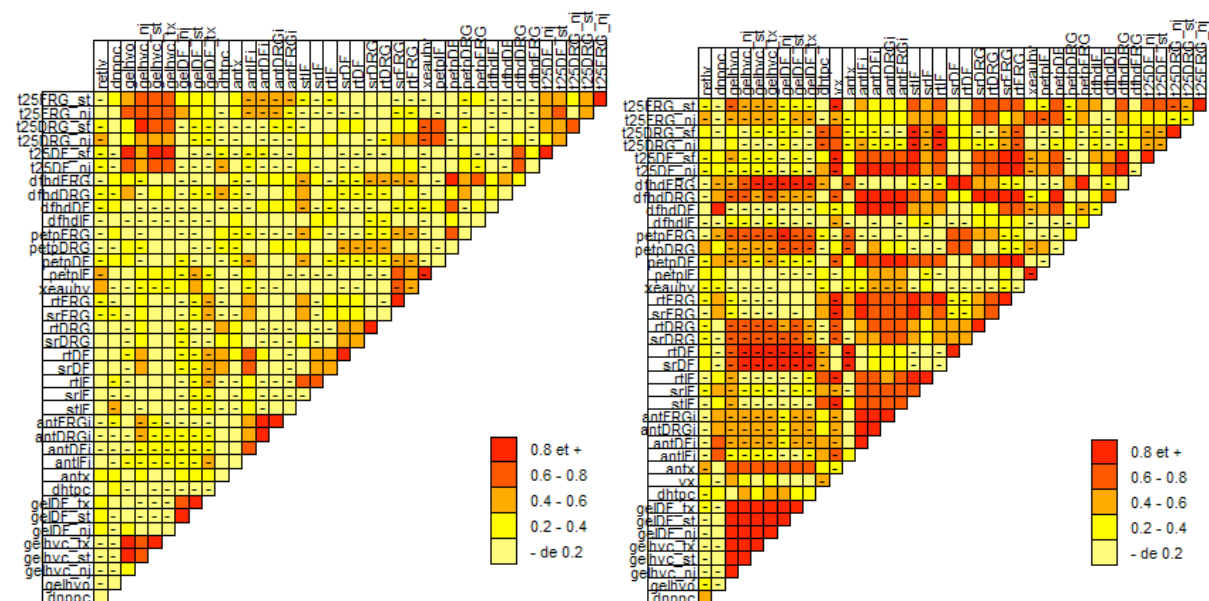
La Figure 2 présente les principaux coefficients de corrélations obtenus entre les variables décrivant les facteurs limitants pour les 2 variétés-témoins Isard et 886/01.

Pour les pois d'hiver classiques (Isard, Cherokee, Cartouche), la plupart des corrélations élevées concernent des variables décrivant le même facteur limitant, ou le même type de facteurs limitants (corrélations proches de la diagonale). C'est le cas du gel hivernal (variables gelhvo et gelhvc_tx ou gelhvc_st), de l'ascochytose (ant-...) et des variables décrivant le rayonnement à différents stades (sr-... ou rt-...), ainsi que des fortes températures au cours du remplissage des graines (variables t25DRG_... et t25FRG_...).

Figure 2. Matrices des corrélations entre les variables descriptives des facteurs limitants pour les 2 variétés-témoins Isard et 886-01 (le code des variables est indiqué dans le Tableau 2).

Variété Isard

Lignée 886/01



Mais on observe aussi des corrélations entre variables décrivant des facteurs limitants éloignés dans le cycle cultural. C'est le cas du gel hivernal (gelhv-...) avec les fortes températures entre IF et FRG (t25-... pour Isard), des fortes températures avec le rayonnement entre DF et DRG (sr-... ou rt-... pour Cartouche).

Des variables apparaissent peu corrélées : le retard à la levée (retlv) pour Isard et Cartouche (pour Cherokee retlv est corrélé avec l'excès d'eau hivernal et les sommes P-ETP jusqu'à l'IF), les pertes de plantes (dnppc), la verse (dhtpc), l'ascochytose (antx, antFRG).

Nous remarquons aussi que les structures de corrélations entre variables sont plus proches pour Isard et Cherokee, qui sont de précocité comparable, que pour Cartouche plus tardive.

Pour la lignée 886-01 de type Hr, on observe logiquement aussi des corrélations entre variables décrivant les mêmes FL : gel hivernal, ascochytose à différents stades, rayonnements et quotients photothermiques à différents stades. Mais on observe aussi un nombre important de corrélations élevées entre variables décrivant des FL différents. C'est le cas du gel hivernal avec les sommes de rayonnements et quotients photothermiques entre IF et DF et entre DF et DRG, et avec la sécheresse

et le déficit hydrique entre DRG et FRG. C'est le cas aussi de l'ascochytose avec les sommes de rayonnements et quotients photothermiques à IF et entre DF et DRG, avec la sécheresse et le déficit hydrique entre DRG et FRG, et avec les fortes températures entre IF et DF.

Un nombre réduit de variables sont peu corrélées. C'est le cas de retlv (retard à la levée) et de dfhdIF (déficit hydrique à l'initiation florale).

Le nombre de corrélations élevées, plus important pour la lignée 886/01 que pour les 3 variétés de pois d'hiver « classiques », indique que le risque de confusion d'effets est plus fort dans le diagnostic des types Hr.

2. Diagnostic des facteurs limitants du rendement

Les rendements moyens obtenus sur les 3 pois d'hiver classiques sont proches (de 55 à 60 qx/ha), nettement plus faibles pour 886-01 (Tableau 4). Les rendements potentiels obtenus sont plausibles, plus élevé pour Cartouche (86 qx/ha), et plus faible pour 886-01 (62 qx/ha). Les coefficients de détermination (R^2) sont légèrement supérieurs à 50% pour Isard et Cherokee, plus élevés pour 886-01 et Cartouche (62 et 66% respectivement). Trois facteurs limitants ont été identifiés pour Isard et Cherokee, 4 pour 886-01 et 6 pour Cartouche. Au total, ce sont neuf facteurs limitants différents qui ont été identifiés. La Figure 3 indique les paramètres associés à chacun d'eux.

Tableau 4. Résultat du diagnostic pour les 4 variétés-témoins.

	nb essais	Rdt moy	Rdt min (essai)	Rdt max (essai)	Rdt pot	R^2	nb FL identifiés
Isard	20	60.41	31.80 <i>Chartainv 2007</i>	87.60 <i>Le Rheu 2009</i>	74.43	51.70	3
Cherokee	18	58.32	19.10 <i>Chartainv 2007</i>	81.70 <i>Le Rheu 2009</i>	74.90	51.20	3
Cartouche	20	55.06	33.60 <i>Chartainv 2007</i>	73.00 <i>Le Rheu 2009</i>	85.83	65.80	6
886_01	20	40.76	15.10 <i>Theix 2007</i>	61.10 <i>Houville 2008</i>	59.87	62.40	4

Le diagnostic met en évidence le rôle prépondérant de la pression d'ascochytose à l'IF pour les 3 variétés de pois d'hiver classiques (tous les essais sont affectés), et à DRG pour la lignée 886-01 (tous les essais sont affectés également). Les fortes températures entre DF et DRG viennent ensuite pour les pois d'hiver classiques (pour presque tous les essais), puis la sécheresse (Cherokee et Cartouche pour tous les essais) et le manque de rayonnement entre DF et DRG (Cartouche pour tous les essais). Cartouche est également affectée par l'excès d'eau (presque tous les essais à des niveaux faibles) et le gel hivernal (5 essais) et Isard par le gel entre IF et DF (tous les essais sont concernés). Le pois d'hiver Hr est nettement affecté par des facteurs limitants de début de cycle : retard à la levée (4 essais) et pertes de plantes (20 essais sur 24), ainsi que par le gel entre IF et DF (qui a concerné presque tous les essais).

Dans ce réseau, la verse n'est pas apparue comme un facteur limitant prépondérant, ni l'alimentation azotée et le stress hydrique (qui intègre le bilan hydrique et donc la réserve en eau du sol), alors que la sécheresse – différence P-ETP, est bien apparue comme un facteur limitant.

Les autres facteurs limitants, qui permettent de démarquer les témoins révélateurs entre eux ont un rôle plus faible. Finalement, Isard et Cherokee ont un comportement assez proche dans leur aptitude à révéler les facteurs limitants, alors que Cartouche se démarque nettement.

L'application de l'équation de régression avec les notes des facteurs limitants permet d'estimer les pertes de rendement occasionnées par chaque facteur limitant dans chaque essai. La Figure 4 illustre ainsi les pertes de rendement estimées dans deux essais contrastés, Auzeville et Mons 2008, en pois d'hiver classiques.

Figure 3. Paramètres β_i associés aux facteurs limitants du rendement sur les 4 variétés témoins (voir code des variables dans le Tableau 2).

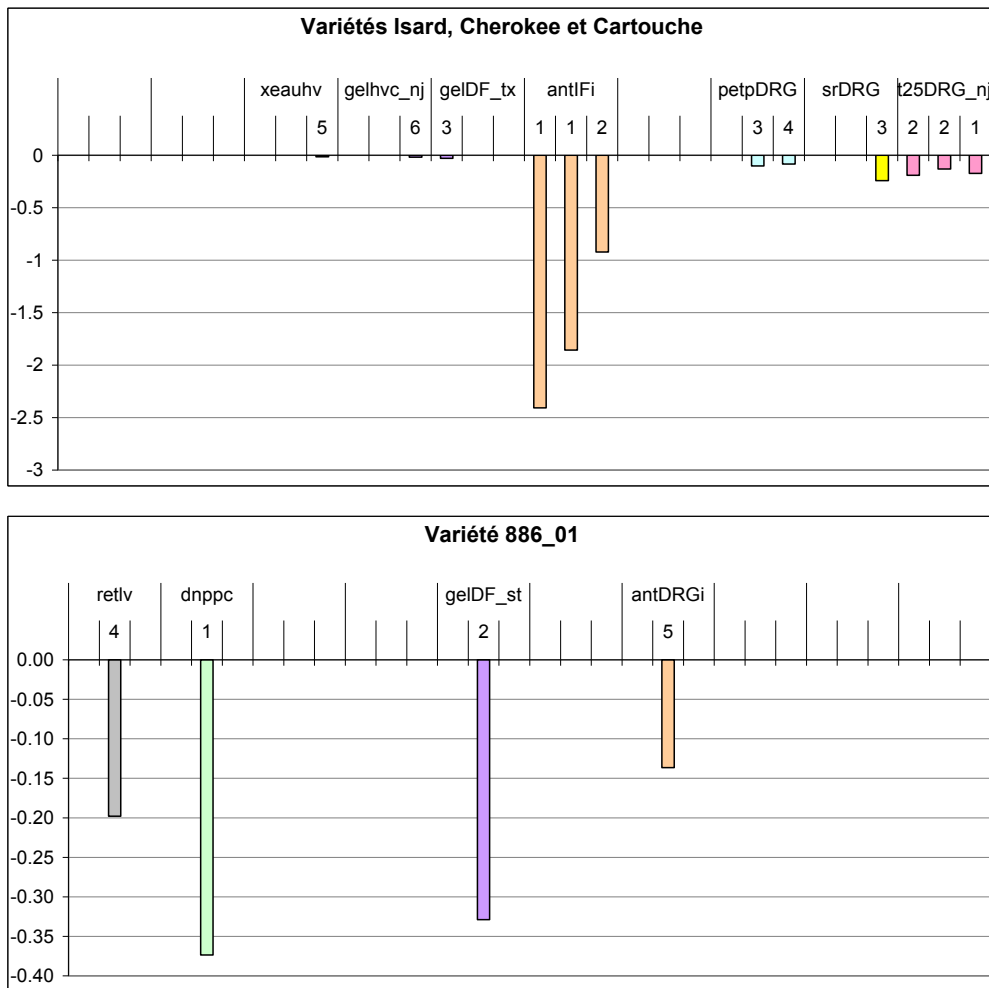
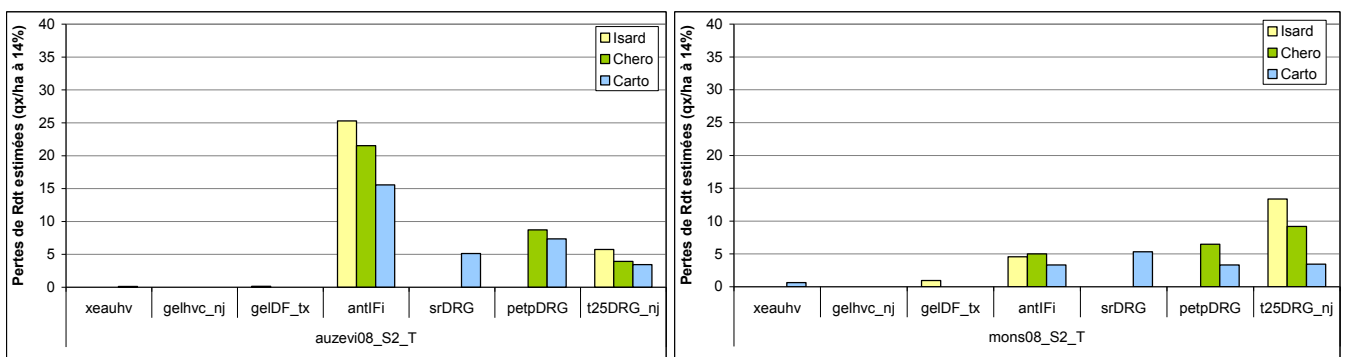


Figure 4. Estimation des pertes de rendement dues aux différents facteurs limitants dans les deux essais Auzeville et Mons 2008 pour les 3 variétés de pois d'hiver classiques Isard, Cherokee et Cartouche (voir code des variables dans le Tableau 2).



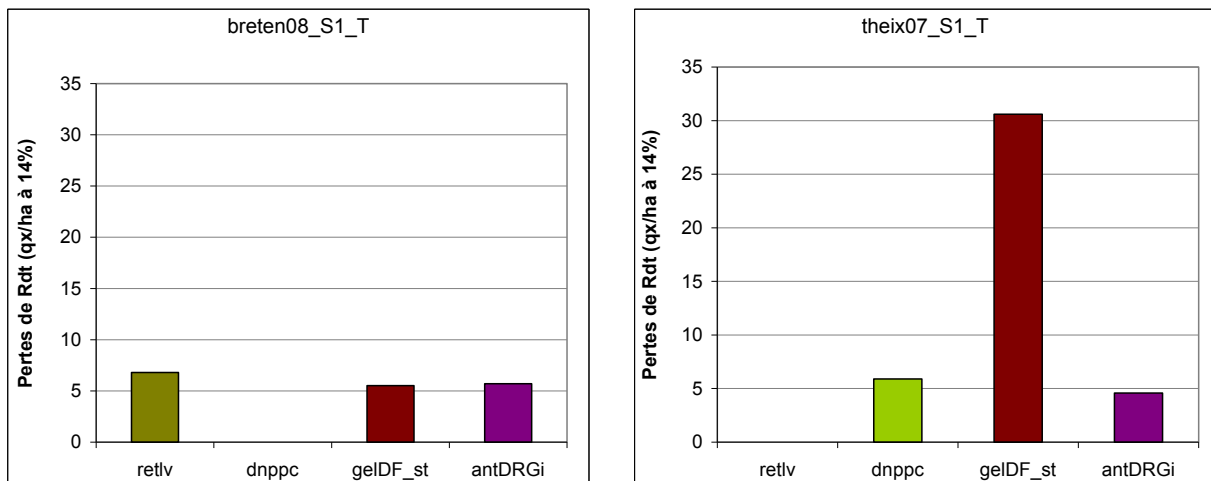
On constate qu'à Auzeville, la pression d'ascochytose à l'initiation florale apparaît comme le facteur limitant le plus influent, avec des pertes de rendement qui atteignent 25 qx/ha pour Isard. Dans cet essai, le premier traitement fongicide a été réalisé le 2 mai 2008, bien après la date de l'initiation florale. A Mons, ce sont les fortes températures entre DF et DRG qui ont eu le rôle le plus marqué, avec des pertes de rendement de 13 qx/ha pour Isard. Dans les deux essais, la sécheresse et le manque de

rayonnement entre IF et DRG ont joué un rôle comparable. Par contre, à Mons, le gel entre IF et DF et l'excès d'eau hivernal ont joué un rôle moindre.

L'analyse comparée entre années montre que les fortes températures entre DF et DRG ont joué un rôle plus marqué en 2007 et que pour la plupart des milieux, l'année 2009 a donné un profil globalement plus équilibré sur les 7 facteurs limitants. La pression d'ascochytose est apparue plus liée au lieu de l'essai qu'à l'année : ainsi les sites du Rheu et de Montesquieu (mais aussi Auzeville en 2008) ont été davantage pénalisés par l'ascochytose que Bretenière et Mons. Une analyse équivalente sur un plus grand nombre d'années nous permettrait de vérifier si effectivement des facteurs limitants apparaissent plus fréquemment dans certains milieux.

Les facteurs limitants de la phase hivernale (excès d'eau et gel) ont un rôle limité dans l'ensemble du réseau. On constate aussi que le gel entre IF et DF, donc sur appareil reproducteur, affecte plus ou moins tous les essais sur la variété Isard, qui est la plus précoce, et que l'avancée de la date de semis (à Bretenière 2008 et 2009 S1 et S2) aggrave ce risque.

Figure 5. Estimation des pertes de rendement dues aux différents facteurs limitants dans les deux essais



Bretenière 2008 et Theix 2007 pour le pois d'hiver Hr 886-01 (voir code des variables dans le tableau 2).

Pour les pois d'hiver Hr, les deux essais Bretenière 2008 et Theix 2007 sont également très contrastés (Figure 5) : Bretenière 2008 est caractérisé par un poids comparable de 3 facteurs limitants, le retard à la levée, le gel entre IF et DF et l'ascochytose à DRG (les pertes de rendement sont estimées à environ 6 qx/ha), alors que Theix 2007 est caractérisé par un très fort effet du gel entre IF et DF (pertes de rendement estimées à environ 30 qx/ha) ; dans cet essai, les pertes de plantes jouent également un rôle, alors qu'il n'y a pas eu de retard à la levée.

3. Diagnostic des facteurs limitants du rendement en protéines

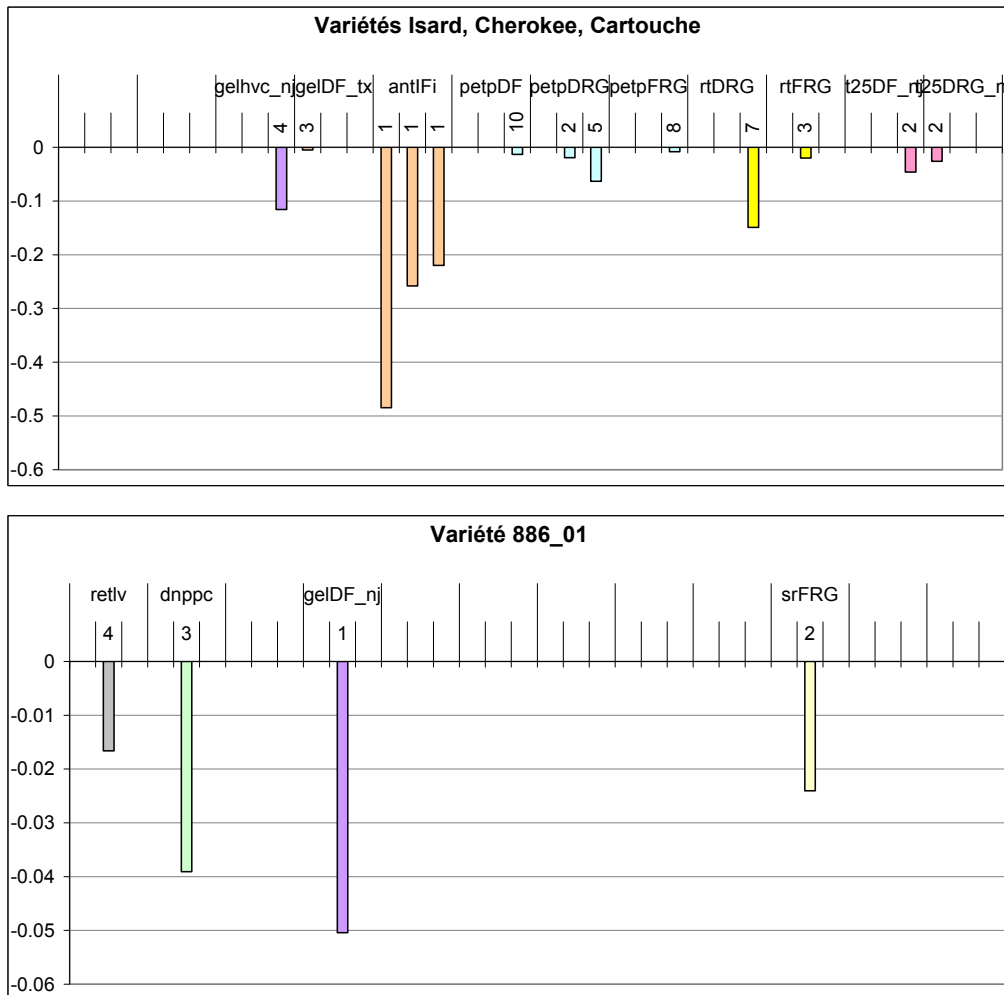
Le diagnostic sur le rendement en protéines est identique à celui obtenu sur le rendement pour la variété Isard (même coefficient de détermination, mêmes facteurs limitants identifiés : Tableau 5). L'ascochytose à l'initiation florale joue toujours le rôle le plus important (Figure 6). La part de variation expliquée (R^2) est inférieure à celle du diagnostic sur le rendement pour Cherokee et 886-01, avec le même nombre de facteurs limitants, supérieure pour Cartouche, avec un facteur limitant de plus. Le

rendement en protéines potentiel est plausible pour Isard, Cherokee et 886-01, un peu élevé pour Cartouche.

Tableau 5. Résultat du diagnostic sur le rendement en protéines pour les 4 variétés-témoins.

	nb essais	RdtP0 moy	RdtP0 min (essai)	RdtP0 max (essai)	(TP min)	(TP max)	RdtP0 pot	R ²	nb FL identifiés
Isard	19	10.83	6.40 <i>Chartainv 2007</i>	16.60 <i>Le Rheu 2009</i>	20.0	23.4	13.82	51.8	3
Cherokee	14	10.36	3.70 <i>Chartainv 2007</i>	13.50 <i>Bretenières 2007</i>	19.9	23.3	14.25	42.5	3
Cartouche	17	9.80	6.40 <i>Chartainv 2007</i>	14.10 <i>Le Rheu 2009</i>	19.2	22.4	26.53	83.8	7
886_01	19	8.49	3.20 <i>Theix 2007</i>	12.90 <i>Mons 2009</i>	20.6	26.1	11.16	49.7	4

Figure 6. Paramètres β_i associés aux facteurs limitants du rendement en protéines sur les 4 variétés témoins (voir code des variables dans le tableau 2).



On constate que les fortes températures pendant le remplissage des graines jouent un rôle moins important pour le rendement en protéines que pour le rendement, ce qui est conforme à ce que l'on sait de l'effet de ce facteur, plus marqué sur l'accumulation de l'amidon que sur l'accumulation de l'azote (Schiltz *et al*, 2005 ; Munier-Jolain *et al*, 2008). Au contraire, la sécheresse et le manque de rayonnement (décrit ici par le quotient photothermique) jouent un rôle plus marqué que sur le rendement.

4. Structuration du réseau expérimental « Hr »

Sur la base des contributions des facteurs limitants aux pertes de rendement, il est possible d'effectuer une classification automatique des essais du réseau, et de relier les groupes obtenus aux facteurs limitants par une analyse en composantes principales. Dans cette analyse, le nombre de groupes est fixé de façon à ce que le coefficient de détermination permis par la structuration soit aussi proche que possible du coefficient de détermination du modèle obtenu dans le diagnostic (c'est-à-dire, pour 886-01 : 62.4%). Ici, c'est une structuration en 6 groupes qui remplit le mieux cette condition. La Figure 7 illustre la classification ainsi obtenue sur le réseau Hr.

Cette classification permet de mettre en évidence des milieux particuliers, comme Theix (site de montagne à 900 m d'altitude), où le gel entre initiation florale et début floraison a eu un rôle important, notamment en 2007 et 2008. L'essai Bretenièrre 2008 se démarque aussi nettement par un important retard à la levée. Mais cela n'est pas une caractéristique de ce milieu que l'on pourrait observer chaque année. On remarque aussi que les essais du site du Rheu se retrouvent dans le même groupe (le groupe 6 caractérisé d'abord par la pression d'ascochytose). On n'observe pas non plus d'effet année très tranché.

Dans une optique d'optimisation du réseau expérimental, on constate que deux groupes (le 3^e et le 6^e) comportent un nombre relativement important d'essais, mais il n'apparaît pas clairement de couples de sites qui se retrouvent systématiquement associés, ce qui aurait indiqué des redondances éventuelles.

La structuration n'a été effectuée que sur quatre facteurs limitants, deux attendus compte-tenu du type variétal étudié (l'ascochytose et les pertes de plantes), deux cohérents avec les précédents ou avec les types de milieux utilisés (le retard à la levée et le gel tardif avant floraison). Il aurait été plausible que d'autres facteurs limitants jouent un rôle, notamment la verse et les stress de fin de cycle : des différences existent bien entre les situations expérimentales, mais elles n'expliquent pas prioritairement les variations du rendement. Une autre piste pour explorer une plus grande diversité de facteurs limitants serait de créer volontairement des situations où des stress particuliers auraient plus de chance d'apparaître, soit en incluant de nouveaux sites (par exemple des sites en sols peu profonds pour provoquer du stress hydrique), soit en introduisant des variations de conduites culturales dans des sites existants (par exemple : conduite irriguée/non irriguée ; semis précoce/semis tardif...).

Conclusions

Notre étude visait à développer le diagnostic des facteurs limitants sur le pois, à partir de la méthode initialement mise au point chez le blé, dans le cadre des essais d'inscription de pois d'hiver. Pour ce faire, nous avons plusieurs pré-requis :

* Les connaissances agronomiques sur le pois étaient encore incomplètes, et une partie de notre travail devait permettre d'acquérir de nouvelles connaissances.

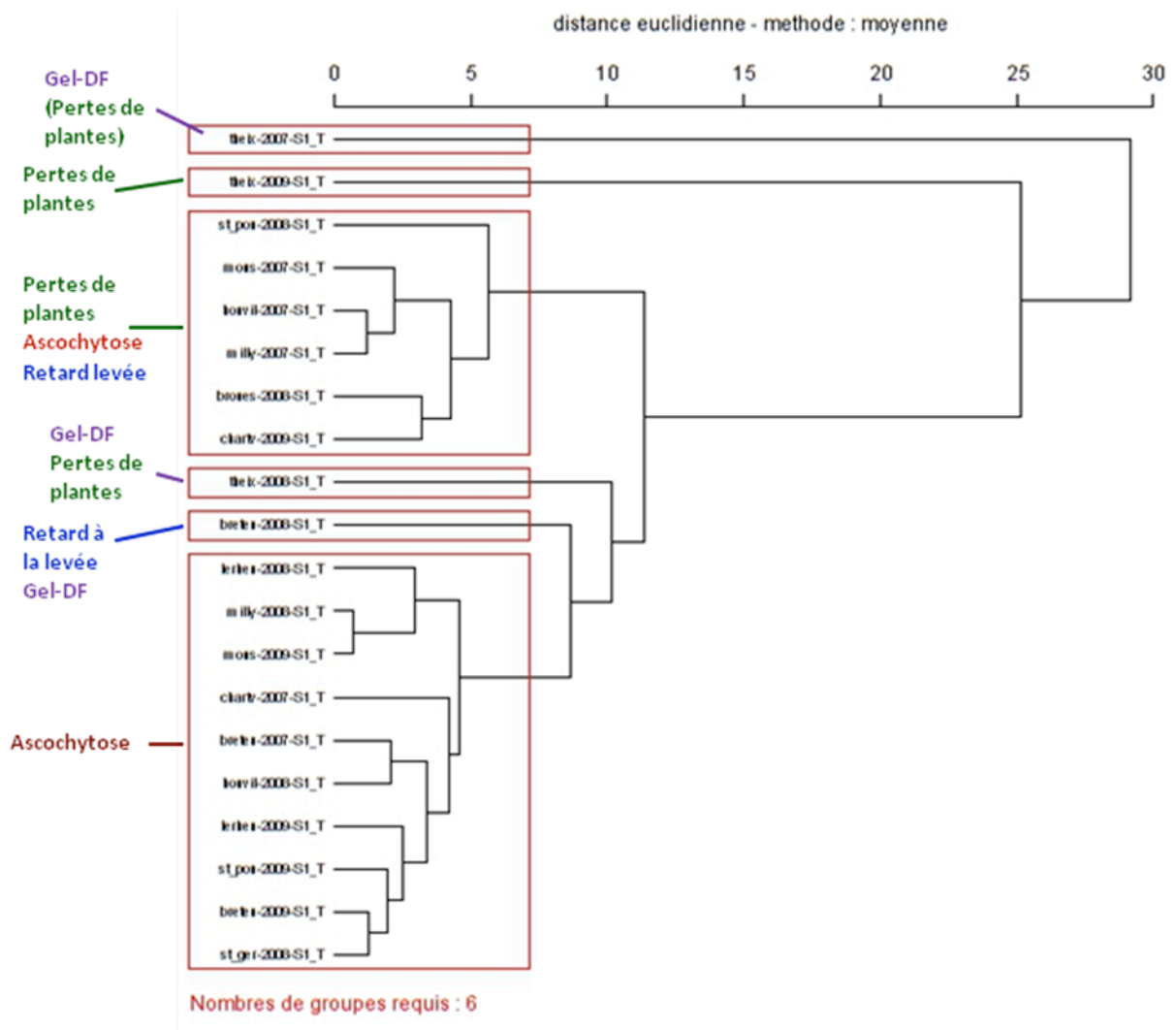
* Un certain nombre de contrôles, notamment les notations maladies, sont difficiles à faire en parcelles entières et ne sont pas standardisés.

* Les partenaires de ce travail ont à conduire une grande quantité d'essais variétaux et ne pouvaient donc ajouter un investissement trop important dans le suivi de ces essais.

* Par suite, un de nos objectifs a été de chercher à valoriser au mieux les données disponibles, en limitant les prélèvements et observations supplémentaires. Cela a conduit à mobiliser au maximum les modèles agronomiques disponibles, ou à en mettre au point de nouveaux, dans l'espoir de compenser une absence de notations. Ceci a été fait pour la détermination de certains stades-repères (initiation florale, début remplissage des graines), l'estimation des dégâts de gel hivernal, la caractérisation de la nutrition azotée et du stress hydrique, et l'estimation de la pression d'ascochytose.

Nous avons ainsi mis au point un modèle simple d'estimation de la date d'initiation florale chez le pois, et l'avons utilisé pour séparer la phase hivernale du début de la phase reproductive. Nous avons également utilisé un modèle simple en somme de températures entre le début floraison et le début remplissage des graines pour estimer la date de réalisation de ce dernier stade. Il en a été de même avec le stade fin de remplissage des graines. Nous avons aussi pu mettre en œuvre un modèle d'estimation de la résistance au gel du pois, dont l'amélioration pourra être poursuivie.

Figure 7. Classification automatique du réseau Hr sur la base des pertes de rendement occasionnées par chaque facteur limitant.



Dans le diagnostic des facteurs limitants du pois d'hiver, les parts de variations expliquées pour la variable rendement vont de 50 à 60%, ce qui montre que des facteurs de variation n'ont pas été correctement pris en compte :

- Un point important est, pour certains sites, l'absence de données météo précises. Cela nous a contraints à utiliser des données approchées qui ne reflètent pas exactement les conditions environnementales « vécues » par l'essai.
- Nous pouvons aussi penser à l'imprécision de la prise en compte des maladies. Pour l'ascochyte, la variable issue du modèle SNEP sort dans presque tous les diagnostics réalisés, soulignant l'importance de cette maladie et la nécessité de progresser sur sa description. Pour les autres maladies, en

l'absence de modèle disponible, des notations visuelles n'ont été réalisées que dans certains cas seulement : cela constitue certainement une carence de notre étude.

- Les variétés de pois ont une floraison plus ou moins indéterminée, ce qui conduit au chevauchement de certaines phases de développement entre étages. De ce fait, des seuils d'effets de certains critères climatiques, valables au moment de la floraison par exemple, ne sont pas adaptés pour la période de remplissage, et un certain nombre de compensations entre étages floraux devraient être pris en compte.

- Le facteur sécheresse apparaît peu explicatif, même s'il est tout de même identifié. D'autres analyses sur pois de printemps ou dans des milieux plus défavorables ont bien fait apparaître la sécheresse et/ou le déficit hydrique comme facteurs limitants importants du rendement. Ce facteur limitant est considéré comme majeur en fin de cycle, même pour le pois d'hiver, ce qui devrait inciter à améliorer les variables pour le décrire.

Par ailleurs, nous avons montré le rôle important de facteurs limitants tels que le gel entre l'initiation florale et le début floraison (pour une variété précoce comme Isard), et du manque de rayonnement pendant la floraison. La lignée-témoin réactive à la photopériode s'est montrée nettement affectée par les conditions de début de cycle (retard à la levée, pertes de plantes).

Pour le rendement en protéines, le diagnostic est proche voire identique au diagnostic sur le rendement en graines (cas d'Isard). Mais des facteurs sont apparus plus déterminants que pour le rendement en graines : manque de rayonnement pendant le remplissage des graines (variétés Cherokee et 886/01), sécheresse à différents stades (variété Cartouche).

Un autre objectif du travail était de fournir des éléments pour construire un réseau expérimental pour le nouveau type variétal HR (réactif à la photopériode). La démarche de diagnostic est basée sur l'exploitation de la diversité des situations expérimentales. Cette diversité doit être augmentée car la structuration ici n'a été obtenue que sur 4 facteurs limitants. Il serait également souhaitable de réaliser le diagnostic et la structuration du réseau sur un autre génotype pour bénéficier de la complémentarité entre variétés, que l'on a bien constatée pour les pois d'hiver classiques.

Une étape ultérieure à ce travail sera d'analyser l'interaction génotype x milieu sur l'ensemble des variétés évaluées dans le réseau, en utilisant la description des milieux pour décomposer l'interaction et en déduire les tolérances variétales aux facteurs limitants. Nous n'avons pas entrepris ce travail ici du fait du nombre réduit de génotypes et du manque d'homogénéité des listes variétales entre années expérimentales. Un élargissement et une stabilisation de la liste variétale pourraient être obtenus en utilisant à la fois les données d'inscription et de post-inscription. Par ailleurs, compte-tenu des coefficients de détermination relativement moyens obtenus dans le diagnostic, cette estimation devra nécessairement recouper les résultats obtenus dans plusieurs réseaux.

Références bibliographiques

Baranger A., Pilet-Nayel M.L., Lecomte C., Hanocq E., Moussart A., Lejeune I., 2010. Quel impact des innovations génétiques pour lever les facteurs limitant la production du pois protéagineux ? *Innovations Agronomiques* 11, 59-78.

Brochet P., Gerbier N., 1974. L'évapotranspiration. Aspect agrométéorologique. Evaluation pratique de l'évapotranspiration potentielle. (Edition revue et complétée). Monographie de la Météorologie Nationale 65, Paris, 67p.

Lecomte C., Giraud A., Aubert V., 2003. Testing a predicting model for frost resistance of winter wheat in natural conditions. *Agronomie* 23, 51-66.

- Lecomte C., Prost L., Gauffreteau A., 2009. Présentation d'une méthode pour améliorer la connaissance des aptitudes variétales, intérêt des modèles, besoins de développements nouveaux. *Innovations Agronomiques* 7, 105-119.
- Lemaire G., Gastal F., 1997. N uptake and distribution in plant canopies. In: G. Lemaire (Ed.), *Diagnosis of the Nitrogen Status in Crops*. Springer, Berlin, pp 3-43.
- Munier-Jolain N., Larmure A., Salon C., 2008. Determinism of carbon and nitrogen reserve accumulation in legume seeds. *Comptes Rendus Biologies* 331(10), 780-787.
- Prost L., Makowski D., Jeuffroy M.H., 2008. Comparison of stepwise selection and Bayesian model averaging for yield gap analysis. *Ecological modelling* 219, 66-76.
- Sagan M., Ney B., Duc G., 1993. Plant symbiotic mutants as a toll to analyse nitrogen and yield relationship in field-grown peas (*Pisum sativum* L.). *Plant Soil* 153, 33-45.
- Schiltz S., Munier-Jolain N., Jeudy C., Burstin J., Salon C., 2005. Dynamics of exogenous nitrogen partitioning and nitrogen remobilization from vegetative organs in pea revealed by ¹⁵N in vivo labeling throughout seed filling. *Plant Physiology* 137(4), 1463-1473.
- Schoeny A., 2005. Anthracnose du pois protéagineux. Développement épidémique et prevision des risqué. Présentation au séminaire *INRA/UNIP/Arvalis* du 24 juin 2005.
- 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 docteur-ingénieur de l'INAPG*, 248 p. + annexes.
- Vocanson A., Jeuffroy M.H., Roger-Estrade J., 2006. Effect of sowing date and cultivar on root system development in pea (*Pisum sativum* L.). *Plant Soil* 283, 339-352.

Annexe 1. Observations et mesures réalisées sur l'ensemble des génotypes et sur les variétés témoins-révélateurs évalués dans les essais.

	Tous génotypes (y compris témoins révélateurs)		Témoins révélateurs	
Objectif	Mettre au point la sélection génomique chez le pois pour la stabilité du rendement et la tolérance aux stress (Maladies, gel, stress hydrique et fortes températures)		1- Identifier et quantifier les facteurs limitants de la production 2- Estimer les tolérances génotypiques à ces facteurs limitants	
Génotypes	Pois de printemps : pépinières 2012 à Dijon, puis 300 génotypes en 2013 et 2014, puis 200 en 2018 et 2019 Pois d'hiver "classiques" : pépinières 2014 à Dijon, puis 300 génotypes en 2015 et 2016 Pois d'hiver "Hr" : pépinières 2018 à Dijon, puis 300 génotypes en 2019 et 2020		Même années que les essais "tous génotypes" En pois de printemps: Hardy, Kayanne, Lumina En pois d'hiver "classiques": Isard, James, Enduro, Cartouche En pois d'hiver "Hr": Geronimo	
Avant le semis	Nature et profondeur du sol Potentiel infectieux pour Aphanomycètes Données parcellaires (longueur et largeur des parcelles, surface retenue pour la récolte) Présence ou non de répétitions Conduites de culture (y a-t-il une variation de conduite?)		Id. (les témoins révélateurs doivent être placés dans le même dispositif que les génotypes qu'ils servent à caractériser, et conduits de la même façon)	
Interventions culturales	Liste des interventions sur l'essai, moyens utilisés, produits (dose et matière active), fertilisation, irrigation éventuelle...		Id.	
Temps de travail et coût	Estimer le temps de travail et le coût associés à chacune des opérations ci-dessus, pour valoriser les expérimentations du WP1 dans le WP5		Id.	
Données météo	Précipitations, Evapo-transpiration potentielle journalières	Distance de la parcelle au poste météo	Id.	
Semis		Date de semis Dose de semis	Date de semis Dose de semis	
Levée		Date de levée	Date de levée	
Après la levée	Note de densité de parcelle	Date de la notation	Id. + Densité de levée par comptage (sur placettes utilisées aussi pour le prélèvement à début floraison) Date de la notation	
Tensiomètres (*)			(1 tensiomètre à 60cm de profondeur, sur le génotype révélateur le plus tardif, sur chaque répétition) Notations au moins 1 fois toutes les semaines Date de la pose Date des notations Température du sol	
Dégâts de gel	Echelle de notation de 0 à 5, ou en % (à préciser)	Date du gel Date de la notation Echelle de notation	Id. Date du gel Date de la notation Echelle de notation	
Notations maladies 1	(Pour les maladies dont le développement est important, au moins 2 notations sont nécessaires: Ascochytose 1, Ascochytose 2...) Echelle de notation de 0 à 53, ou en % (à préciser)	Nature de la maladie Date de la notation Echelle de notation	Id. Nature de la maladie Date de la notation Echelle de notation	
Début floraison (**)	Noter la date du début floraison	Date de début flor.	Id. + Prélèvement pour la mesure de l'INN Date de début flor.	
Notations maladies 2	(id ci-dessus)	Nature de la maladie Date de la notation Echelle de notation	(id ci-dessus) Nature de la maladie Date de la notation Echelle de notation	
Notations verse et accidents	Préciser l'échelle de notation retenue (par ex. en %)	Date de la verse Date de la notation Echelle de notation	Id. Date de la verse Date de la notation Echelle de notation	
Fin floraison	1ère note de hauteur	Date de fin flor. Date de la notation	Id. + Nbre d'étages fol. Date de fin flor. Date de la notation	
Maturité	Note de maturation (% de jaunissement) 2ème note de hauteur	Date de la notation	Id. Date de la notation	
Récolte	Rendement et taux d'humidité de chaque répétition Prélèvement de grains pour PMG et analyses	Date de récolte	Id. Date de récolte	
Analyses sur les graines	Teneur en protéines des graines (modalités des analyses à préciser: centralisées ou sur place, méthode, quantités de graines nécessaires)		Id.	

(*) Les tensiomètres ne servent pas à caractériser directement le statut hydrique, mais à identifier le moment où l'alimentation en eau devient limitante, de façon à fiabiliser le bilan hydrique et à ajuster la réserve utile du sol, souvent incertaine. De ce fait, ils sont utiles même dans des sols à forte composante argileuse.

(**) L'idéal est un prélèvement avec mesure de biomasse par m², donc sur placettes (par ex: 2 rangs contigus de 2 m linéaires), puis analyse de la teneur en azote. Si les placettes sont impossibles, une estimation de la biomasse par un modèle de culture sera effectuée. Mais le dosage d'azote dans les plantes reste nécessaire.