



HAL
open science

Ex ante assessment of varietal innovations in winter pea (*Pisum sativum* L.): Modelling approach at the plot and farm scales

Aurélie Vocanson

► To cite this version:

Aurélie Vocanson. Ex ante assessment of varietal innovations in winter pea (*Pisum sativum* L.): Modelling approach at the plot and farm scales. Sciences of the Universe [physics]. INAPG (AgroParis-Tech), 2006. English. NNT : 2006INAPP0002 . pastel-00001932

HAL Id: pastel-00001932

<https://pastel.hal.science/pastel-00001932>

Submitted on 28 Sep 2006

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.

**Ecole Doctorale ABIES
Institut National Agronomique
PARIS-GRIGNON**

**Institut National de la Recherche Agronomique
Unité Mixte de Recherche INRA - INA P-G
Environnement et Agronomie
GRIGNON**

THESE

Présentée pour obtention du titre de

**DOCTEUR DE L'INSTITUT NATIONAL AGRONOMIQUE
PARIS-GRIGNON**

**Par
Aurélie VOCANSON**

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

Soutenue le 15 mars 2006 devant le jury composé de :

J. Roger-Estrade	Professeur à l'INA-PG	Président
E. Jensen	Professeur et Chef de programme au RISO National Laboratory	Rapporteur
M. Lefort	Directrice de Recherches INRA	Rapporteur
B. Carrouée	Responsable du service technique de l'UNIP	Examineur
M.H. Jeuffroy	Directrice de Recherches INRA (Directrice de thèse)	Examineur
A. Messéan	Directeur de l'Unité de Recherche INRA "Eco - Innov"	Examineur

Avant propos

L'écriture des remerciements est finalement un exercice aussi difficile que celui de la thèse....

Tout d'abord, par principe de précaution (très à la mode en ce moment), je tiens à remercier toutes les personnes rencontrées au cours de ce travail ayant eu une implication directe ou indirecte.

Je remercie Thierry Doré, Directeur de l'Unité Environnement et Agronomie de l'INRA de Grignon, de son accueil au sein de son équipe. L'intégration, à part entière aux différentes réunions (Unité et de pôles, « à mon époque », avant que cela ne devienne des axes), m'a permis d'avoir des échanges intéressants avec les différents membres de l'Unité et de découvrir d'autres sujets d'études. Je remercie également Joëlle Brun et Stéphanie Pineau pour tout le travail administratif que j'ai pu leur occasionner. Merci à Alain Bone pour les « quelques » centaines de références bibliographiques qu'il a toujours réussi à me fournir, malgré les sources parfois très « exotiques », et surtout, avec quelle rapidité (Speedy Gonzalez auvergnat de la biblio !). Je tiens à adresser un remerciement spécifique à Jean-François Fourbet et à David Makowski pour les conseils statistiques qu'ils ont pu m'apporter, ce qui n'a pas du être facile pour eux....

Ce travail a été proposé et encadré par un brillant trio constitué de Marie-Hélène Jeuffroy, Jean-Marc Meynard et Jean Roger-Estrade, chacun avec son style et avec des rôles complémentaires. Marie-Hélène a veillé au quotidien au bon déroulement du travail : j'ai beaucoup apprécié nos discussions, ses conseils, sa disponibilité et ses encouragements. Les rencontres avec Jean-Marc m'ont permis, à chaque fois, de rebondir sur de nouvelles idées, même si, j'en sortais avec la frustrante impression de ne pas pouvoir pu tout noter ou enregistrer.... Les réunions avec Jean étaient très formatrices et m'ont permis d'aller plus loin dans des domaines non connus. Tous trois m'ont largement fait profiter de leur expérience et de leurs connaissances dans leur domaine. Je leur en garderai toujours une grande reconnaissance et une profonde admiration pour leurs compétences tant scientifiques qu'humaines.

Les membres de mon comité de pilotage (Yves Crozat, Stéphane Terrier, Véronique Biarnès, Benoît Carrouée, Nathalie Munier-Jolain, Hubert Boizard, Gérard Etévé) m'ont permis de prendre du recul par rapport au sujet. Leurs conseils et critiques, parfois déroutants, ont été très précieux.

Merci à tous les fournisseurs en semences : GAE recherche pour Cheyenne, Florimont Desprez pour Baccara, Agri-obtention pour Dove et Gérard Etévé pour la nouvelle variété de pois d'hiver Hr. Un grand merci à Hubert Boizard pour avoir consacré du temps à la caractérisation des états structuraux et à l'explication du logiciel Optimas. Je tiens à remercier également Stéphane Terrier et Gérard Etévé pour m'avoir consacré du temps pour me faire découvrir leurs « secrets » de sélection. Merci également à Véronique Biarnès pour avoir toujours répondu à toutes mes questions techniques et pour m'avoir fourni toutes les données dont j'ai eu besoin.

De nombreuses personnes sont intervenues tout au long de ce travail. Je remercie Isabelle Lejeune pour toutes les discussions sur la résistance au froid du pois. Je suis très reconnaissante à Laurence Guichard de m'avoir accompagné la première fois pour l'enquête en exploitation agricole. J'ai énormément apprécié de pouvoir bénéficier de l'expérience en la matière de François Papy. Je remercie le responsable de la CUMA de Beaujardin qui a eu la gentillesse et la patience de nous recevoir et de répondre à toutes nos questions. Je remercie Alexandre Jouannon pour avoir pris le temps de répondre à toutes mes questions concernant OTELO à une période où chaque minute était comptée (fin de rédaction de thèse). J'ai apprécié également le soutien technique de Bertrand Masset. Je tiens à remercier Marianne Le Bail pour les dernières discussions de fin de thèse, importantes pour percevoir au mieux les points à améliorer et surtout... les perspectives. Un dernier merci à David Doussot et à Juliette Dibie-Barhélemy qui m'ont permis de « m'exercer » à l'encadrement de travaux dirigés d'informatique (aussi incroyable que cela puisse paraître !) et d'avoir fait pu faire découvrir à un bon nombre d'étudiants de toute année le modèle pois.

Un grand merci à toute l'équipe technique sans qui aucun des résultats expérimentaux n'aurait pu être obtenu. J'ai été très contente de tous les moments passés ensemble pendant ou hors période d'expérimentation. Je remercie plus spécifiquement Gilles Grandeau pour sa force pour creuser les profils racinaires et ses réponses pratiques à chaque problème (pigeons, traitements,...) ; Mathieu Bazot pour sa bonne humeur permanente et sa qualité de travail ; Béatrice Le Fouillen, Aurélie Chauveau et Véronique Tanneau pour les nombreux prélèvements, les milliers de pesées, micropesées et broyages, ainsi que les heures passées dans le froid ou sous le soleil à quatre pattes dans les profils racinaires ; Christine Souin, devenue experte en « planimétrage » de pois ; Dominique Le Floch pour l'extraction d'un « certain » nombre de fichiers météo et l'installation des sondes TDR, enfin Richard Gossse pour son aide ponctuelle. Je remercie Christine Bouchard, pour ses soutiens sportif (important pour l'équilibre du thésard), technique et amical. J'ai énormément apprécié leur bonne humeur, leur rigueur et l'ambiance de travail. Un grand merci à toute l'équipe technique de Mons qui a permis la conduite avec réussite des expérimentations de Mons. Je leur suis très reconnaissante pour leur disponibilité, leur gentillesse et leur accueil (merci pour les cafés !) à chaque fois que nous débarquions !

«Grâce» à cette thèse, un bon nombre de stagiaires directs ou indirect a découvert ce qu'était le pois. Je remercie Nicolas Vannetzel et Lucie Boiron (stagiaires directs) pour leur rigueur, ardeur au travail et leur réflexion. Merci également à tous les stagiaires d'autres programmes pour leur renfort ponctuel indispensable. Je remercie Martin, sans qui la dernière partie de ce travail ne serait pas ce qu'elle est : son acharnement, sa patience, son calme (surtout vis-à-vis de certain logiciel) et sa rigueur m'ont impressionnée.

Je remercie Françoise Launay, directrice scientifique adjointe et correspondante de l'Ecole doctorale ABIES, pour sa gentillesse et son dynamisme. La diversité des modules de formation proposée permet une ouverture sur d'autres domaines de compétences et j'espère que les futurs thésards sauront pleinement profité de la chance d'y être inscrits.

Special thank to Suzette Tanis Plant for these three sympathetic years of English lesson, and to Alan Scaife for the corrections of the articles presented in this report.

Ce travail a bénéficié du soutien financier de l'Union National des Interprofessionnel des Protéagineux (UNIP), du programme Impact-Pois de l'INRA et du GAE-Recherche. Je remercie donc tous ces partenaires grâce à qui ce projet a pu être initié et mené.

Merci à tous les thésards de l'Unité, groupe non négligeable de l'Unité et évolutif au cours du temps (curieux de passer de « p'tite nouvelle » à «doyenne»). Un remerciement spécifique à trois d'entre eux : Aude Barbottin qui m'a chaleureusement accueillie et initiée au quotidien du thésard (mais à qui j'ai su « résister » jusqu'au bout pour ce qui est du café !), à Sabah Ennaifar : soutien mutuel pendant les derniers mois de thèse et à Matthieu Carof qui a eu la « chance » de passer deux années en colocation de bureau.

Enfin, je tiens à remercier tous mes amis et ma famille pour leur soutien tout au long de ce projet de longue durée. Mes remerciements s'adressent plus particulièrement à mes parents, sans qui je ne serai pas là aujourd'hui, qui m'ont toujours apporté les encouragements dont j'avais besoin et à mon ami, dont le calme et la gentillesse m'ont permis de réaliser même les dernières étapes de la thèse en quasi toute sérénité.

Je dédie ce document à la mémoire de ma grand-mère maternelle, modèle de courage et de persévérance, partie trop tôt pour me voir mener à bien ce travail....

Incroyable la diversité et le nombre de personnes intervenues sur ce projet....

SOMMAIRE

INTRODUCTION.....	7
PROBEMATIQUE.....	12
PARTIE I :	
Effets de l'état structural, la période de semis et la variété sur le fonctionnement aérien et racinaire d'une culture de pois	27
1. Effect of sowing date and cultivar on root system development in pea (<i>Pisum sativum</i> L.).....	28
2. Effects of soil structure on pea (<i>Pisum sativum</i> L.) root development according to sowing date and cultivar.....	47
3. Agronomic performance of different pea cultivars for various sowing periods and contrasting soil structures.....	67
4. Do various sowing conditions change seed quality and environmental value of pea?.....	91
PARTIE II :	
Modélisation du fonctionnement d'une culture de pois semée à l'automne et au printemps : intégration de l'effet de l'état structural, de la période de semis et du type variétal.....	110
1. Introduction.....	111
2. Description des bases de données et des méthodes statistiques utilisées pour mettre au point et évaluer le modèle.....	112
2.1. Bases de données.....	112
2.2. Méthodes statistiques et évaluation du modèle.....	114
3. Description, adaptations et paramétrage du modèle.....	116
3.1. Caractéristiques générales et évolutions du modèle initial.....	116
3.2. Module plante.....	118
3.3. Données d'entrée et de sortie du modèle.....	134
4. Evaluation.....	136
4.1. Risques de stress thermique et azoté.....	136
4.2. Développement.....	137
4.3. Dynamique d'accumulation.....	139
4.4. Elaboration du rendement et de ses composantes.....	142
4.5. Azote et teneur en protéines des graines.....	144
4.6. Enracinement.....	147

5. Discussion.....	148
5.1. <i>Prise en compte de l'effet de la date de semis et de la variété</i>	148
5.2. <i>Croissance aérienne</i>	150
5.3. <i>Accumulation d'azote et teneur en protéines des graines</i>	152
5.4. <i>Simulation de la minéralisation de l'azote du sol et du reliquat après récolte</i>	154
5.5. <i>Enracinement et prise en compte de l'effet de l'état structural</i>	157
6. Conclusion et Perspectives.....	160
6.1. <i>Domaine de validité</i>	160
6.2. <i>Evaluation agronomique et environnementale de nouvelles variétés de pois d'hiver</i>	160
PARTIE III :	
Quels idéotypes pour quels usages ?.....	161
Chapitre 1 :	
Influence du contexte pédo-climatique et de l'itinéraire technique sur l'idéotype de pois...	162
1. Introduction.....	163
2. Plan de simulation.....	166
2.1. <i>Milieux et date de semis</i>	166
2.2. <i>Caractéristiques variétales</i>	168
2.3. <i>Variables étudiées et traitement des données</i>	170
3. Evaluation de l'utilisation du modèle sur les types de pois commercialisés.....	170
3.1. <i>Semis tardif et rendement</i>	170
3.2. <i>Type de pois et stabilité du rendement</i>	172
3.3. <i>Irrigation</i>	174
3.4. <i>Adaptation du type de pois et de l'itinéraire technique à la zone de culture</i>	175
4. Simulations.....	177
4.1. <i>Résultats</i>	177
4.2. <i>Discussion</i>	178
Chapitre 2 :	
Insertion des nouvelles variétés de pois d'hiver dans l'organisation du travail d'une exploitation agricole.....	193
1. Introduction.....	194
2. Matériel et méthodes.....	195
2.1. <i>Modèles utilisés pour le couplage</i>	195
2.2. <i>Présentation générale de la démarche</i>	201
2.3. <i>Réalisation des simulations</i>	202

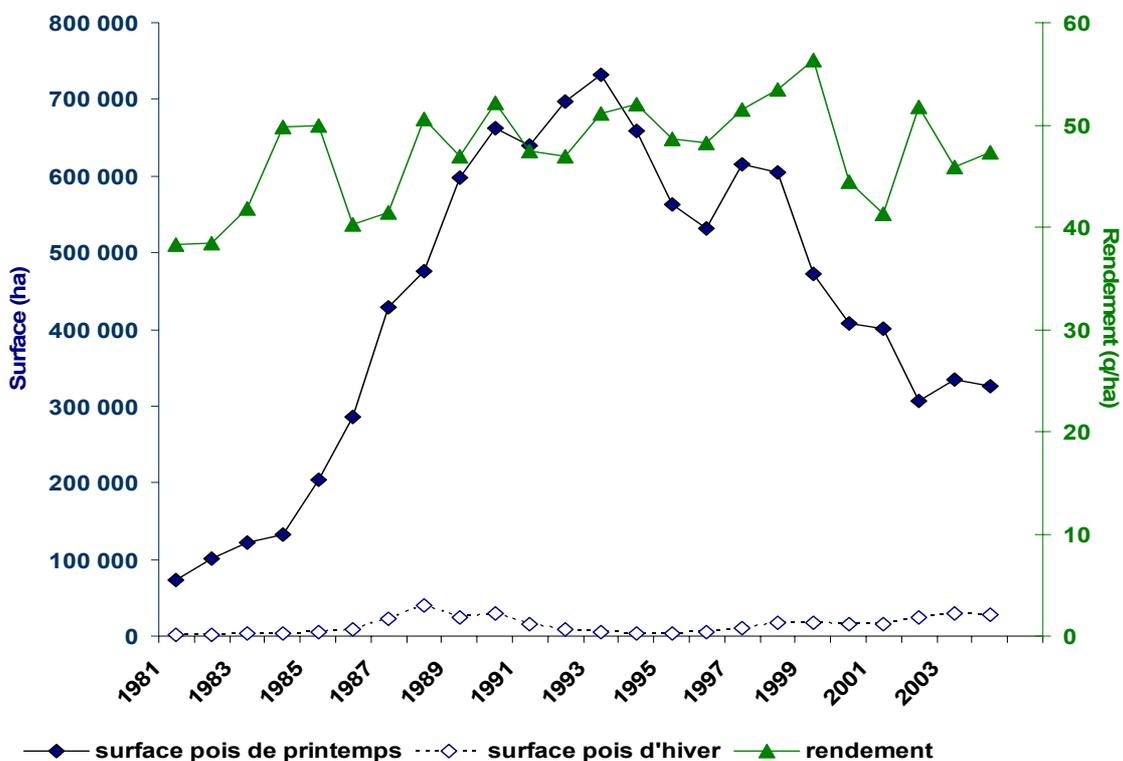
3. Résultats.....	206
3.1. <i>Evaluation des modèles OTELO et « bilan hydrique »</i>	206
3.2. <i>Simulations</i>	211
4. Discussion.....	222
4.1. <i>Effet de l'introduction des nouvelles variétés de pois sur le système de culture</i>	222
4.2. <i>Atouts et limites de la méthode</i>	224
4.3. <i>Perspectives</i>	227
5. Conclusion : retour sur les questions initiales.....	227
CONCLUSION GENERALE & PERSPECTIVES.....	229
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	239
ANNEXES.....	249

*«Savoir pour prévoir afin de pouvoir»
Auguste Comte*

INTRODUCTION

Suite à l'embargo des Etats-Unis sur le soja (1973), la Communauté Economique Européenne (CEE) a décidé dans les années 70, de diminuer sa dépendance en Matières Riches en Protéines. L'année 1978 a ainsi vu le lancement d'un important programme de développement du pois protéagineux au travers d'aides à la production et à la recherche (UNIP-ITCF, 1998). Ce soutien communautaire et la réputation de « bon précédent à blé » de la culture du pois ont contribué à l'augmentation considérable des surfaces cultivées entre 1981 et 1990 (Figure Intro.1), essentiellement en variétés de type printemps. Le semis du pois de printemps se déroulant avant la majorité des autres opérations culturales (semis d'autres cultures de printemps, fertilisations, traitements herbicides), son introduction dans le calendrier cultural des exploitations de grande culture n'a pas posé de problème majeur d'organisation du travail (Doré, 1992). Pourtant, malgré ces atouts, après deux années de stabilisation (1991 et 1992), les surfaces cultivées en pois n'ont cessé de diminuer depuis le début des années 90 (Figure Intro.1) et ce, malgré une progression tendancielle des rendements depuis 1981 de $0.4 \text{ q ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$ (Figure Intro.1), attribuée aux progrès génétiques et agronomiques (Proléa, 2002). Cette décroissance des surfaces en pois a, sans nul doute, plusieurs origines : baisse du soutien des prix à partir de 1992, concurrence des tourteaux d'oléagineux (soja, colza,...), développement des problèmes d'*Aphanomyces euteiches* dès les années 90 (maladie racinaire pouvant causer jusqu'à 100% de perte de rendement), mais l'une des principales est la grande instabilité des rendements liée essentiellement à l'occurrence de stress hydriques et thermiques de fin de cycle et de tassement au moment du semis. Comme le suggère Debaene (1996), pour maintenir la compétitivité du pois, la régularisation du rendement est un facteur déterminant.

Figure Intro.1. Evolution des surfaces (ha) semées en pois de printemps et d'hiver hr et du rendement moyen national (q ha^{-1}) en France (source : UNIP).



En effet, les pois de printemps fleurissent de fin mai à mi-juin (selon les variétés, la date de semis et la région). L'élaboration du nombre de graines, principale composante du rendement (entre les stades début floraison et fin de franchissement du seuil limite d'avortement), a donc lieu à une période pendant laquelle les risques de stress hydriques et thermiques sont très élevés (Dumoulin et al., 1994 ; Uzun et Açıkgöz, 1998 ; Guilioni et al., 2003). Pour réduire ces risques, les agriculteurs cherchent souvent à semer le plus tôt possible dès la sortie hiver. Or, à cette période, les sols sont souvent gorgés d'eau et les précipitations peuvent être importantes. Les semis précoces sont donc souvent réalisés en conditions humides, avec un risque de tassement non négligeable (Doré, 1992). Pour semer en conditions plus favorables, les semis peuvent être retardés, ce qui accroît les risques de stress hydriques et thermiques de fin de cycle et réduit la durée du cycle, donc diminue le potentiel de rendement.

Pour relancer la culture du pois en France, les sélectionneurs se sont tournés vers l'utilisation de variétés de type hiver. Leur relativement faible résistance au froid conduit à les semer entre début novembre et fin décembre en fonction des régions (photo 1). Le début floraison a alors lieu entre fin avril et mi-mai selon les dates de semis, les variétés et la région, période pendant laquelle les risques de stress hydriques et thermiques sont faibles. Cet avancement de la période de floraison pourrait également permettre un évitement des attaques de cécidomyies, ravageurs extrêmement nuisibles (I. Chaillet, communiqué de presse du 3 septembre 2002). Toutefois, la période de résistance au froid des variétés de pois d'hiver actuelles ne dépasse guère le stade 2 feuilles (Lejeune-Hénaut et al., 2004), ce qui leur confère une plage de dates de semis étroite (Ney et Duc, 1996), souvent caractérisée par des conditions humides. Cette courte période de présence de la culture à l'automne ne permet, par ailleurs, pas un stockage d'azote dans les plantes suffisant pour réduire de façon significative le lessivage hivernal de nitrate.

Photo 1. Nouvelle variété de pois d'hiver Hr200 en cours de sélection (à gauche) et variété de pois d'hiver commercialisée Cheyenne (à droite) (9 mai 2003, semis du 27/02/03, Grignon).



Photo 2. Nouvelle variété de pois d'hiver Hr200 en cours de sélection (9 mars 2004, semis du 13/10/03, Grignon).



Depuis quelques années, les sélectionneurs privés et publics (GAE-Recherches et INRA¹ entre autres) travaillent sur de nouveaux génotypes de pois d'hiver, très réactifs à la photopériode, avec un objectif de première mise sur le marché en 2007 (photos 1 et 2). La réactivité de l'initiation florale à la photopériode est sous le contrôle du gène Hr, issu du pois fourrager, par opposition aux variétés commerciales, dites hr pour lesquelles l'initiation florale dépend autant de la photopériode que de la température (Lejeune-Hénaut et al., 2004). Cette spécificité se traduit par une date d'initiation florale très peu variable entre années et pour une large gamme de dates de semis : elle se produit pour une durée du jour de 13h30 pour les variétés en cours de sélection (Lejeune-Hénaut et al., 2004). Ces génotypes auraient une phase de résistance au froid (entre les stades levée et initiation florale) plus longue que les variétés actuelles de pois d'hiver, ce qui permettrait de les semer dès le début du mois d'octobre.

Plusieurs hypothèses ont été émises quant aux conséquences agronomiques et environnementales de ces nouvelles caractéristiques. L'allongement du cycle de la culture, les meilleures conditions d'implantation et l'avancement du cycle reproducteur devraient contribuer à augmenter la productivité (rendement et teneur en protéines des graines) et sa stabilité. Grâce à la plus longue résistance au froid de ces nouvelles variétés, la zone de culture du pois pourrait être plus étendue dans le nord. La présence, pendant l'hiver, d'une culture ayant un système aérien et racinaire plus développés limiterait les pertes de nitrate en hiver. De plus, la meilleure adéquation entre les besoins en eau et les conditions climatiques permettrait d'étendre la culture du pois dans des « petites terres », i.e. avec une réserve utile de 70-100 mm (I. Chaillat, communiqué de presse du 3 septembre

¹ Institut National de la Recherche Agronomique

2002). Ces promesses sont-elles réalistes ? Plus précisément, à quelles conditions (caractères variétaux associés, types de systèmes de culture dans lesquels ces innovations pourraient être introduites, régions dans lesquelles elles pourraient avoir un intérêt,...) le sont-elles ? Répondre à de telles questions, alors que les variétés innovantes ne sont pas encore sur le marché, est important, autant pour guider leur sélection que pour faciliter leur développement commercial.

Cette thèse vise à développer des outils et méthodes permettant d'évaluer, avant leur mise en marché, des variétés innovantes de pois d'hiver, en analysant leur insertion dans les systèmes de culture et de production. Plus précisément, le travail présenté ci-après a pour objectif de déterminer, de manière prospective, les intérêts agronomiques et environnementaux qui seraient induits par l'adoption de ce nouveau type de pois, d'une part dans différents contextes pédo-climatiques et, d'autre part, en considérant les contraintes d'organisation du travail au sein des exploitations agricoles.

PROBLEMATIQUE

1. Une question générale adressée à la recherche : revisiter les critères d'évaluation des variétés

L'expérimentation est le moyen le plus utilisé actuellement en sélection pour évaluer les génotypes² d'intérêt (Lecomte, 2005). Elle peut prendre différentes formes en fonction de l'étape de sélection considérée et de ses objectifs (Lecomte, 2005). Par exemple, dans le schéma de sélection du pois d'hiver de type Hr (Figure Pr.1), les premières générations sont d'abord semées en lignes (2000 à 3000 lignées), et les générations suivantes sont comparées sur des parcelles dites « agronomiques » (de 2 à 3 m² pour 250 lignées à l'INRA) (G. Etévé et S. Terrier, com.pers.). A l'issue de la sélection, lors de la phase d'inscription, les génotypes identifiés par les obtenteurs comme potentiellement intéressants pour la mise en culture sont testés dans une dizaine de milieux en France. Or, les performances des génotypes dépendent fortement des conditions environnementales qu'ils rencontrent pendant leur cycle cultural : il existe une forte interaction génotype x environnement. On peut donc se demander si ces conditions d'expérimentation sont suffisantes pour juger des performances attendues des génotypes testés, dans la gamme des conditions qui existeront en culture, et de leurs intérêts pour les agriculteurs. Pour le pois d'hiver, dans les essais réalisés en « parcelles agronomiques », la conduite culturale (traitements herbicides et fongicides) appliquée est choisie pour être représentative des futures conditions de culture de ces variétés (S. terrier, com. pers.). Plus spécifiquement pour les nouvelles variétés de pois d'hiver Hr, le semis est réalisé lors de la première décennie d'octobre, et donc généralement dans des conditions potentielles. En parcelles agricoles, les contraintes d'organisation du travail, importantes à l'automne (Sebillotte, 1986), amènent l'agriculteur à ne pas toujours réaliser ses opérations techniques dans les meilleures conditions. En lien avec ces conditions d'évaluation, la sélection risque de ne sélectionner que des innovations variétales qui présentent les meilleures performances en situations optimales et non dans les situations réelles de culture. Les impacts des innovations variétales peuvent ainsi être très différentes selon les caractéristiques des systèmes de culture dans lesquels elles sont insérées (Fargue et al., 2005). Le sélectionneur a donc tout intérêt à prévoir, le plus en amont possible de la phase de sélection, les impacts attendus des génotypes qu'il vise à développer (Messéan et al., 2003; Meynard et Jeuffroy, 2002), dans leurs conditions probables de culture. Cette demande de la part des sélectionneurs vers les agronomes est d'ailleurs de plus en plus fréquente, en lien avec l'évolution rapide et parfois radicale des systèmes de culture pratiqués.

Le programme de sélection du pois d'hiver Hr est très récent à l'INRA comme dans les entreprises privées. Le critère de sélection des nouvelles variétés de pois d'hiver Hr actuellement le plus important est la résistance au froid. C'est le seul utilisé lors de la sélection des premières générations (G. Etévé, com. pers.). Dans un second temps, le matériel végétal est évalué sur d'autres critères, tels le rendement, la résistance à l'anthracnose, la verse. Par exemple, dans le schéma de sélection des pois d'hiver Hr du GAE Recherche (Figure Pro.1), les critères d'évaluation et de tri des génotypes sont, par ordre d'importance, la résistance au froid, le rendement, la précocité à début floraison, fin floraison et maturité, la hauteur à la récolte, la verse et la teneur en protéines des graines (S. Terrier, com. pers.). Les critères d'évaluation des génotypes sont étroitement liés à ceux utilisés par le CTPS³, qui ne sont pas forcément les plus adaptés aux enjeux de la filière. Notamment, la variabilité interannuelle du rendement ne fait actuellement pas partie des critères d'évaluation lors de l'inscription alors que c'est probablement aujourd'hui l'un des critères majeurs utilisés par les

² Ensemble du matériel génétique chromosomique et cytoplasmique d'un organisme, transmis par les gamètes au cours de la fécondation (définition citée par Lecomte, 2005).

³ Comité Technique Permanent de la Sélection

agriculteurs pour renoncer à la culture du pois. C'est donc un facteur important sur lequel peut s'appuyer l'agriculteur pour déterminer le risque qu'il aura à introduire ces nouveaux types de variétés dans son assolement et donc qui peut conditionner la réussite de leur adoption. Il nous est donc apparu indispensable de caractériser l'intérêt de nouvelles constructions génétiques par rapport à leurs effets sur la variabilité du rendement, dans une plus large gamme de conditions de culture que celles généralement explorées dans les essais.

Le nombre de lieux de test est limité pour des raisons logistiques et économiques. Par exemple, de la génération F1 à la génération F4, les génotypes sont cultivés dans un seul lieu par le GAE Recherche (S. Terrier, com. pers.). C'est uniquement à partir de la génération F5 que leur intégration dans un réseau multi local commence (S. Terrier, com. pers.), dans quatre sites en moyenne. A l'INRA, la résistance au froid des deux premières générations est testée dans trois lieux, avec un site localisé en montagne (conditions extrêmes afin d'être très sélectif dès l'initiation du programme). Dans les étapes suivantes de sélection, les parcelles agronomiques se situent dans un premier temps sur deux sites à climat contrasté. Enfin, dans un second temps, le matériel végétal avec un intérêt agronomique fort est mis en culture dans des sites à conditions climatiques drastiques et spécifiques, qui ne correspondent pas nécessairement aux futures conditions de culture, afin de le soumettre à diverses pressions de sélection (maladies, stress hydriques et thermiques,...), dans l'objectif de ne garder que le matériel le plus performant (G. Etévé, com. pers.). Ces essais sont le plus souvent réalisés une seule, ou au plus, deux années. Les résultats sont donc très dépendants des conditions climatiques de ces années, avec le risque de ne pas rencontrer ces conditions discriminantes pendant les années d'évaluation. Or, les performances agronomiques, tels le rendement et la teneur en protéines des graines, dépendent principalement du milieu, la part du génotype et de l'interaction entre ces deux facteurs étant plus faible. Ainsi Lecomte (2005) rapporte que, chez le blé, de 50 à 80% de la variation totale de l'une de ces caractéristiques est liée au milieu (avec un poids très important de l'effet année) contre 10 à 25% de la variation totale pour l'effet génotype et l'interaction entre ces deux facteurs. Les caractéristiques des nouvelles variétés de pois d'hiver Hr permettant d'imaginer un élargissement de la zone de culture du pois par rapport à la zone actuelle de culture des variétés de printemps, ce faible nombre de sites de test est certainement insuffisant pour prévoir l'intérêt de ces nouvelles variétés (Meynard et Jeuffroy, 2002). Ne risque-t-on pas, sur la base des résultats de ces essais, d'éliminer des génotypes qui pourraient être intéressants dans certains milieux spécifiques, plus particulièrement où les variétés de type printemps sont trop risquées actuellement ? Inversement, ne risque-t-on pas de sélectionner des variétés qui auraient un intérêt dans un trop petit nombre de situations et qui seraient rejetées dans les autres ?

Enfin, de nos jours, l'agriculture doit de plus en plus concilier des exigences non seulement économiques mais également environnementales, à court et long termes (Meynard et Jeuffroy, 2002), celles-ci n'étant généralement pas prises en compte dans les schémas de sélection actuels. En effet, les impacts de l'introduction d'une innovation variétale au sein d'un système de production, telle une modification de date de semis, peuvent avoir des conséquences non négligeables aussi bien sur la gestion de l'azote que sur la structure du sol qu'il serait nécessaire de considérer dès les processus de sélection afin d'intégrer les objectifs d'une agriculture plus durable.

Comme le suggèrent Meynard et Jeuffroy (2002), il est donc fondamental de revoir les critères et les conditions d'évaluation de nouvelles variétés, dès la phase amont de la sélection, en tenant davantage compte des impacts probables de leur insertion dans les systèmes de culture.

2. Démarche générale : l'utilisation de modèles agronomiques pour une évaluation *ex ante* des variétés dans les systèmes de culture

Différentes méthodes d'évaluation *ex ante* des variétés dans les systèmes de cultures sont décrites dans la littérature.

Tout d'abord, des connaissances expertes peuvent être mobilisées afin d'étudier les possibilités d'accroissement d'une culture de maïs, méthode utilisée par Fleury (1970) pour le maïs dans le nord ouest de la Mayenne. Cette démarche nécessite qu'un minimum de références techniques existe sur la culture et sur les conséquences de son insertion dans un système de production. Dans notre étude, les variétés étudiées ont des caractéristiques très différentes des variétés cultivées, conduisant à l'application de techniques très différentes (notamment en terme de date de semis). L'absence de connaissances sur ces génotypes limite donc l'utilisation de cette méthode.

Ensuite, comme vu précédemment, l'expérimentation est un outil fondamental, au cours de la sélection, qui permet de mettre en évidence les variations de comportement entre variétés dans quelques milieux contrastés (Lecomte, 2005). Dans le cas spécifique de la sélection des nouvelles variétés de pois d'hiver Hr, les risques de gel (Etévé et Derieux, 1982) ou de stress hydriques et thermiques (Lecoeur, 1994 ; Guilioni, 1997), responsables du niveau et de la stabilité du rendement, sont très variables en fonction du lieu et de l'année. Pour vérifier la plus grande stabilité des nouvelles variétés de pois d'hiver Hr et disposer d'une information suffisamment fiable sur leur comportement dans les zones de culture probables, il serait donc nécessaire de réaliser de nombreux tests expérimentaux, pendant un nombre important d'années et dans une large gamme de régions. Or les contraintes temporelles et financières (d'autant plus pour le pois dont les surfaces cultivées sont faibles) limitent le nombre d'essais pouvant être réalisés au champ en cours de sélection. Avant d'engager de lourds programmes de sélection, il serait donc intéressant d'évaluer, par d'autres moyens, l'existence de cette stabilité plus élevée pour ce nouveau type de variétés de pois et d'identifier les caractéristiques génotypiques permettant de la garantir dans différents environnements. De plus, la limitation de la quantité de semences disponibles pour ce matériel végétal nouveau peut être un facteur limitant à la réalisation d'essais variés.

La disponibilité de nombreux modèles de culture permet l'exploration rapide de scénarios techniques innovants (Probert et al., 1998).

L'utilisation de modèles de culture, en complément de l'expérimentation, se développe de plus en plus ces dernières années comme outil d'aide à la sélection (Hammer et Vanderlip, 1989; Smith et Gooding, 1999 ; Asseng et al., 2002). Ces modèles intègrent d'une part un grand nombre de connaissances sur le fonctionnement des cultures, y compris leur réaction face à des facteurs limitants, et, d'autre part, des paramètres variétaux reflétant la variabilité du comportement des génotypes face aux variations de l'environnement (Barbottin, 2004). Ces outils permettent donc de déterminer les caractères variétaux favorables à l'adaptation des génotypes dans des environnements variés (Boote et al., 1996 ; Barbottin, 2004). Ils peuvent être utilisés pour extrapoler dans le temps et dans l'espace les résultats issus d'expérimentations et contribuer à déterminer la productivité potentielle de nouvelles variétés (Shorter et al., 1991 ; Singh et Virmani, 1996). Les modèles permettent également d'imaginer les résultats que pourraient fournir des variétés non encore sélectionnées, mais qui combindraient différents caractères d'intérêt. **Nous avons donc utilisé dans notre étude, un modèle de culture pour évaluer *a priori* les intérêts et les limites de constructions génétiques originales, combinant différents caractères.**

Toutefois, l'évaluation des variétés ne peut se réduire à prévoir leurs performances dans différents environnements pédo-climatiques. Comme l'ont mis en évidence Fargue et al. (2005), chez le colza, les impacts de caractéristiques variétales innovantes (nanisme et cléistogamie) sont très variables selon les caractéristiques du système de culture dans lequel elles sont insérées. Chez le pois, Ranalli et al. (1997) ont mis en évidence une interaction entre date de semis et génotype : aucune lignée testée ne s'est distinguée, en terme de niveau de rendement, simultanément pour les deux périodes de semis (automne ou printemps). Le positionnement de la date de semis par rapport au niveau de résistance au froid de la culture, fonction de son stade (Lejeune-Hénaut et al., 2004), est également un élément important à considérer pour l'exploration de nouvelles zones de culture pour ces nouvelles variétés de pois d'hiver Hr, aptes à être semées pendant une période très large. En effet, la date de semis aura un effet important sur le positionnement calendaire de la phase reproductrice et donc sur les risques de stress hydriques et thermiques, influençant fortement les performances agronomiques. Par ailleurs, la modification de la date de semis du pois, permise par la grande réactivité à la photopériode et la plus longue résistance au froid des génotypes Hr, aura une influence sur les conditions d'humidité du sol, et donc sur la structure du sol⁴ (Kay, 1990) au moment des semis de pois et des autres cultures nécessitant des interventions techniques à cette même période (Tableau Intro.1). Or les performances agronomiques et environnementales d'une culture diffèrent selon la structure du sol qui la caractérise (Dexter, 1997). Ce facteur est donc indispensable à prendre en compte dans l'évaluation des variétés dès l'étape de sélection pour anticiper le mieux possible les possibilités de développement de ces nouvelles variétés. **Nous avons donc utilisé un modèle de culture intégrant les éléments du système de culture susceptibles d'influer sur les performances agronomiques et environnementales de ces nouvelles variétés, en particulier la date de semis et l'état structural du sol, pour réaliser l'évaluation des nouvelles variétés.**

L'agriculture est aujourd'hui évaluée sur des critères très variables, compte tenu des nouveaux objectifs qui lui sont assignés, en relation avec les exigences du développement durable. Les sélectionneurs doivent donc prendre en compte ces critères, le plus tôt possible dans l'identification des objectifs de sélection. Les impacts des cultures sur l'environnement doivent aujourd'hui être quantifiés, au même titre que le rendement et la qualité. Ces critères sont souvent difficiles d'accès car ils ne sont accessibles que sur des pas de temps longs (teneur en nitrate des nappes souterraines). Pour atteindre cet objectif, les modèles peuvent aider les sélectionneurs à considérer ces critères lors de l'évaluation d'innovations variétales.

Les possibilités de semer les nouvelles variétés de pois Hr aux dates optimales pour valoriser leurs caractères sont étroitement dépendantes du calendrier de travail à l'automne, période chargée au sein des exploitations agricoles (Sebillotte, 1986) et des priorités de travail choisies par l'agriculteur. Compte tenu des contraintes de temps très fortes liées au caractère saisonnier de l'agriculture et aux aléas climatiques, l'organisation du travail est une préoccupation très ancienne de cette activité (Sebillotte, 1986). Le risque de ne pas pouvoir semer aux dates optimales n'est donc *a priori* pas négligeable et pourrait limiter l'intérêt de ces variétés Hr. **Nous avons donc cherché à déterminer l'existence de ce risque et à quantifier les performances de l'innovation variétale dans ce cas. Ce faisant, nous avons tenté de préciser les conditions techniques dans lesquelles ces nouvelles variétés auraient un intérêt agronomique et environnementale.**

Le niveau de complexité du modèle à privilégier pour réaliser cette analyse prospective est tout d'abord fonction des objectifs d'utilisation (Boote et al., 1996). L'utilisation de modèles simples avec

⁴ Définie comme l'hétérogénéité spatiale des différents composants du sol par Dexter (1988)

peu de paramètres semble plus appropriée dans un objectif d'optimisation de la conduite de culture. Inversement, pour l'évaluation de caractéristiques génétiques d'intérêt, des modèles mécanistes plus complexes peuvent être nécessaires (Boote et al., 1996), mais pas indispensables (Barbottin, 2004). Toutefois, l'usage de modèles par des acteurs peu familiers de la modélisation est d'autant plus aisé que le nombre de variables d'entrée et de paramètres est faible et qu'ils sont facilement accessibles (Fargue et al., 2004). En effet, la multiplication des variables d'entrée et paramètres augmente les risques d'erreur de prédiction et limite l'utilisation du modèle par indisponibilité des valeurs (coûts, accessibilité technique) (Boote et al., 1996). Lecomte (2005) a d'ailleurs mis en évidence que des outils d'aide à la sélection, autres que l'expérimentation, existaient mais que la complexité de leur utilisation et la prise en compte non suffisante par les concepteurs des besoins des futurs usagers expliquaient leur très faible utilisation.

Dans cette étude, nous avons donc essayé de mettre au point une méthode, basée sur la modélisation, qui permette d'évaluer, sur de nouveaux critères et à une nouvelle échelle (exploitation agricole), en tenant compte des caractéristiques du système de culture dans lequel elles seraient insérées, les nouvelles variétés de pois d'hiver Hr, actuellement en cours de sélection.

3. Acquisition de connaissances nouvelles sur les fonctionnements aérien et racinaire du pois pour différentes conditions de semis

Le pois d'hiver étant peu cultivé en France, jusqu'à présent, la plupart des expérimentations ont été conduites pour des variétés de type printemps, semées au printemps. Il existe donc un cruel manque de connaissances sur le fonctionnement des variétés de type hiver, et en particulier des nouvelles variétés Hr. Par ailleurs, les effets d'un changement important de la période de semis et de l'état structural du sol, deux facteurs de variation des conditions de culture liés au choix variétal, sur le fonctionnement d'une culture de pois ne sont pas bien connus et, de ce fait, mal pris en compte dans les modèles. En particulier, ces deux facteurs ont un rôle important sur la mise en place et le fonctionnement du système racinaire des plantes (Jordan, 1987 ; Chopart, 1994). Nous pouvons donc supposer que les changements de conditions de semis, liés au choix variétal, auront des conséquences importantes sur le fonctionnement du système racinaire, susceptibles d'expliquer une partie des différences de performances entre les types variétaux.

3.1. Effets de la variété et de la période de semis sur la croissance du système racinaire

Le pois de printemps a de nombreux avantages environnementaux (Munier-Jolain et Carrouée, 2003) : il ne nécessite pas d'engrais azoté et réduit donc le coût énergétique nécessaire à sa production ; il contribue à la diversification des cultures et réduit donc le risque d'accroissement des bioagresseurs fréquents dans des rotations monotones (maladies telluriques des céréales, adventices fréquentes dans des rotations chargées en cultures d'hiver) ; il est moins gourmand en eau que d'autres cultures d'été telles le maïs et le soja. Cependant, le pois de printemps présente une profondeur d'enracinement moyenne de 70 cm (Jensen, 1985 ; Crozat et al., 1992 ; Voisin et al., 2002), plus faible que celle d'autres espèces comme le blé (plus d'1 m, Hamblin et Hamblin, 1985) et le maïs (1 m, Tardieu et Manichon, 1987). Cette faible profondeur d'enracinement peut, d'une part, contribuer à l'augmentation du risque des pertes d'azote minéral du sol en profondeur et, d'autre part, limiter

l'utilisation de l'eau du sol. Semé à l'automne, et donc avec une durée de cycle plus longue, le pois d'hiver pourrait être une solution intéressante pour limiter le risque évoqué précédemment tout en conservant les autres avantages environnementaux d'une culture de pois.

Le système racinaire est difficile à étudier au champ, principalement pour des raisons techniques (Polomski et Kuhn, 1998) et à cause d'une grande variabilité spatiale en fonction des conditions du milieu (Gerard et al., 1971 ; McMichael et Quisenberry, 1993). Peu de références sont donc disponibles, en particulier pour des semis d'automne.

Nous avons donc, à travers des expérimentations réalisées au champ, testé l'hypothèse suivante :

Hypothèse 1 :
Les variétés semées en automne présentent une dynamique d'enracinement différente, un système racinaire plus profond et plus dense que celles semées aux printemps

3.2. Effets du tassement sur la croissance du système racinaire

Nous avons déjà vu que le pois de printemps était souvent semé très tôt après l'hiver, et donc dans des conditions de sol très humides, induisant souvent un tassement. Or cette culture est sensible à ce facteur. Semé en début d'automne, dans des conditions hydriques moins favorables au tassement, les nouveaux pois d'hiver Hr devraient être affectés moins fréquemment par ce facteur limitant. Ces conditions d'état structural tassé sont probablement plus fréquentes pour les pois d'hiver classiques hr, semés à partir de mi novembre.

La résistance mécanique du sol à la croissance racinaire est un des facteurs les plus importants faisant varier l'élongation et la prolifération des racines dans un profil (Bengough et Mullins, 1990). Au champ, le système racinaire est moins dense en sol tassé que non tassé chez de nombreuses espèces (maïs, Tardieu et Manichon, 1987 ; pois de printemps, Crozat et al., 1991a et b). Tardieu et Manichon (1987) ont également mis en évidence une réduction de la vitesse d'enracinement par le tassement. L'action de facteurs biologiques, comme les cycles de gel-dégel en hiver, ou l'activité des vers de terre fonction de la saison (Dexter, 1991) pourraient avoir une influence sur la structure du sol et créer des différences d'état structural entre semis d'automne et de printemps.

McMichael et Quisenberry (1993) suggèrent que la croissance et le développement du système racinaire sont sous contrôle génétique mais peuvent être modifiés par des facteurs environnementaux (température, densité, humidité, composition du sol). Des différences de réponse du système racinaire à un état structural tassé entre variétés d'une même espèce ont été observées chez le maïs et le soja (Bushamuka et Zobel, 1998). Chez le pois, en conditions contrôlées, Tsegaye et Mullins (1994) ont mis en évidence que le tassement pouvait réduire la vitesse d'enracinement du pivot uniquement pour certaines variétés. Mais qu'en est-il au champ pour les types de pois printemps, hiver hr et Hr ?

Nous avons donc, par expérimentation au champ, testé l'hypothèse suivante :

Hypothèse 2 :
Les effets du tassement sur la dynamique d'évolution du système racinaire sont identiques en semis d'automne et de printemps quelle que soit la variété

3.3. Effets interactifs de la date de semis, de la variété et de la structure du sol sur la croissance aérienne et l'élaboration du rendement

Le nombre de graines au m² est la composante du rendement la plus déterminante du rendement et la plus instable (Hardwick, 1988 ; Doré, 1990 ; Dumoulin et al., 1994). La forte instabilité de cette composante est essentiellement liée à l'effet de stress hydriques et thermiques au moment de son élaboration entre début floraison et fin du stade limite d'avortement (Jeuffroy et al., 1990 ; Guilioni et al., 2003), auxquels la culture est très sensible. L'avancement du cycle reproducteur de la culture par un semis d'automne pourrait donc limiter l'occurrence de ces stress. De plus, dans différentes conditions climatiques, plusieurs auteurs (Ellis et Russell, 1984 pour l'orge ; Pilbeam et al., 1990 pour la féverole ; Acikgoz et al., 1989 pour la vesce ; Martin, 1992 pour le blé) ont mis en évidence qu'une culture semée à l'automne présentait en général un rendement supérieur à la même culture semée au printemps.

Ranalli et al. (1997) ont montré que, dans un milieu donné, uniquement pour certains génotypes, un semis d'automne permettait un gain de rendement important par rapport à un semis de printemps. Ceci peut s'expliquer en partie par le fait que les caractéristiques de la période d'élaboration du nombre de graines diffèrent entre variétés. D'une part, la position du début floraison, marquant le début de la période d'élaboration du nombre de graines, est très dépendante de la variété. D'autre part, la durée de cette période est très variable, étroitement liée au nombre d'étages reproducteurs, qui est une caractéristique variétale. Par conséquent, une variété ayant un nombre d'étages reproducteurs élevé pourra présenter une moindre sensibilité aux stress de fin de cycle, du fait de compensations possibles entre les différents étages (les avortements de graines sur les premiers étages étant compensés par des nombres de graines plus élevés sur les derniers, Jeuffroy, 1991). En revanche, une variété ayant un faible nombre d'étages reproducteurs aura moins de risque d'occurrence de stress pendant sa période reproductrice, celle-ci étant plus courte et se terminant plus précocement. Ces deux caractéristiques (précocité à floraison et nombre d'étages reproducteurs), aujourd'hui considérées comme deux critères de sélection majeurs pour les pois d'hiver, sont probablement déterminantes des gains de rendement et de stabilité pour les nouvelles variétés de pois d'hiver. Leur étude dans ce travail était donc indispensable afin d'aider les sélectionneurs à identifier les caractères d'intérêt agronomique à sélectionner.

Enfin, comme vu précédemment, le pois est une culture sensible au tassement. Les effets du tassement sur le rendement sont fonction des conditions climatiques rencontrées par la culture pendant son cycle (Crozat et al., 1991a), ce qui contribue également à expliquer son instabilité. L'avancement de la date de semis à une période plus favorable en terme d'humidité du sol par l'utilisation des nouvelles variétés de pois d'hiver Hr devrait limiter les risques de tassement et donc contribuer à une meilleure stabilité et à une augmentation du rendement. Compte tenu de l'interaction entre date de semis et état structural, il était important de prendre en compte ce facteur pour une analyse *a priori* des conséquences de ces nouvelles variétés de pois d'hiver sur le système sol-plante.

Nous avons donc testé, par expérimentation au champ, l'hypothèse suivante :

Hypothèse 3 :

L'avancement du cycle de la culture et les meilleures conditions de semis permis par un semis d'automne augmentent la stabilité mais aussi le potentiel du rendement.

3.4. Effets interactifs de la date de semis, de la variété et de la structure du sol sur les bilans d'azote et d'eau

L'azote est un élément clé pour une culture de pois. D'une part, sur le plan de la qualité, la teneur en protéines de ses graines en fait une matière première de qualité pour l'alimentation des porcs et des volailles, ainsi que pour les ruminants (Munier-Jolain et Carrouée, 2003). D'autre part, sur le plan environnemental, sa capacité à fixer l'azote atmosphérique est un atout. Cependant, le pois est souvent accusé de laisser une quantité d'azote minéral dans le sol à l'entrée de l'hiver, potentiellement lessivable, plus importante que beaucoup d'autres cultures (Munier-Jolain et Carrouée, 2003).

Horn et al. (1996) ont mis en évidence qu'un avancement de la date de semis d'environ un mois et demi permettait une augmentation de la quantité totale d'azote accumulé dans une culture de pois de 58 kgN ha⁻¹ en moyenne, sans effet significatif sur la part d'azote provenant de la fixation. L'allongement de la durée du cycle, par un semis d'automne, pourrait donc permettre une augmentation non négligeable de la teneur en protéines des graines. Par ailleurs, la quantité d'azote minéral dans le sol étant généralement supérieure en début d'hiver, par rapport à la sortie hiver, et cette dernière ayant une influence sur la fixation symbiotique (Voisin et al., 2002), la modification de la période de semis pourrait avoir des conséquences sur la part d'azote accumulé par la culture provenant de la fixation et de l'assimilation. La présence de nitrate dans le sol à l'automne favoriserait l'assimilation au détriment de la fixation, augmentant ainsi l'utilisation de l'azote du sol par la culture. Compte tenu des enjeux, tant en terme de production que d'environnement, il est important de vérifier ces différentes hypothèses.

En semis de printemps, un état structural tassé réduit la quantité de racines dans le profil et conduit à une concentration des nodules dans le lit de semence, non tassé (Croizat et al., 1992). Grath et Hakansson (1992) ont d'ailleurs mis en évidence un effet significatif négatif du tassement sur l'absorption et la fixation d'azote et au final sur la teneur en protéines des graines. Comme vu précédemment, des différences d'états structuraux entre dates de semis pourraient exister, contribuant ainsi à limiter les impacts du tassement sur la dynamique d'accumulation d'azote, et conduisant là également à une plus forte teneur en protéines en semis d'automne par rapport à un semis de printemps, même en conditions tassées.

La limitation de l'utilisation de l'eau, et plus spécifiquement de l'irrigation, est une préoccupation essentielle dans le cadre du développement de systèmes de production plus durables. L'allongement du cycle de la culture par un semis d'automne s'accompagnera probablement d'une augmentation de ses besoins totaux en eau. Toutefois, les besoins journaliers d'une culture sont fonction de son stade de développement et des conditions climatiques. Pour le pois, les besoins en eau sont les plus importants entre les stades début floraison et fin de seuil limite d'avortement (période d'élaboration du rendement). Pour un semis d'automne, cette période a lieu entre début mai et mi-juin, contre fin mai à fin juin pour un semis de printemps. Ainsi, les besoins en eau de la culture pour un semis d'automne seront *a priori* plus importants en début de printemps et plus faibles ensuite, quand les réserves du sol sont limitées, par rapport à un semis de printemps. Ainsi, le cycle de consommation d'eau devrait être mieux calé sur le cycle de disponibilité pour un semis d'automne que de printemps, comme le suggèrent Uzun et Açıkgöz (1998), ce qui permettrait de stabiliser les rendements sans avoir recours à l'irrigation.

Nous avons donc testé, par expérimentation au champ, l'hypothèse suivante :

Hypothèse 4 :

Par allongement du cycle de la culture, un semis d'automne permet une augmentation de la teneur en protéines des graines, une limitation des risques de pertes d'azote vers l'environnement pendant l'hiver et une modification de la cinétique de consommation d'eau, quelles que soient la variété et les conditions d'expérimentation, et ce de façon d'autant plus importante que le semis est précoce à l'automne

4. Modélisation du fonctionnement de la culture

Beaucoup de modèles simulant le fonctionnement de légumineuses sont décrits dans la littérature (le soja, Boote et al., 1998, Brisson et al., 2003 ; le haricot, Boote et al., 1998 ; la féverole, Boote et al., 2002 ; le pois chiche, Singh et Virmani, 1996 ; le sorgho et la luzerne, Brisson et al., 2003) mais seul le modèle AFILA (J. Lecoœur, com. pers ; Biarnès et al., 2004b) existait pour le pois au démarrage de ce travail. De plus, ce modèle a fait l'objet d'une collaboration importante entre l'INRA, l'ENSAM⁵ et l'UNIP⁶, dans le but de fournir un outil opérationnel à l'interprofession. Il était donc souhaitable, pour des raisons de continuité, de poursuivre le travail sur ce modèle. Tous les modèles cités précédemment sont paramétrés et validés pour un seul type de variété et une seule période de semis (pois de printemps pour AFILA). **Pour atteindre nos objectifs, décrits précédemment, il était donc essentiel de compléter AFILA afin de pouvoir l'utiliser aussi bien pour des variétés de printemps, semées au printemps, que pour des variétés d'hiver (hr et Hr) semées à l'automne.**

Une culture semée à l'automne a une croissance et un développement ralentis pendant l'hiver du fait des conditions climatiques. A l'inverse, une culture semée au printemps présente une croissance et un développement relativement importants dès le début du cycle du fait de conditions climatiques, en général, plus favorables au moment de l'implantation. Jeuffroy et Ney (1997) rapportent que l'efficacité d'utilisation du rayonnement lumineux est très dépendante de l'environnement. De plus, Uzun et Açıkgöz (1998) ont mis en évidence que les cultures semées au printemps produisaient moins de ramifications que celles semées à l'automne. Une différence en termes d'efficacité d'utilisation du rayonnement lumineux et/ou de capacité de la culture à intercepter du rayonnement lumineux pourrait donc exister entre périodes de semis. On peut alors se demander si cette différence de comportement nécessite un formalisme différent de l'accumulation de biomasse en fonction de la période de semis.

Dans un objectif d'utilisation du modèle pour la sélection, ce dernier doit être sensible aux paramètres d'intérêt pour les sélectionneurs, en particulier la date de début floraison et le nombre d'étages reproducteurs, comme nous l'avons déjà vu. Or, parmi les variétés disponibles aujourd'hui, il existe un lien étroit entre le nombre d'étages reproducteurs, la taille (poids moyen d'une graine) et le nombre de graines formées : les variétés à faible nombre d'étages ont généralement peu de graines, un fort poids moyen de graines, tandis que les variétés à fort nombre d'étages possèdent généralement beaucoup de petites graines. De ce fait, il est indispensable de tenir compte des corrélations qui existent entre paramètres, pour ne pas conclure à l'intérêt de seules variétés virtuelles qu'il ne serait jamais possible de créer en sélection. De plus, les variétés de pois d'hiver Hr présentent un port foliaire différent et un potentiel de ramification supérieur, en comparaison avec les variétés

⁵ Ecole Nationale Supérieure Agronomique de Montpellier

⁶ Union Nationale des Interprofessionnels des Protéagineux

commerciales, ce qui pourrait avoir des conséquences sur le coefficient d'extinction du rayonnement lumineux dans le couvert et donc sur la capacité de la culture à intercepter le rayonnement lumineux (Varlet-Granchet et al., 1989). Comme le rapportent Jeuffroy et Ney (1997), les résultats expérimentaux concernant l'effet de la variété sur l'efficacité d'utilisation du rayonnement lumineux sont contradictoires dans la bibliographie. Il est donc important de vérifier que le formalisme de modélisation choisi dans AFILA pour quantifier l'accumulation de biomasse et d'azote, mis au point essentiellement sur des variétés commerciales, est également représentatif des variétés en cours de sélection. Comme le suggère Barbottin (2004), l'intégration de l'effet de la variété sur le fonctionnement de la culture doit se faire le plus simplement possible, compte tenu du peu d'information dont on dispose sur les types hiver Hr. Ainsi, le travail d'adaptation du modèle que nous avons réalisé a visé à simuler correctement la variabilité génétique, en privilégiant au maximum des paramètres utilisés par les sélectionneurs et faciles d'accès.

Lors de la mise au point du modèle de fonctionnement de culture nécessaire pour tester les performances de différents types variétaux dans leurs conditions de culture, nous avons émis l'hypothèse suivante :

Hypothèse 5 :

Il est possible de trouver des formalismes qui permettent de rendre compte des similitudes et des spécificités dans le fonctionnement de différents types variétaux semés aussi bien à l'automne qu'au printemps, tout en utilisant un faible nombre de paramètres facilement mesurables au champ

Le tassement modifie les quantités d'eau et d'azote du sol disponibles pour la culture (Brussaard et Faasen, 1994 ; Horton et al., 1994), pouvant avoir des conséquences sur son accumulation de biomasse et d'azote et sur le rendement et le bilan azoté à la récolte. Aucun des modèles de culture connus (STICS, Brisson et al., 2003 ; CERES, Gabrielle et al., 1998 ; modèles de type GRO, Boote et al., 1998) ne prend en compte l'effet de l'état structural malgré ses conséquences directes sur la croissance et le développement du système racinaire (Bengough and Mullins, 1990 ; Crozat et al., 1992). Nous avons donc proposé un formalisme pour introduire les effets de ce facteur sur le fonctionnement de la culture, élément très important compte tenu de notre problématique. Les résultats acquis dans l'analyse des essais au champ (dont nous avons parlé précédemment) nous ont amenés à tester l'hypothèse suivante, lors de l'introduction de l'état structural dans le modèle de culture :

Hypothèse 6 :

Les effets du tassement sur la croissance aérienne et le bilan azoté peuvent être modélisés uniquement par des fonctions réduisant le développement du système racinaire

5. Evaluation de variétés virtuelles à l'aide de modèles agronomiques

Donald (1968) a défini un idéotype comme étant une variété « idéale » présentant une combinaison spécifique de caractéristiques favorables à la photosynthèse, à la croissance et à la production de graines.

Avant la mise sur le marché de variétés innovantes, il est important de s'assurer que les caractéristiques sélectionnées conduiront bien, comme le suppose le sélectionneur, à des performances agronomiques supérieures aux variétés disponibles (chez le pois, il s'agira en particulier de favoriser la stabilité et le niveau du rendement), tout en respectant la qualité et l'environnement. Pour des raisons économiques mais aussi pour répondre aux critères d'inscription, les sélectionneurs cherchent, de plus, à produire des variétés qui présentent ce comportement favorable dans un grand nombre de contextes pédo-climatiques, correspondant aux zones actuelles ou possibles de culture du pois. Cependant, l'itinéraire technique mis en œuvre par l'agriculteur peut avoir une influence sur l'expression du potentiel de la variété utilisée. De plus, les caractéristiques des variétés de pois étant responsables de la variabilité de leur réponse face à la variabilité climatique, il est possible que, pour chaque pédo-climat et itinéraire technique, l'idéotype permettant d'atteindre l'objectif visé soit différent. Nous avons donc cherché à identifier l'idéotype le mieux adapté aux conditions pédo-climatiques pour différentes conduites de culture dans des régions à climat contrasté, en testant l'hypothèse suivante :

Hypothèse 7 :

Dans chaque contexte pédo-climatique et itinéraire technique, il existe un idéotype spécifique, pour ces nouvelles variétés de pois d'hiver, qui est plus intéressant d'un point de vue agronomique et environnemental par rapport aux variétés classiques.

Comme nous l'avons déjà évoqué plus haut, il est important, pour qu'une variété soit acceptée, qu'elle réponde aux critères d'utilisation des agriculteurs. Dès son évaluation, la prise en compte des contraintes des agriculteurs est donc nécessaire. En effet, l'intérêt des nouvelles variétés doit être démontré dans leurs conditions d'usage.

Ainsi, par exemple, l'utilisation des nouvelles variétés de pois d'hiver, par un semis début octobre, pourrait accentuer la concurrence en main d'œuvre et en matériel, déjà importante à cette époque dans certaines exploitations agricoles à surfaces importantes semées en céréales et/ou récoltées en maïs, betteraves et pommes de terre. En effet, l'organisation du travail est une préoccupation très forte en agriculture, liée à l'existence de contraintes de temps très fortes du fait à la fois du caractère saisonnier de cette activité et des aléas climatiques (Sebillotte, 1986). De plus, comme le suggèrent Meynard et al. (2001), pour prévoir l'introduction d'une innovation dans un système de production, il est nécessaire de mettre en évidence les liens cohérents qui existent entre les actes techniques mis en œuvre au sein d'une exploitation agricole entre les différentes cultures et de définir les marges de manœuvre de l'agriculteur. Par ailleurs, l'intégration, dès la sélection, de considérations environnementales liées à l'innovation, comme la modification de la structure du sol, ou la quantité d'azote après récolte, ce que nous avons essayé de faire dans cette étude, est indispensable dans le souci de proposer des innovations qui répondent aux exigences de durabilité. La comparaison, avec des variétés existantes actuellement cultivées au sein des exploitations agricoles, de l'effet de l'introduction de variétés innovantes de pois d'hiver sur le système de production à différentes

échelles (organisationnelle, environnementale et productive) est fondamentale pour mettre en évidence de façon objective leurs atouts et leurs contraintes.

Pour réaliser cette évaluation, il est donc nécessaire de simuler le fonctionnement différencié des variétés de pois, mais également l'organisation du travail à l'automne, pour identifier les plages de semis disponibles et les conséquences sur la structure du sol, pour tenir compte des risques de dégradation de la structure du sol en lien avec les semis de pois et les effets sur leur production.

Dans cette partie du travail, quatre modèles ont donc été utilisés. OTELO (Papy et al., 1990) est un modèle d'organisation du travail à l'échelle d'une exploitation agricole, tenant en compte des caractéristiques en matériel et main d'œuvre et simulant les plages de temps disponibles pour réaliser les différents chantiers sur une période donnée. Un modèle simulant uniquement l'évolution de l'humidité du sol a, par ailleurs, été mis au point, sur le principe du bilan hydrique, afin de déterminer l'humidité du sol à la date de chaque opération technique étudiée, variable nécessaire pour quantifier les risques de tassement du sol. Ensuite, le modèle SISOL (Roger-Estrade et al., 2000), qui simule l'évolution de l'état structural du sol en fonction de l'humidité du sol pour chaque opération culturale, a été utilisé pour quantifier les risques de tassement. Enfin, le modèle de fonctionnement du pois, mis au point dans ce travail et prenant en compte les effets de l'état structural, de la période de semis et de la variété a été utilisé pour simuler le rendement, le risque de gel et le bilan azoté, selon le type de variété semé dans leurs conditions de culture.

A partir d'un exemple d'exploitation agricole, cette méthode a permis de comparer les performances des trois types de pois possibles (printemps, hiver hr et Hr), en fonction des contraintes d'organisation du travail et plus spécifiquement les conséquences sur les rendements de pois et de blé, les risques de gel et les risques de lessivage d'azote après pois.

Hypothèse 8 :

A l'échelle de l'exploitation agricole, le type de pois utilisé dans la rotation a un effet sur les contraintes d'organisation du travail, le système de culture et finalement sur les différents critères d'évaluation des variétés testées.

6. Organisation du mémoire

L'ensemble des hypothèses testées est résumé dans le Tableau Pro.1.

Tableau Pro.1. Bilan des connaissances et des hypothèses testées dans ce rapport (en gras) relatives aux trois notions clés du développement durable en fonction du type de pois.

	SOCIAL	PRODUCTIVITE	ENVIRONNEMENT
Facteurs pris en compte dans ce travail	<i>Organisation du travail</i> <i>Concurrence avec les autres chantiers et cultures</i>	<i>Rendement</i>	<i>Azote</i> <i>Structure du sol</i> <i>Irrigation</i>
Pois de printemps Semis de février à avril	Pas ou peu de concurrence avec les autres chantiers	Rendement instable	Risque de lessivage des nitrates en hiver, enracinement peu profond, sol souvent tassé au semis, nécessité d'irriguer pour stabiliser les rendements.
Pois d'hiver hr Semis en novembre	Pas de concurrence avec d'autres chantiers mais semis tardif donc peut être une gêne pour l'agriculteur pour ranger son matériel	Rendement plus stable que le pois de printemps mais fort risque de gel	Présence d'une culture en hiver mais faible accumulation d'azote, enracinement plus important que le pois de printemps donc moins de pertes d'azote sur l'ensemble du cycle, risque de quantité d'azote des pailles élevée pour la culture suivante, risque de tassement du sol au semis plus faible que pour le pois de printemps.
Pois d'hiver Hr Semis en octobre	Risque de surcharge de travail et de décalage des autres chantiers	Rendement stable et risque de gel faible	Présence d'une culture en hiver plus développée, enracinement profond, risque de quantité d'N des pailles encore plus élevée pour la culture suivante que hr, Risque de tassement faible

Le mémoire est divisé en trois parties correspondant aux trois grandes phases de l'étude.

La partie 1 est organisée autour d'une analyse des effets de l'état structural, de la période de semis et de la variété sur le fonctionnement racinaire, les performances agronomiques (croissance, rendement, qualité des graines) et environnementales (bilan d'azote) d'une culture de pois.

Cette étude a été réalisée sur la base d'expérimentations factorielles faisant varier état structural, date de semis et variété, mises en place sur deux sites et pendant deux campagnes (pour vérifier la stabilité des résultats observés), au champ.

L'enjeu de cette étude était également de recueillir des données pour mettre au point et évaluer un modèle dynamique d'expansion du système racinaire prenant en compte les effets de l'état structural, de la période de semis et de la variété afin de mettre au point un modèle de fonctionnement d'une culture de pois adapté à différentes périodes de semis et caractéristiques variétales. Dans l'objectif de limiter le nombre de paramètres et de variables d'entrée du modèle, nous avons cherché à mettre en évidence des relations simples entre la croissance des racines et des caractéristiques accessibles du milieu.

Dans la partie 2, nous présentons l'intégration de ces effets dans un modèle de culture, qui rend compte du fonctionnement de différents types variétaux dans leurs conditions de culture probables.

AFILA, modèle dynamique d'une culture de pois, mis au point pour des variétés de printemps semées au printemps, a été utilisé comme modèle de base. Le modèle AFILA a d'abord été complété pour prendre en compte des effets intégrés initialement (période de semis, état structural, caractéristiques variétales, disponibilité en N du sol, répartition entre fixation et assimilation en particulier). Puis il a été évalué pour tester sa capacité à rendre compte des principaux effets intégrés. Les résultats expérimentaux de la partie précédente, utilisés pour cette partie, ont alors été divisés en deux jeux de données : l'un pour mettre au point les formalismes nouveaux nécessaires et estimer les paramètres de ces relations et l'autre pour évaluer le modèle de façon indépendante.

La partie 3 illustre l'utilisation du modèle précédent pour évaluer *ex ante* de nouvelles variétés en intégrant deux types de contraintes :

- celles de nature pédo-climatiques : dans un premier temps, nous avons cherché à identifier les idéotypes intéressants selon les caractéristiques pédo-climatiques de la région de culture, sans tenir compte des contraintes liées à l'insertion de ces nouveaux types variétaux dans les exploitations agricoles (contraintes influençant les périodes de semis et l'état structural du sol),
- celles concernant l'organisation du travail dans l'exploitation agricole : dans un second temps, nous avons pris en compte les contraintes d'organisation du travail au sein de l'exploitation agricole. Ces contraintes ont permis de déterminer les plages de semis possibles, selon les scénarios climatiques rencontrés, et l'état structural du sol sous culture, déterminé par l'état hydrique du sol au moment du semis et des différentes opérations culturales réalisées. Les performances des différentes variétés candidates ont alors été évaluées dans ces conditions plus réalistes de leur usage futur, et comparées aux évaluations réalisées, dans des situations « potentielles expérimentateur ».

Nous tentons enfin, dans la discussion générale, de prendre du recul sur les enseignements de ce travail, tant au niveau des connaissances que des méthodes d'évaluation variétale, et sur leurs limites.

PARTIE I :

**Effets de l'état structural, la période
de semis et la variété sur le
fonctionnement aérien et racinaire
d'une culture de pois**

Informations complémentaires

Annexe 1. Plan des essais de Grignon (78) et Mons (80) en 2002-2003 et 2003-2004

Annexe 2. Caractéristiques physico-chimiques du sol

Annexe 3. Itinéraire technique et dates de mesures pour chaque essai

Annexe 4. Photo de profil cultural

Annexe 5. Photo de profil racinaire

1. Effect of sowing date and cultivar on root system development in pea (*Pisum sativum* L.)

Aurélie Vocanson*, Marie-Hélène Jeuffroy & Jean Roger-Estrade

Unité Mixte d'Agronomie Institut National de Recherche en Agronomie – Institut National Agronomique de Paris-Grignon, BP01, 78850 Thiverval-Grignon, France.

* Corresponding author. Tel: 33(0)130815906; fax: 33(0)130815425; e-mail: vocanson@grignon.inra.fr

Key words: *Pisum sativum* L., maximum root depth, root distribution, root system elongation rate, incident solar radiation, thermal time.

Abstract

In many species, root system development depends on cultivar and sowing date, with consequences for aerial growth, and seed yield. Most of the peas (*Pisum sativum* L.) grown in France are sown in spring or in mid-November. We analyzed the effect of two sowing periods (November and February) and three pea cultivars (a spring cultivar, a winter cultivar, a winter recombinant inbred line) on root development in field conditions. For all treatments, rooting depth at various dates seemed to be strongly correlated with cumulative radiation since sowing. Maximum root depth varied from 0.88 m to 1.06 m, with the roots penetrating to greater depths for February sowing than for November sowing in very cold winters. The earlier the crop was sown, the sooner maximum root depth was reached. No difference in root dynamics between cultivars was observed. In contrast, the winter recombinant inbred line presented the highest root density in the ploughed layer. These findings are discussed in terms of their possible implications for yield stability and environmental impact.

Abbreviations: BF – beginning of flowering; Dmax – final maximum root depth; RSER – root system elongation rate; %SWR – percentage of squares with at least one root impact.

INTRODUCTION

Most of the peas currently grown in France are spring cultivars (90% of the pea area in 2004, UNIP, 2005). Their yields vary considerably between years (UNIP, 2005) and between fields each year, mainly because the crop is highly sensitive to soil compaction (Doré, 1992) and to water and heat stresses during seed formation (Guilioni et al., 2003; Salter and Goode, 1967). This sensitivity can be explained by the generally shallow rooting observed in the field. Mean maximum root depth is close to 0.70 m for spring pea cultivars in the field (Crozat et al., 1988; Crozat et al., 1989; Voisin, 2002), whereas the roots of other crop species penetrate more deeply in the same soil conditions (Merrill et al., 2002).

As shown by Vincent and Gregory (1989b) for winter wheat, crops sown early have larger root systems than late-sown crops in field conditions because of differences in temperature and in irradiance. Jordan (1987) reported that climatic conditions have a major effect on root growth in maize: indeed, root branching reached a maximum at an air temperature of 20°C, and a lack of light affected the aerial dry matter to root dry matter ratio. More specifically, variations in root elongation rate due to changes in environmental factors, such as light intensity, temperature and carbon dioxide level, which affect the rate of photosynthesis of the shoots, have been reported (Webb, 1976). The effects of temperature and radiation, the two main factors determining root growth (Vincent and Gregory, 1989b), can be accounted for by changes in assimilate supply to the root system. This hypothesis is supported by results for grassland (Fitter et al., 1998) and sunflower (Aguirrezabal, 1993), showing that radiation has a greater effect than temperature. The numbers of roots per plant and root length in pea seedlings (Hansen and Nymann Eriksen, 1974; Veierskov, 1985) have also been reported to be dependent on irradiance. Climatic conditions, particularly temperature and radiation, vary considerably from month to month, with large differences observed between autumn and spring, for a given development stage of the crop. Thus, changes in crop management (particularly the sowing period) should make it possible to increase pea root depth and reduce the risk of water stress at the end of the cycle, as shown for soybean (Taylor, 1980), potentially increasing yield stability and seed protein content. The effects on root development of seasonal variations in temperature and radiation due to spring or autumn sowing have never been compared as most previous studies (Barraclough and Leigh, 1984; Vincent and Gregory, 1989a; Turman et al., 1995) have compared root growth and development in field conditions for different sowing dates in the same season only. The effect of highly contrasted sowing dates (autumn and spring) has yet to be investigated in field conditions.

Differences in root system characteristics between cultivars have been found in other species. For instance, Curtforth (1986) found variation among maize hybrids for early root system growth but not for root growth rate as a function of temperature. Cooper (1987) observed variation in root length and the density between barley landraces. Jensen (1985) also reported large variations in the root systems of more than 400 pea genotypes, ranging from landraces to cultivars currently grown in Denmark. For many species, the root system seems to be a characteristic of the genotype considered (O'Toole and Bland, 1987). In controlled conditions, Veierskov (1985) showed differences in seedling root development between pea cultivars due to differences in seed size: greater seed dry weights were associated with higher levels of top growth but delayed root elongation. However, as most experiments have been carried out in controlled conditions, it would be of value to confirm the results in field conditions.

Sowing date and cultivar would therefore be expected to effect pea root system development. We assumed that the area of soil explored by pea roots would be increased by (i) a sowing in the autumn, leading to a longer crop cycle and conditions of root establishment different from those observed in spring, (ii) the use of genotypic variability on the root density, root elongation rate and/or maximal depth of soil explored by roots. We analyzed the effect of sowing period (autumn and spring) and cultivar (spring, winter and winter recombinant inbred line) on the depth and distribution of the root system in field conditions, in pea crops subjected to various radiation, temperature and rainfall regimes.

Table I.1. Cultivars and dates of soil preparation and sowing, by experiment.

Sowing date	D1	D2
Cultivar	Baccara Dove Hr200	Baccara Dove
<i>Exp.1</i>		
Ploughing	15 Nov., 2002	15 Nov., 2002
Secondary tillage and sowing	15 Nov., 2002	27 Feb., 2003
Dates of root measurements	6 Feb., 2003	7 Apr., 2003
	6 Mar., 2003	24 Apr., 2003
	25 Mar., 2003	22 May, 2003
	7 Apr., 2003	26 June, 2003
	26 June, 2003	
<i>Exp.2</i>		
Ploughing	13 Nov., 2003	13 Nov., 2003
Secondary tillage and sowing	13 Nov., 2003	5 Feb., 2004
Dates of root measurements	5 Feb., 2004	30 Mar., 2004
	2 Mar., 2004	14 Apr., 2004
	30 Mar., 2004	27 Apr., 2004
	27 Apr., 2004	3 June, 2004
	26 June, 2004	26 June, 2004
<i>Exp.3</i>		
Ploughing	30 Oct., 2002	30 Oct., 2002
Secondary tillage and sowing	30 Oct., 2002	28 Feb., 2003
Dates of root measurements	26 Feb., 2003	15 Apr., 2003
	19 Mar., 2003	21 May, 2003
	15 Apr., 2003	12 June, 2003
	12 June, 2003	8 July, 2003

MATERIALS AND METHODS

Sites and treatments

Field trials were conducted on a silt loam at Grignon (France, 48°8'N, 1°9'E, Orthic Vertisol; 21% clay, 70% silt, 9% sand) in 2002 (experiment 1) and 2003 (experiment 2) and at Estrées-Mons (France, 49°56'N, 2°56'E, Haplic Vertisol; 21% clay, 74% silt, 5% sand) in 2002 (experiment 3). Soil depths, defined as the depth of soil above the source rock, were 1.2 m in exp.1 and 2 and exceeded 10 m in exp.3 (Boizard, com. pers.). Three genotypes were compared: a commercial spring cultivar (Baccara, mean dry weight per seed: 0.25 g seed⁻¹), a commercial winter cultivar (Dove, mean dry weight per seed: 0.18 g seed⁻¹) and a winter recombinant inbred line that is more resistant to frost and highly sensitive to photoperiod (Etévé et al., 2004) (Hr200, mean dry weight per seed: 0.15 g seed⁻¹). For each experiment, we compared two sowing periods: November (D1) and February (D2), using the same sowing density (90 seeds m⁻²) and the same row spacing (0.17 m). Each plot was 1.75 m wide by 30 m long in Grignon and 1.25 m wide by 24 m long in Mons. Details of soil preparation conditions, sowing dates and cultivars for each experiment are given in Table I.1. Due to time constraints, we studied the three cultivars for D1 and only Baccara and Dove for D2.

Weather conditions

Daily minimum and maximum air temperatures (degrees Celsius), mean daily incident solar radiation (MJ m⁻² day⁻¹) and daily rainfall (mm) were measured by permanent automatic weather stations located about 200 m from each experimental site.

Plant development stage

For all treatments, the date at which flowering began was determined. Once the first flowers opened in the crop, the number of plants with at least one open flower was determined every two days. The beginning of flowering was defined as the date on which 50% of the plants presented at least one opened flower. This stage is particularly important in root studies in peas as it has been reported that root growth stops at this stage (Salter and Drew, 1965).

Root measurement

There are many techniques for studying root development *in situ*, which can be classified into three groups (Polomski and Kuhn, 1998): excavation methods, direct monitoring *in situ* and experimental approaches using various root containers. We investigated interactions between root systems and their environmental conditions in the field, using the trench wall technique, as previously described by Tardieu and Manichon (1986). The advantages of this method are its simplicity and the low cost of the equipment involved. We felt that the trench wall technique was the most appropriate here, given the aims of the study and the experimental conditions.

Once per month between February and June (Table I.1), the root system was mapped, using the trench wall technique, as described by Tardieu and Manichon (1986). As root mapping is very destructive and time-consuming, it was impossible to have spatial replicates for each treatment at each observation date. Thus, a cross-experiment ANOVA was required, in which experiments were considered as replicates. For each treatment, a soil pit (1 m wide, 1.2 m deep) was dug perpendicular to the rows. A square grid (square mesh of 0.02 m) was fixed on the observation face and the absence (quoted 0) or presence (quoted 1) of roots was noted (the number of roots visible in each square was not taken into account). This generated a root profile (Bruckler et al., 2004). For each new observation, we advanced 0.5 m beyond the previous observation face. In this manner, the trench gradually

progressed across the field. We produced a total of 115 root maps. Each root map was then divided in three equal parts, each one corresponding to two different pea rows, considered as replicates. The first fifteen columns of the grid corresponded to the first replicate. The next two columns were excluded. The following 15 columns became the second replicate. The next two columns were excluded and the last 15 columns became the third replicate.

The plot was homogeneous but roots are very sensitive to little variation of soil. The aim of the three replicates was to catch this possible root variability.

Time series analyses (Venables and Ripley, 2002) demonstrated the absence of autocorrelation in these three series in most root maps (80%).

In each of the three replicates, the cumulative number of squares with at least one root impact per 0.1 m layer of soil was determined. After conversion in percentage (“% of squares with roots”, %SWR), this number was used to represent root distribution in successive 0.1 m layers and was thus considered an indicator of rooting density.

For each root map, maximum root depth at the date of observation was defined as the depth at which less than 10% of the root map squares contained at least one root impact. Final maximum root depth (Dmax) was defined as the value obtained for the last date of measurement, close to crop maturity.

For each experiment, we calculated root system elongation rate (RSER) by linear regression from maximum root depth and time. For the calculation of RSER, only data for soil below the ploughed layer (0.25 m) and more than 0.1 m above Dmax were taken into account. The date at which root elongation ended was calculated as the date on which Dmax was reached, assuming a linear increase in root depth. Two variables were studied to explain changes in root elongation over time: cumulative degree-days from sowing (base temperature of 0°C) and cumulative radiation from sowing, as suggested by Aguirrezabal (1993), who showed that absorbed photosynthetically active radiation was strongly correlated with root dynamics in maize. As we did not measure intercepted radiation throughout the cycle, we used incident solar radiation for the calculation.

Statistical analysis

We compared RSER, Dmax and %SWR in each soil layer between treatments by analysis of variance with the SAS type III GLM procedure (SAS Institute, 1987). For each analysis of variance, we checked the underlying hypothesis concerning the residuals (independence, normal distribution, same range of values for within-class and between class variance). No interaction was taken into account. For analysing the effect of sowing date, the two sites were used as replicates. The factors (experiments, replications, cultivars and sowing dates) were regarded as fixed effects.

Mean values were then compared using the least significant difference (LSD) test with a probability of 0.05 (SAS Institute, 1987).

RESULTS

Weather conditions

From 1 October to 31 December, the mean temperature in exp.1 was 2°C lower than that in exp.2 and 3 (Table I.2). Between 1 January and 30 June, mean daily temperatures were similar in the three experiments. From 1 April to 30 June, mean daily temperatures were higher in all the experiments than the mean value calculated between 1974 and 2004. In contrast, for D1, mean temperature was below 0°C for only 4 days in exp.2, versus 16 days in exp.1 and 21 days in exp.3. For D2, no days (exp.1 and 3) or one day (exp.2) with a mean temperature below 0°C was observed. Mean daily incident solar radiation did not differ between experiments before 31 December (range of variation: 4.2 to 4.7 MJ m⁻² day⁻¹). However, during the second period, radiation levels were higher in exp.2 than in exp.1 and 3 (13.1 MJ m⁻² day⁻¹, versus 7.5 and 7.8 MJ m⁻² day⁻¹ in respectively exp.1 and 3). For the last period, there was little difference between experiments. Cumulative rainfall between 1 October and 31 December was higher in exp.1 (213 mm) and 3 (285 mm) than in exp.2 (150 mm) and the mean value calculated between 1974 and 2004 respectively in each site. During the last period of the cycle (from 1 April to 30 June), exp.2 was drier than the others. In the three experiments, during this same period, cumulative rainfalls were lower than the mean value calculated between 1974 and 2004.

Table I.2. Mean daily temperature (° C), daily incident solar radiation (MJ m⁻²), number of days with mean daily temperature below 0°C and cumulative rainfall (mm) during several periods of the crop cycle for the three experiments. Mean values between 1976 and 2004 and standard error (in brackets) were given in Grignon and Mons, respectively.

	Grignon			Mons	
	Exp.1	Exp.2	Mean values between 1974 and 2004	Exp.3	Mean values between 1974 and 2004
<i>Mean daily temperature (°C)</i>					
From 1 October to 31 December	9.3	7.6	7.3 (0.8)	6.9	6.9 (0.8)
From 1 January 1 to 31 March	5.4	5.7	4.9 (1.6)	4.8	4.3 (1.5)
From 1 April 1 to 30 June	15.1	15.4	12.7 (1.0)	14.2	12.2 (0.8)
<i>Mean daily incident radiation (MJ m⁻²)</i>					
From 1 October to 31 December	4.2	4.6	4.8 (0.5)	4.7	4.3 (0.4)
From 1 January 1 to 31 March	7.5	13.1	6.2 (0.8)	7.8	5.7 (0.5)
From 1 April 1 to 30 June	18.9	17.2	17.5 (1.7)	19.9	16.5 (1.2)
<i>Number of days with mean temperature below 0°C from sowing to the end of the cycle</i>					
D2	16	4	17 (9)	21	20 (10)
D3	0	1	1 (1)	0	1 (1)
<i>Cumulative rainfall (mm)</i>					
From 1 October to 31 December	213	150	159 (52)	285	196 (64)
From 1 January 1 to 31 March	79	103	144 (64)	102	161 (55)
From 1 April 1 to 30 June	111	78	151 (45)	136	173 (45)

Plant development

In all experiments, Baccara and Dove flowered two to four weeks earlier for D1 than for D2 (Table I.3). For a given sowing period, Baccara consistently flowered earlier (4 to 20 days earlier) than Dove, with the exception of D2 in exp.2, for which BF was similar for Baccara and Dove. In contrast, for D1, Hr200 reached BF between 17 May and 30 May according to the experiment, and consistently began flowering later than the other two cultivars.

Baccara sown at D2 flowered two weeks later than Dove sown at D1, the optimal sowing period for each cultivar.

General pattern of root elongation dynamics

With time expressed in cumulative degree-days from sowing, the root dynamic was found to follow a general three-phase pattern (Figure I.1), as represented for Dove in exp.1: (1) a lag phase corresponding to root initiation, (2) a phase of rapid linear root elongation, (3) a post-elongation phase in which no further root elongation was observed.

The pattern of change in root depth over time was found to differ considerably between sowing dates (Figure I.1): roots began to appear most rapidly after sowing for D2, followed by D1, for which the time between sowing and the beginning of root elongation was the longest. The lag phase between sowing and the beginning of rapid linear root elongation was shorter if time was expressed in cumulative radiation from sowing rather than cumulative degree-days (Figure I.1): using a linear model, the difference between the two sowing dates of the ordinate of the origin was of 490 degree-days and 180 MJ m⁻², in mean of the three experiments. The use of cumulative radiation from emergence rather than cumulative radiation from sowing did not improve the fit (data not shown).

Root system elongation rate during the linear phase

The range of variation of RSER was between 4 x 10⁻⁴ m MJ⁻¹ m⁻² and 16 x 10⁻⁴ m MJ⁻¹ m⁻², corresponding to 0.0007 m degree-days⁻¹ and 0.0016 m degree-days⁻¹ (Table I.3).

The analysis of variance model tested, without interaction between factors, was significant (P<0.10), but accounted for only 28% of the variability of RSER between treatments (data not shown). Taking into account the interaction between experiment and sowing date increased the proportion of RSER variability accounted for by the model to 72%.

RSER varied significantly between experiments (P<0.05, Table I.3). Mean RSER was higher in exp.2 (9.4 x 10⁻⁴ m MJ⁻¹ m⁻²) than in exp.1 (7.8 x 10⁻⁴ m MJ⁻¹ m⁻²) and exp.3 (7.2 x 10⁻⁴ m MJ⁻¹ m⁻²). RSER differed significantly between sowing dates (P<0.05). Sowing date had no systematic effect on RSER, confirming the existence of an interaction between experiments and sowing date for all cultivars tested. In two of the five situations for which crops were sown at both D1 and D2 (Baccara and Dove, both in exp.2), RSER was significantly lower for D1 than for D2. In contrast, in two of these five situations (Dove in exp.1 and 3), RSER was significantly higher for D1 than for D2, possibly due to observations being made too late for D2. In the last situation (Baccara in exp.1), RSER was similar for both sowing dates (9 x 10⁻⁴ m MJ⁻¹ m⁻²). Cultivar had no significant effect on RSER (P>0.05).

Figure I.1. Root depth dynamics according to sowing date: D1 (November, ■) and D2 (February, ▲) for the winter pea cultivar Dove expressed in cumulative degree-days from sowing on the left and in cumulative radiation from sowing on the right. Vertical bars represent the standard deviation.

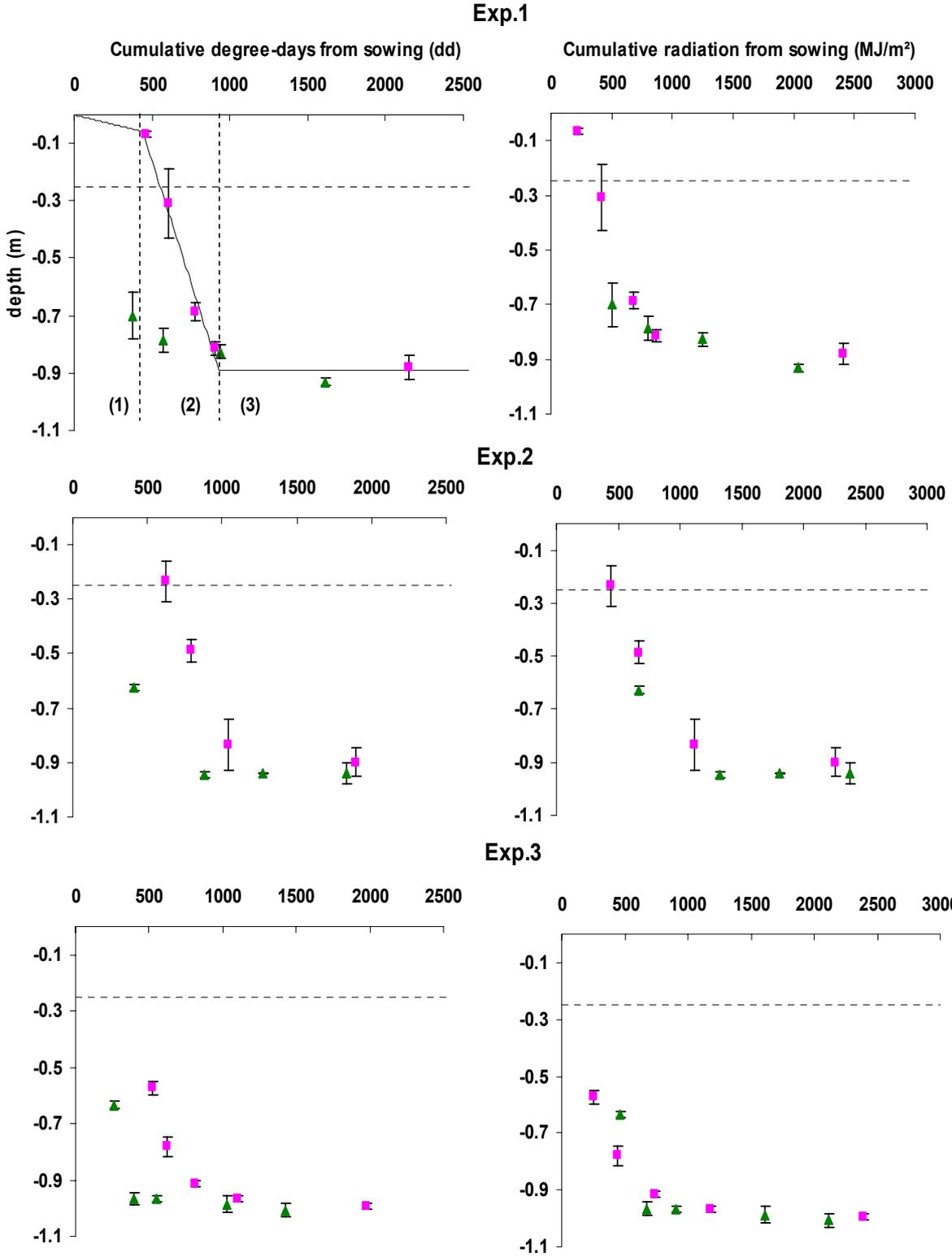


Table I.3. Date of beginning of flowering (BF), root rate elongation (RSER: * in 10^{-4} m MJ⁻¹ m⁻² and ** in 10^{-4} m degree-day⁻¹) during the linear phase, final maximum root depth at maturity (Dmax, m) and date at which this final depth was reached, according to sowing date and cultivar, X: treatment lost, -: treatment not studied. For a given variable, the values followed by a same letter are not significantly different at the 5% level.

<i>Cultivar</i>	Exp.1		Exp.2		Exp.3	
	D1	D2	D1	D2	D1	D2
<i>Baccara</i>						
BF	25 Apr.	17 May	20 Apr.	26 May	X	26 May
RSER*	9 bcd	9 bcd	6 ab	11 cde	X	4 a
RSER**	14 def	14 def	10 b	11 bc	X	7 a
Dmax	0.92 de	0.99 bc	1.02 b	1.06 a	X	0.98 c
Date Dmax reached	6 May	19 May	14 Apr.	24 Apr.	X	27 May
<i>Dove</i>						
BF	5 May	22 May	10 May	26 May	7 May	30 May
RSER*	10 cd	4 a	7 b	16 f	8 bc	5 ab
RSER**	15 ef	7 a	11 bc	16 f	11 bc	13 cde
Dmax	0.88 f	0.93 de	0.99 bc	1.00 bc	0.90 ef	0.94 d
Date Dmax reached	3 May	4 June	3 Apr.	16 Apr.	21 Apr.	18 May
<i>Hr200</i>						
BF	17 May	-	29 May	-	30 May	-
RSER*	7 b	-	7 b	-	12 de	-
RSER**	10 b	-	11 bc	-	11 bc	-
Dmax	0.96 cd	-	1.02 b	-	0.93 de	-
Date Dmax reached	29 May	-	6 Apr.	-	15 Apr.	-

Final maximum root depth

Dmax ranged from 0.88 m (Dove D1 exp.1) to 1.06 m (Baccara D2 exp.2) (Table I.3).

The analysis of variance model including an interaction between experiment and cultivar was significant ($P < 0.001$) and accounted for up to 80% of the variability in Dmax.

Dmax differed significantly between experiments ($P < 0.001$). Dmax was lower in exp.1 (mean value of 0.94 m) than in exp.2 (mean value of 1.02 m) despite identical soil depth in the two experiments (1.2 m). Although soil depth exceeded 10 m in exp.3, the mean Dmax was only 0.94 m (Table I.3). Sowing in the autumn did not significantly increase the depth explored by the roots over that observed for spring sowing ($P > 0.05$). Cultivar had a significant effect on the final maximum root depth ($P < 0.05$): Dove generally had a shallower root system than Baccara and Hr200, with a Dmax about 0.04 m lower than that for the other two cultivars (Table I.3). Dmax therefore depended mostly on experimental conditions (site and year in this study) and cultivar.

End of root elongation

In 5 of the 14 situations, the end of root elongation occurred 32 to 53 days before the beginning of flowering (BF) in Hr200 D1 in exp.3 and all treatments of exp.2 with the exception of Baccara for D2 (Table I.3). In three treatments (Baccara D1 in exp.2; Dove D1 in exp.3; Dove D2 in exp.3), Dmax was reached between 16 and 6 days before BF. Root elongation ended very close to BF in three situations (Dove D1 in exp.1; Baccara D2 in exp.1; Baccara D2 in exp.3). Roots ceased to elongate downwards more than 10 days after BF in three situations (Baccara D1 in exp.1; Hr200 D1 in exp.1; Dove D2 in exp.1).

Figure I.2. Percentage of squares with at least one root impact (%SWR) at maturity, according to the sowing date: D1 (November, ■) and D2 (February, ▲) for the winter pea cultivar Dove (figures a, b, c) and the spring pea cultivar Baccara (figures d, e, f). Horizontal bars represent the $LSD_{0.05}$.

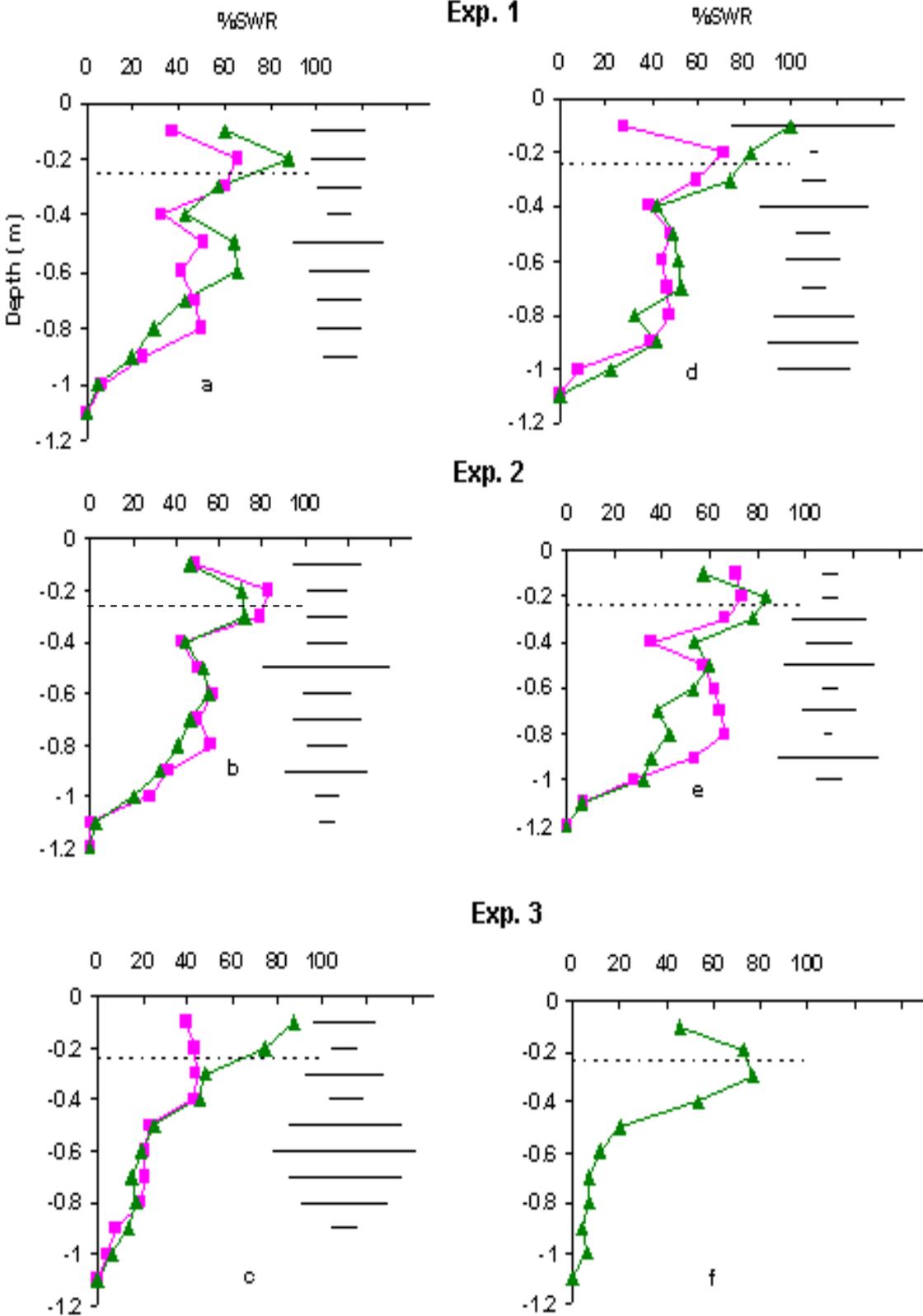
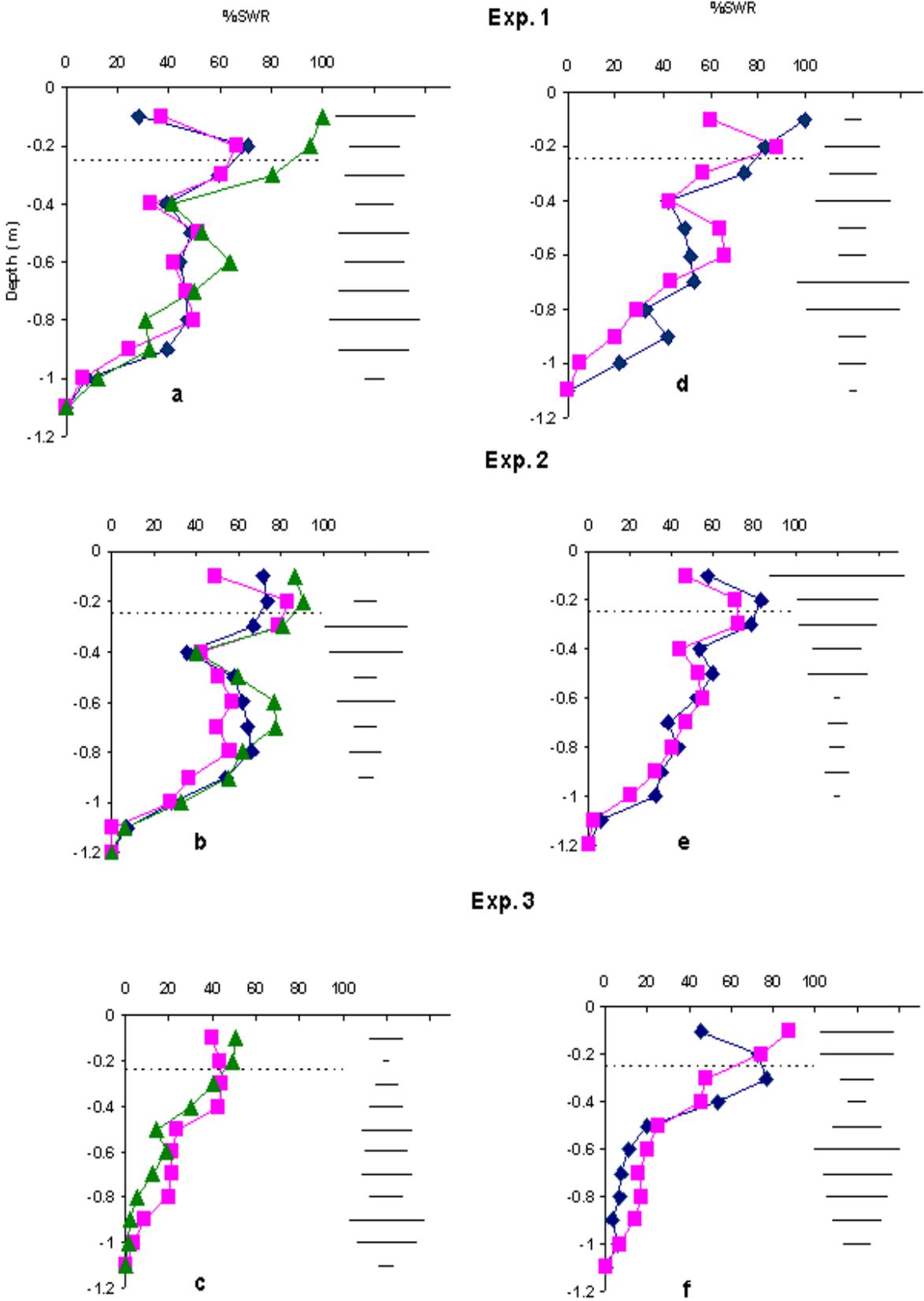


Figure I.3. Percentage of number of squares with at least one root impact (%SWR) at maturity, according to the cultivar: Baccara (◆); Dove (■); Hr200 (▲) for the November sowing D1 (figures a, b, c) and the February sowing: D2 (figures d, e, f). Horizontal bars represent the LSD_{0.05}.



Root distribution

The analysis of variance model tested was significant ($P < 0.05$, Table I.4) and accounted for 71% of the variability of root distribution.

We observed significant differences in the %SWR according to soil depth ($P < 0.05$, Table I.4). According to treatment, in the soil layers from 0.1 to 0.2 m and from 0.2 to 0.3 m, between 52 and 90 %SWR were detected (Figures I.2 and I.3), except for D1 in exp.3. In all situations, the %SWR suddenly decreased to about 30 to 40 % at a depth of 0.4 m. Deeper in the soil, two situations were observed. In some cases, root density decreased with increasing depth (Figure I.2 c and f). In others, root density remained constant from -0.4 m downwards, decreasing sharply only after 0.8 m or 1.0 m (Figure I.3 a, b, d and e).

In exp.3, for D1 (Figure I.2 c and 3 c), root density throughout the profile was lower than that for the other treatments (around 40%), confirming the significant effect of the experimental conditions on this variable ($P < 0.05$, Table I.4).

Root density in the two layers between 0.1 and 0.3 m was similar for both sowing dates ($P > 0.05$, Table I.4, Figure I.2), whatever the cultivar considered.

Root distribution depended on cultivar ($P < 0.05$). For D1 (Figure I.3 a, b and c), Hr200 had the highest %SWR in the ploughed layer, particularly in exp.1. For D2, differences between cultivars were less clear: %SWR was slightly larger for Baccara than for Dove, particularly in the two layers between 0.1 and 0.3 m (Figure I.3 e and f).

Table I.4. Model explaining differences in root distribution by significant effects of experiment, sowing date, cultivar and depth.

(A) Analysis of variance							
Source	Degrees of freedom	Sum of squares	Pr>F	Model quality			
Model	6	73×10^3	<0.001	$R^2=0.71$			
Residual	147	29×10^3		RMSE=14.1			
Total	153	102×10^3					

(B) Estimates of the effects of the factors							
Variable	Degrees of freedom	P value					
Experiment	2	<0.001					
Sowing date	1	0.21					
Cultivar	2	<0.05					
Depth	10	<0.001					

DISCUSSION

Root elongation pattern

In all experiments, root dynamics followed a general pattern in at least two phases when time was expressed in cumulative degree-days from sowing, whatever the treatment, as observed for winter wheat (Vincent and Gregory, 1989a) and maize (Tardieu and Manichon, 1986). This observation is consistent with those of Gladish (1993) who showed, for “Alaska” garden pea, the existence of a “growth cycle” comprising an acceleration phase, followed by a deceleration phase, terminating in growth arrest. Thorup-Kristensen (1998) found similar phases for various genotypes of green pea. They suggested that the first phase corresponded to an initial lag phase comprising seed germination and early crop establishment. The length of this phase was found to depend on seed size: the cultivars with the biggest seeds had the shortest lag phases. As Hr200 had smaller seeds than the other cultivars, we expected root initiation to take longer for this cultivar. However, the measurements were not precise enough for firm conclusions to be drawn on this point. Nevertheless, the lag phase seemed to be longer for autumn sowing than for spring sowing. As Tricot (1993) showed that root elongation is effected by temperatures, root development was probably slowed following autumn sowing in 2002, as the winter of this year was particularly cold. Eavis (1972) showed that root elongation is also affected by oxygen stress. The very high soil moisture content (data not shown) in the winter 2002 may also have led to water logging, resulting in low oxygen diffusion, with deleterious effects on root development.

Influence of radiation on root elongation

Cumulative radiation is the variable that best predicted pea root dynamics, whatever the growth conditions. We used a base temperature of 0°C for the calculation of cumulative degree-days for aerial growth. It remains unclear whether this temperature has any physiological significance for root growth (Barraclough and Leigh, 1984). Tricot (1993) showed that root elongation stopped if soil temperature fell below 2.5°C. However, the use of this base temperature did not improve the fit for our data (data not shown). Fleury (1987) suggested that the photothermal quotient – the ratio between radiation and mean aerial temperature – could be used, but the results obtained for our data (data not shown) were similar to those obtained with cumulative degree-days from sowing. The use of cumulative radiation from sowing rather than cumulative degree-days from sowing decreased difference between sowing dates, particularly at the start of linear root elongation. Other studies (Aguirrezabal, 1993; Vincent and Gregory, 1989a) have also reported a close correlation between root growth and the photosynthetic active radiation absorbed by the crop (PARa). The use of PARa rather than cumulative radiation should improve the fit for the various sowing dates. The relationship between root elongation and cumulative radiation has a physiological basis, as root elongation is partly dependent on the supply of assimilates from the crop (Aguirrezabal, 1993; Jordan, 1987; Vincent and Gregory, 1989a). Incident solar radiation provides a useful basis for the study or modelling of root development over a wide range of growth conditions. These findings are consistent with those of Veierskov (1985), who reported a positive correlation between lateral root number and irradiance in pea seedlings.

Root system elongation rate

No general effect of sowing date on root system elongation rate (RSER) was observed. In contrast, for wheat, RSER was found to be of 5-6 mm day⁻¹ for the winter period and 18 mm day⁻¹ for the spring (Barraclough and Leigh, 1984). Even if the first observation was made no more than 12 days after emergence for the spring sowing, the root depth was already in the region of 0.7 m. RSER should thus be underestimated and in the contrary, it should have been higher for a spring than an autumn sowing. For winter wheat, Vincent and Gregory (1989) showed that there was a curvilinear relationship between root length and the amount of photosynthetically active radiation (PAR) intercepted, which depends on mean incident radiation. At sowing, the higher mean daily incident radiation for a spring than an autumn sowing should contribute to a faster shoot and thus root production. Our results also confirmed the lack of difference in RSER between cultivars, as reported by Thorup-Kristensen (1998).

RSER varied between sites, despite the similar soil composition in our three experiments. RSER has been shown to be very sensitive to soil constraints, such as bulk density: the higher the bulk density, the lower the root elongation rate (Tsegaye et al., 1995). RSER variation may therefore reflect small differences in bulk density between treatments. However, RSER was estimated from only two or three measurements, which may in itself contribute to the high variability of RSER values. Most values were between $7 \times 10^{-4} \text{ m MJ}^{-1} \text{ m}^{-2}$ and $11 \times 10^{-4} \text{ m MJ}^{-1} \text{ m}^{-2}$. RSER values of $4 \times 10^{-4} \text{ m MJ}^{-1} \text{ m}^{-2}$ day⁻¹ to $16 \times 10^{-4} \text{ m MJ}^{-1} \text{ m}^{-2}$ were recorded, corresponding to 0.005 m day⁻¹ and 0.026 m day⁻¹. This result is consistent with the findings of Tsegaye et al. (1995), who estimated a root elongation rate of the main root axis of between 0.015 and 0.021 m day⁻¹ and those of Tricot et al. (1997), who reported a root elongation rate of 0.022 m day⁻¹. Pea RSER was within the range of variation observed for winter wheat, for which an RSER of 0.012 m day⁻¹ has been observed (Barraclough and Leigh, 1984) and soybean, for which RSER has been reported to vary from 0.004 to 0.013 m day⁻¹ (Turman et al., 1995).

Final maximum root depth

For the spring pea cultivar Solara sown in field conditions in spring, Voisin et al. (2002) reported a maximum root depth at maturity of 0.80 m whereas Crozat et al. (1991) reported a value of 0.60 m. In our study, the spring cultivar Baccara sown in spring had a maximum final root depth between 0.98 m and 1.06 m, consistent with the results of Merrill et al. (2002). These differences may result from differences in soil characteristics and climatic conditions. They may also be accounted for by a cultivar effect. Indeed, we found that cultivar had a significant effect on maximum root depth: Dove (seed dry weight of 0.18 g.seed⁻¹) gave lower values for final maximum root depth than Baccara (seed dry weight of 0.25 g.seed⁻¹) and Hr200 (seed dry weight of 0.15 g.seed⁻¹). This result conflicts with that of Veierskov (1985), who found that seed weight was inversely correlated with maximum root depth. However, in our study, final maximum root depth differed only by 0.04 m between cultivars.

Generally the evidence from other crop species is that spring-sown crops are shallower rooting than winter-sown crops associated with a shorter developmental period, e.g. in winter wheat (Barraclough and Leigh, 1984). In contrast, our observations showed that the longer crop cycle due to autumn sowing did not significantly increase final maximum root depth. Severe climatic conditions during winter for fall sowing in experiments 1 and 3 may should have damaged root system and then limited its development in terms of depth reached (McMichael and Quisenberry, 1993). In a soil more than 10 m depth (exp.3), for the spring sowing and the spring cultivar Baccara, the final maximum root depth was 0.98 m. More generally, whatever the site, the cultivar and the sowing date, final maximum root depth was limited to about 1.1 m. In contrast, in a non-limiting soil, the final root depth of a winter wheat may exceed 2.0 m (Barraclough and Leigh, 1984). This confirms that maximum root

depth is species-specific (Hamblin and Hamblin, 1985). Pea also has one of the shortest root systems among crop plants (Merrill et al., 2002).

End of root elongation

Maximum root depth has been reported to occur between BF (Kaspar and Bland, 1992; Voisin et al., 2002) and ten days after the onset of flowering (Thorup-Kristensen, 1998). In our experiments, maximum root depth was reached between more than one month before BF and 12 days after BF. Roots should continue to grow after beginning of flowering despite a decrease in carbon allocation to the roots following the appearance of reproductive organs (Voisin et al., 2002). These differences in results may also reflect differences in the methods used. The date at which root elongation ends is more variable than BF. It depends more on environmental conditions than the effects of sowing date or cultivar. Continuing increases in root density have also been reported to occur during the reproductive stages (Andersen and Aremu, 1991; Jakobsen and Nielsen, 1983).

Maximum root depth was reached in April for November sowing and in May for February sowing. So the earlier the sowing date, the sooner the final maximum root depth was reached. If water stress occurs, crops sown in the autumn should be better adapted to using the water in deep soil layers during this stress, possibly leading to more stable pea yields. Crop cover during winter should limit nitrate leaching, the shallowness of the root system of pea crops at the end of January (0.6 m) is certainly not sufficient to prevent nitrate leaching during winter, as observed for wheat crops with root systems of a similar depth at the end of winter (Barraclough and Leigh, 1984).

Root distribution

The percentage of squares with at least one root impact per 0.1 m layer of soil (“% of squares with roots”, %SWR) was used as an indicator of rooting density. The number of root impact should vary a lot for one square to one another. The values estimated with this technique give indication of the percentage of soil explored by roots and should underestimate rooting density.

In all situations, rooting density was highest in the ploughed layer. This is consistent with the results of Voisin et al. (2002). The sudden decrease in %SWR at a depth of 0.4 m may be due to plough pan formation, resulting in a more compact layer at this depth. In some situations, root density remained constant from 0.4 m to 0.8 m and then decreased. These differences should affect water and nitrogen uptake capacity, which is correlated to root length density (King et al., 2003). Main effects of sowing date and cultivar were observed in the ploughed layer.

In exp.1 and 3, root density in the ploughed layer was higher in crops sown in February than in crops sown in November. In contrast, in exp.2, only the spring cultivar Baccara presented a shallower root system in D1 than in D2. Crops sown in November were probably damaged during the winter, which was more severe in 2002 (exp.1 and 3) than in 2003 (exp.2). Cultivars differ in sensitivity to low temperature (Lejeune-Hénaut et al., 2004): the winter in 2003 (exp.2) was not severe enough to damage the winter pea cultivar Dove, but was severe enough to damage the roots of the spring cultivar Baccara in the ploughed layer. Low temperature probably affects root development by an indirect effect on aerial development, as Bourion et al. (2003) showed that the allocation of photoassimilates to below-ground organs is affected by the amount of photosynthetic assimilates received, which has a direct effect on root production. Frost also directly damages root tissues.

However, the winter recombinant inbred line, Hr200, had a higher %SWR score than the two other cultivars for the upper layer. There is probably genetic variability in root distribution between pea cultivars, as reported for soybean (Bourion et al., 2003). Cultivar and sowing date would also be expected to affect other parameters of the root system, such as root length, root diameter, number of

first-order lateral branches, spacing of lateral branches along the parent root, and time before initiation of a lateral root (Tsegaye and Mullins, 1994). Our %SWR counts provide no information on the effects of these parameters.

Finally, an autumn sowing does not increase maximum root depth or the area of soil explored by roots. However, an autumn sowing provides an opportunity to limit the effects of water and nitrogen stress on yield as maximum root depth is reached earlier than for a spring sowing. There is genetic variability in maximum root depth and root density among pea cultivars. Further researches are required to confirm the effects of contrasted sowing dates and cultivars on other soil types.

Acknowledgments

We would like to thank J. Troizier and his team for their assistance with the trials in the experimental Unit at Grignon, and J.J. Stempniak for the trial in Mons. We would also like to thank G. Grandeau, V. Tanneau, B. Le Fouillen, A. Chauveau, and M. Bazot for their help in the measurements, and particularly for the root maps. We are grateful to D. Makowski and J.F. Fourbet for their statistical advice. Financial support was obtained from Union Nationale Interprofessionnelle des plantes riches en Protéines, GAE-Recherche and Institut National de la Recherche Agronomique-(Action Impact). We also thank Alan Scaife for his comments on the preparation of this paper.

References

- Aguirrezabal L 1993 Modélisation de l'allongement et de la ramification du système racinaire du tournesol (*Helianthus annuus* L.). Effet du rayonnement intercepté et de la température. Thèse de Doctorat, Université Blaise Pascal, Clermont-Ferrand (France), 90 p.
- Andersen M N and Aremu J A 1991 Drought sensitivity, root development and osmotic adjustment in field grown pea. *Irrig Sci.* 12, 45-51.
- Barraclough P B and Leigh R A 1984 The growth and activity of winter wheat roots in the field: the effect of sowing date and soil type on root growth of high-yielding crop. *J. Agric. Sci.* 103, 59-74.
- Bourion V, Duparque M, Lejeune-Henaut I and Munier-Jolain N G 2002 Criteria for selecting productive and stable pea cultivars. *Euphytica* 126, 391-399.
- Bourion V, Lejeune-Hénaut I, Munier-Jolain N and Salon C 2003 Cold acclimation of winter and spring peas: carbon partitioning as affected by light intensity. *Eur. J. Agron.* 19, 535-548.
- Bruckler L, Lafolie F, Doussan C and Bussièrès F 2004 Modelling soil-root water transport with non-uniform water supply and heterogeneous root distribution. *Plant Soil* 260, 205-224.
- Cooper P J M, Gregory P J, Keatinge J D H and Brown S C 1987 Effects of fertilizer, variety and location on barley production under rainfed conditions in northern Syria. 2. Soil water dynamics and crop water use. *Field Crop Res.* 16, 67-84.
- Crozat Y, Gillet J P and Tricot F 1991 Effects of the soil compaction on root distribution N, P, K uptakes and growth of pea crop. *In Proc. of the 3rd International Symposium of the Society of Root Research*, Vienna, 2-6 September, 1991.
- Crozat Y, Tricot F, Gillet J P and Trochard R 1988 Etat structural et élaboration du rendement du pois de printemps. *Compte-rendu d'essai 1988. ESA Angers/ITCF (France)*, 49 p.
- Crozat Y, Tricot F, Gillet J P and Trochard R 1989 Etat structural et élaboration du rendement du pois de printemps. *Compte-rendu d'essai 1989. ESA Angers/ITCF (France)*, 49 p.

- Curtforth H W, Shaykewich C F and Cho C M 1986 Effect of soil water and temperature on corn (*Zea mays*) root growth during emergence. *Can. J. of Soil Sci.* 66, 51-58.
- Doré T 1992 Analyse, par voie d'enquête, de la variabilité des rendements et des effets précédents du pois protéagineux de printemps (*Pisum sativum* L.). Thèse de Doctorat, Institut National d'Agronomie, Paris-Grignon (France), 214 p.
- Eavis B W 1972 Soil physical conditions affecting seedling root growth. III. Comparisons between root growth in poorly aerated soil and at different oxygen partial pressures. *Plant Soil* 37, 151-158.
- Etévé G, Boilleau M, Stempniak J J, Devaux R and Lejeune I 2004 Breeding winter peas: towards a new background. *In 5th European Conference on Grain Legumes*, Dijon, France, 2004.
- Fitter A H, Graves J D, Self G K, Brown T K, Bogie D S and Taylor K 1998 Root production, turnover and respiration under two grassland types along an altitudinal gradient: influence of temperature and solar radiation. *Oecologia* 114, 20-30.
- Fleury A and Leterme P 1987 Requirements about the photothermal quotients use for yield explanation. *C.R. Acad. Agric. Fr.* 73, 37-43.
- Gladish D K and Rost T L 1993 The effects of temperature on primary root growth dynamics and lateral root distribution in garden pea (*Pisum sativum* L., cv."Alaska"). *Env. and Exp. Bot.* 33, 243-258.
- Guillioni L, Wéry J and Lecoeur J 2003 High temperature and water deficit may reduce seed number in field pea purely by decreasing plant growth rate. *Functional Plant Biology* 30, 1151-1164.
- Hamblin A and Tennant D 1987 Root length and water uptake in cereals and grain legumes: How well are they correlated? *Aust. J. of Agri. Res.* 38, 513-527.
- Hamblin A P and Hamblin J 1985 Root characteristics of some legumes species and varieties on deep, free-draining entisols. *Aust. J. of Agri. Res.* 36, 63-72.
- Hansen J and Nymann Eriksen E 1974 Root formation of pea cuttings in relation to the irradiance of the stock plants. *Physiology Plant* 32, 170-173.
- Jakobsen I and Nielsen N E 1983 Vesicular-arbuscular Mycorrhiza in field grown crops I. Mycorrhizal infection in cereals and peas at various times and soil depths. *New Phytologist* 93, 401.
- Jensen F H 1985 Genetical studies of the *Pisum sativum* root system. *Pisum newsl.* 17, 34-35.
- Jordan M O 1987 Mise en place du système racinaire du maïs. I. Importance de quelques paramètres relatifs à la plante. *Agronomie* 7, 365-371.
- Kaspar T C and Bland W L 1992 Soil temperature and root growth. *Soil Sci.* 154, 290-299.
- King, J, Gay A, Sylvester-Bradley R, Bingham I, Foulkes M.J, Gregory P and Robinson R 2003 Modelling cereal root systems for water and nitrogen capture: towards and economic optimum. *Ann. Bot.* 91, 383-390.
- Lejeune-Hénaut I, Morin J, Fontaine V, Etévé G, Devaux R, Thomas M, Boilleau M, Stempniak J J, Petit A, Rameau C and Baranger A 2004 Towards gene to breed for freezing resistance in pea. *In 5th European Conference on grain legumes: Legumes for the benefit of agriculture nutrition and the environment: their genomics, their products, and their improvement*, Dijon, France, 2004. pp 127.
- McMichael BL and Quisenberry J E 1993 The impact of the soil environment on the growth of root systems. *Env. Exp. Bot.* 33(1), 53-61.
- Merrill S D, Tanaka D L and Hanson J D 2002 Root length growth of eight crop species in haplustoll soils. *Soil Sci. Soc. of Am. J.* 66, 913-923.
- O'Toole J C and Bland W L 1987 Genotypic variation in crop plant root systems. *Adv. Agron.* 41, 91-145.

- Polomski J and Kuhn N 1998 Root systems. Paul Haupt AG Bern, Bern. 290 p.
- Salter P J and Drew D H 1965 Root growth as a factor in the response of *Pisum sativum* L. in irrigation. *Nature* 4988, 1063-1064.
- Salter P J and Goode J E 1967 Crop responses to water at different stages of growth. Commonwealth Agricultural Bureau, England.
- SAS institute S 1987 SAS/STAT Guide for Personal Computer. 6th edition, SAS institute, Cary, NC.
- Tardieu F and Manichon H 1986 Caractérisation en tant que capteur d'eau de l'enracinement du maïs en parcelle cultivée. II. - Une méthode d'étude de la répartition verticale et horizontale des racines. *Agronomie* 6, 415-425.
- Taylor H M 1980 Postponement of severe water stress in soybeans by rooting modifications: A progress report. *In* World Soybean Research Conference, Boulder, 1980. Ed F T Corbin.
- Thorup-Kristensen K 1998 Root growth of green pea (*Pisum sativum* L.) genotypes. *Crop Sci.* 38, 1445-1451.
- Tricot F 1993 Mise en place des nodosités du pois protéagineux de printemps (*Pisum sativum* L.). Influence de la nutrition carbonée. Thèse de Doctorat, Université Paris-Sud, centre d'Orsay (France), 78 p.
- Tricot F, Crozat Y and Pellerin S 1997 Root system growth and nodule establishment on pea (*Pisum sativum* L.). *J. of Exp. Bot.* 48, 1935-1941.
- Tsegaye T and Mullins C E 1994 Effect of mechanical impedance on root growth and morphology of two varieties of pea (*Pisum sativum* L.). *New Phytol.* 126.
- Tsegaye T, Mullins C E and Diggle A J 1995 An experimental procedure for obtaining input parameters for the "ROOTMAP" root simulation program for peas (*Pisum sativum* L.). *Plant Soil* 172, 1-16.
- Turman P C, Wiebold W J, Wrather J A and Tracy P W 1995 Cultivar and planting date effects on soybean root growth. *Plant Soil* 176, 235-241.
- UNIP 2005 UNIP Statistiques Plantes riches en protéines. UNIP-PROLEA, Paris (France), 91 p.
- Veierskov B 1985 Pea seedling growth and development regulated by cotyledons and modified by irradiance. *Physiol. Plant.* 65, 79-84.
- Venables W N and Ripley B D 2002 Time series analysis. *In* Modern Applied Statistics with S. pp 387-418. Springer, New-York.
- Vincent C D and Gregory P J 1989a Effects of temperature on the development and growth of winter wheat roots. *Plant Soil* 119, 99-110.
- Vincent C D and Gregory P J 1989b Effects of temperature on the growth and the development of winter wheat roots. I Controlled glasshouse studies of temperature, nitrogen and irradiance. *Plant Soil* 119, 87-97.
- Voisin A S 2002 Etude du fonctionnement des racines nodulées du pois (*Pisum sativum* L.) en relation avec la disponibilité en nitrates du sol, les flux de carbone au sein de la plante et la phénologie. Thèse de Doctorat, Université de Bourgogne, Dijon (France), 219 p.
- Voisin A S, Salon C, Munier-Jolain N G and Ney B 2002 Effect of mineral nitrogen on nitrogen nutrition and biomass partitioning between the shoot and roots of pea (*Pisum sativum* L.). *Plant Soil* 242, 251-262.
- Webb D P 1976 Root growth in acer saccharum marsh. Seedlings: effects of light intensity and photoperiod on root elongation rates. *Bot. Gaz.* 137, 211-217.

2. Effects of soil structure on pea (*Pisum sativum* L.) root development according to sowing date and cultivar

Aurélie Vocanson^{1*}, Jean Roger-Estrade¹, Hubert Boizard² & Marie-Hélène Jeuffroy¹

¹INRA-INA P-G, Unité Mixte de Recherche d'Agronomie, B.P. 01, 78850 Thiverval-Grignon, France.

²INRA, Unité d'Agronomie de Laon-Reims-Mons, Estrées-Mons, B.P. 136, 80203 Péronne cedex, France.

* Corresponding author. Tel: +33(0)130815906; fax: +33(0)130815425; e-mail: vocanson@grignon.inra.fr

Key words: compaction, maximum root depth, root distribution, root elongation rate

Abstract

Spring peas are known to be very sensitive to compaction, particularly when sowing takes place soon after winter. Winter peas, which are sown in autumn, should present an opportunity to sow the crop in better soil structure conditions than for spring peas, because of more favourable moisture conditions at that time. As environmental conditions have a big influence on root systems, it is important to determine the effects of soil structure on pea root systems for different cultivars and sowing dates. A spring pea cultivar and a winter pea cultivars were both sown at two dates (one in autumn and one in spring) on soils with different plough-layer structures (compacted and uncompacted) at two sites in 2002 and one site in 2003. Soil structure was characterised by bulk density and the percentage of highly compacted zones in the ploughed layer. Root distribution maps were produced every month, from February to maturity. Root development was described in terms of general root dynamics, root elongation rate in the subsoil, final maximum root depth and root distribution at maturity. Root depth dynamics depended on compaction and its interaction with climatic conditions. The effects of compaction on root elongation rate in the subsoil depended on the experimental conditions. Final maximum root depth was reduced by 0.10 m by compaction. Compaction also reduced root distribution between 10 and 40% in the ploughed layer only. Pea cultivars differed in sensitivity to soil compaction, with a direct effect on the final depth explored by roots. These results are discussed in terms of their relevance to water and nutrient uptake.

Abbreviations: Dmax – final maximum root depth; RER – root elongation rate; %SWR – percentage of squares with at least one protruding root.

INTRODUCTION

Most pea cultivars grown in France are spring-sown cultivars (90% of the total area under peas in 2004, (UNIP, 2005). Farmers tend to sow this crop as soon as possible from February in order to maximise the length of the crop cycle and to escape periods of highly detrimental thermal and water stress during yield formation, thereby increasing potential yield. In these situations, the soil is often not dry enough for good seed bed preparation and sowing (Le Bail and Meynard, 2003). Pea is sensitive to dense soil (Doré, 1992), which decreases growth, nitrogen nutrition and crop yield in field conditions (Crozat et al., 1992; Dawkins et al., 1984). As soil water content is generally lower during the sowing period in the autumn than in the spring, soil structure would be expected to be more favourable for winter pea crops than for spring pea crops. The use of November-sown winter pea crops may therefore be advantageous. However, little is known about the varying effects of soil structure on winter and spring pea root dynamics, particularly in field conditions.

Compaction has two major effects on root systems. Firstly, it decreases the size of the air-filled macropores (Stepniewski et al., 1994), restricting aeration and impeding root growth. Eavis (1972) demonstrated that, in pea, root length, dry weight and root elongation are affected by oxygen stress. Secondly, compaction increases soil impedance. In short-term experiments, Taylor and Ratliff (1969) showed that root elongation rates decreased with increasing soil strength in cotton and peanut. Tsegaye and Mullins (1994) observed a significant decrease in axial and second-order lateral root growth rate, axis diameter and total root length as penetration resistance increased from 0.101 to 0.506 MPa in pea grown in controlled conditions. Furthermore, compaction is not uniform over the entire soil volume and different parts of the root system are therefore exposed to different degrees of compaction (Unger and Kaspar, 1994). Compaction can be characterised by determining bulk density in laboratory conditions, but this variable does not take into account the spatial variability of soil structure in the field. We therefore decided to use a morphological method for soil structure characterisation described by Manichon and Gautronneau (1987). Tardieu and Manichon (1987) used this method to show that root density in maize depended on the spatial variability of soil structure and that the root depth reached at maturity depended on the degree of compaction. Tardieu and Manichon (1987) showed that soil structure limited the capacity of maize roots to extract soil water.

However, rooting also depends on the cultivar considered: in controlled conditions, Tsegaye and Mullins (1994) observed differences in the root response of two spring pea cultivars to mechanical impedance: the axes grew significantly more slowly in Solara than in Progeta. Few direct comparisons of root sensitivity to changes in field conditions have been reported. Moreover, the field experiments carried out up to date for pea in soils with different structures have considered only spring cultivars sown in spring (Crozat et al., 1992). The effects of weathering on soil structure and of weather conditions on crop growth during the winter would be expected to influence root growth and the effects of compaction on that growth. It is thus important to determine whether the effects of compaction are similar for peas sown in autumn and spring.

In this study, our aims were (1) to determine the effect of soil compaction on root development and distribution and (2) to investigate whether the effects of compaction on root characteristics depended on sowing date and cultivar.

MATERIALS AND METHODS

Sites and treatments

The experiments were carried out on a silty loam soil (FAO, 1998) at Grignon (France, 48.9°N, 1.9°E; 21% clay, 70% silt, 9% sand) in 2002 and 2003 (experiments 1 and 2, respectively) and at Estrées-Mons (France, 49.7°N, 3.4°E; 19% clay, 76% silt, 5% sand) in 2002 (experiment 3). Two pea cultivars (Baccara, a spring cultivar, and Dove, a winter cultivar) were sown in two different periods (November: D1 and February: D2). We created two different structures of the ploughed layer: a favourable structure, with few compacted zones (UC), and a highly compacted structure (C). The ploughed layer was compacted by 2 passes in Grignon (machinery mass: 5.2 Mg, tyre width: 0.4 m and tyre inflation pressure 250 kPa) and 4 passes in Mons (machinery mass: 8.5 Mg, tyre width: 0.7 m and tyre inflation pressure 250 kPa) over the entire area after a wet period following ploughing and before secondary tillage for seed bed preparation. Compaction was generated on the same date, regardless of sowing date, excepted in Mons (Table I.5). Sowing density was 80 seeds m⁻². Each experimental plot was 1.75 m wide by 30 m long at Grignon and 1.52 m wide by 6 m long at Estrées-Mons. The row spacing was 0.17 m at both sites.

Table I.5. Ploughing dates for all treatments (and the date of compaction for the C treatments), secondary tillage and sowing according to experiment and sowing date.

	Exp.1		Exp. 2		Exp. 3	
	Grignon (2002-2003)		Grignon (2003-2004)		Mons (2002-2003)	
	D1	D2	D1	D2	D1	D2
Ploughing	28 Oct., 2002	28 Oct., 2002	3 Nov., 2003	3 Nov., 2003	30 Oct., 2002	28 Feb., 2003
Compaction	28 Oct., 2002	28 Oct., 2002	3 Nov., 2003	3 Nov., 2003	30 Oct., 2002	28 Feb., 2003
Secondary tillage and sowing	15 Nov., 2002	27 Feb., 2003	13 Nov., 2003	5 Feb., 2004	30 Oct., 2002	28 Feb., 2003

Weather conditions

Daily minimum and maximum air temperatures, incident radiation and rainfall were recorded by permanent weather stations situated no more than 200 m from each experimental site.

Characterisation of soil structure

Dry bulk density was measured separately for the seed bed (depth between 0 and 0.05 m), the ploughed layer (depth between 0.05 and 0.25 m) and the subsoil layer (depth between 0.3 m and 0.6 m). Three cores (volume 98.1 cm³ each) were taken from each layer for each treatment. The cores were dried in an oven at 105°C for two days and weighed to calculate dry bulk density (Campbell, 1994).

We characterised variability in soil structure of the ploughed layer, using the morphological description proposed by Manichon and Gautronneau (1987). We dug a soil pit perpendicularly to the direction of the tillage (1.75 m in width at Grignon and 1.5 m in width at Mons, 0.6 m in depth at both sites). The severely compacted zones (diameter > 2 cm), referred to here as Δ zones, were outlined in the ploughed layer using a knife. We photographed the observation face with a digital camera (Sony, DSC-S75). The percentage of the soil containing Δ zones was calculated for the ploughed surface area, using image analysis (Optimas 6.0. software) on the photographs. The structure of the ploughed layer was characterised on 8 April 2003 for exp. 1, 11 May 2004 for exp. 2, and 20 March 2003 for exp. 3. In each experiment, the observations were carried out for all soil structure x sowing date combinations, for the cultivar Dove.

Root measurements

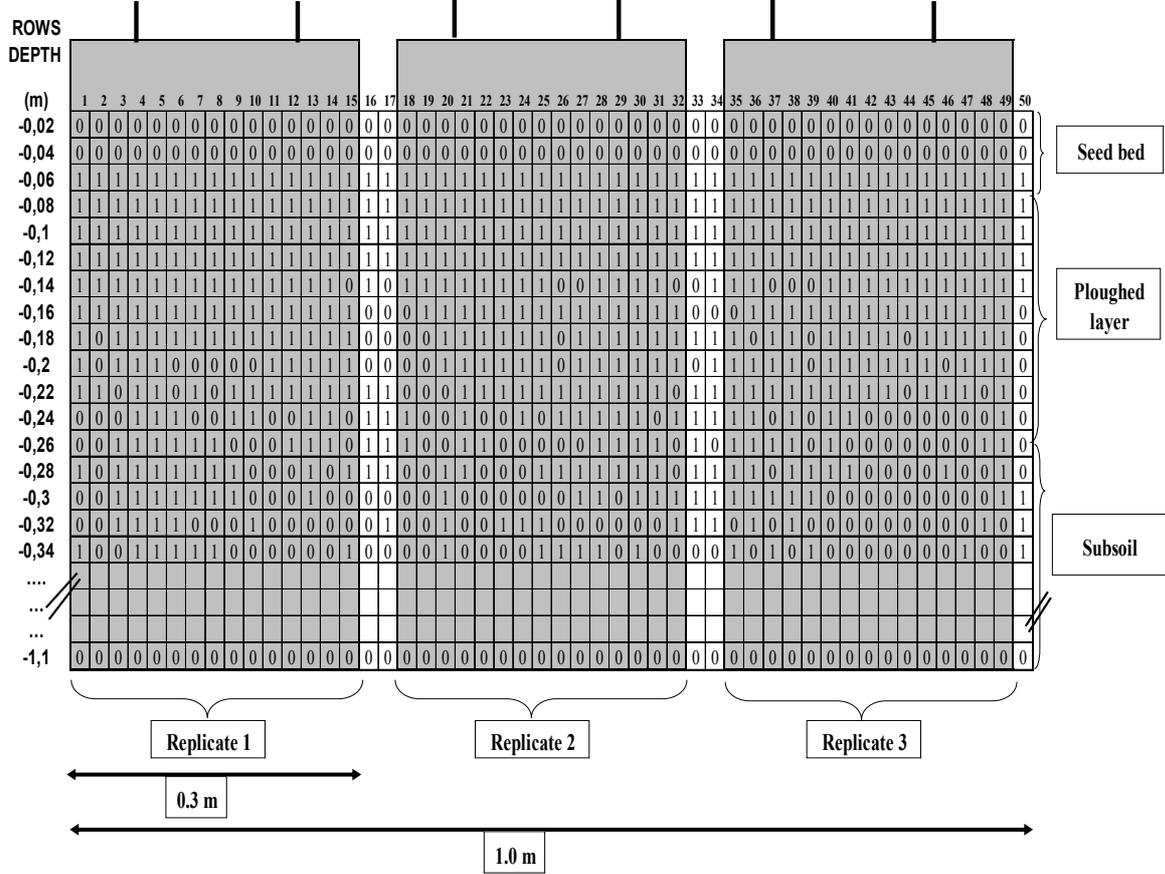
The root system was mapped according to the trench wall technique (Tardieu and Manichon, 1986). For each treatment, a soil pit (1.3 m in width, 1.2 m in depth) was dug perpendicularly to the rows. A plane observation face was prepared, using a knife to remove the soil from around the roots and cutting the roots so that they protruded 1 cm from the final observation face. A grid (1 m in width, 1.1 m in depth, 0.02 x 0.02 m mesh) was fixed on the observation face and the absence (0) or the presence (1) of roots was noted, the number of roots visible in each square was not taken into account. This generated a root map, an example of which is provided in Figure I.4. For each new observation, we advanced 0.5 m beyond the previous observation face and cut a new observation face. In this manner, the trench gradually progressed across the field. We generated 80 root maps, corresponding to four to five observations per treatment, made once per month from February to maturity (between end of June and the beginning of July, according to the sowing date).

The percentage of observed squares with at least one protruding root (%SWR), relatively to the total number of squares observed, was determined for each 0.1 m layer. Along the whole root profile, this variable was used to represent root distribution per 0.1 m layer.

For each root map, maximum root depth at observation date was defined as the depth at which less than 10% of squares in the root map contained at least one root impact. Final maximum root depth (Dmax) was defined as the value reached on the last observation date, close to maturity.

For each experiment, observations located below the ploughed layer and above 0.05 m before Dmax were fitted with time. The slope of this linear relationship was called root elongation rate (RER). Time was expressed as cumulative radiation from sowing (in MJ m⁻²).

Figure I.4. Example of root map (7 July 2003, exp. 3 UC D1 Dove). The vertical bars at the top indicate the positions of the pea rows. The boxes shaded in grey indicate the area covered by each replicate considered. Squares containing a 0 had no root impact and square containing a 1 had at least one root impact.



Statistical analysis

As root mapping is very destructive, it was impossible to have spatial replicates for each treatment at each observation date. However, we needed to take the existing heterogeneity of the soil structure into account by creating replicates within each root map, dividing each map into three consecutive zones. Yet, the spatial development of root in terms of depth and width made it highly likely that there would be interactions between these replicates. We checked this possibility as we intended to analyse our results by analysis of variance, which is highly sensitive to the independence of replicates. We overcame this problem using time series analyses: considering a replicate as a series of successive columns in the profile, we determine the number of columns we needed to leave between two replicates to ensure their independence (Venables and Ripley, 2002). For each root map (described above, Figure I.4), we added the scores of the 50 squares in each column, covering the entire depth of soil considered. This gave a series of 50 numbers, one for each column, corresponding to cumulative SWR. The column on the left was considered to be the origin, corresponding to the starting point of observation. We carried out a time series analysis to identify autocorrelations. Two number sequences were considered to be independent if a correlation coefficient less than 15% was obtained. We also developed an index measuring the shortest distance between two number sequences required to avoid correlation between those sequences. We named this distance the minimum column spacing (MCS). We therefore used a MCS of two columns between replicates to minimise the risk of interaction between replicates, as this was sufficient to ensure independence in 64 root maps (80% of the total).

So, for root maps including 50 columns of 0.02 m each (giving a total width of 1 m), we created three replicates, each consisting of 15 consecutive columns (0.3 m in width, Figure I.4). The first fifteen columns corresponded to the first replicate. The next two columns were excluded. The following 15 columns became the second replicate. The next two columns were excluded and the last 15 columns became the third replicate. For each root map, we carried out analyses of variance based on the results obtained for these three replicates.

Analyses of variance were performed on soil structure (bulk density and % of Δ clods), Dmax, RER and SWR, with the SAS type III GLM procedure (SAS Institute, 1987). We tested the effects of soil structure, sowing date, cultivar and environment, and with interaction between soil structure and respectively sowing date and cultivar. The effect of environment corresponded to the effects of replicate, climate and site characteristics. For root distribution, analysis of variance was performed on the cumulative SWR values per 0.1 m layer. We also assessed the effect of depth. Then by depth, mean values were compared using the least significant test (LSD) at the 0.05 probability level (SAS Institute, 1987).

RESULTS

Weather conditions

Whatever the experiment, spring sowing occurred at a period with low mean daily temperature (around 5.3°C) and medium high daily incident radiation (around 9.5 MJ m⁻²) in comparison with an autumn sowing (mean daily temperature around 7.9°C and mean daily incident radiation around 4.5 MJ m⁻², Table I.6).

For D1, the number of days with mean temperatures below 0°C was higher in exp. 1 and 3 (16 and 22, respectively) than in exp. 2 (5 days). In contrast for D2, the number of days with mean temperatures below 0°C was around zero in the three experiments.

Cumulative rainfall was higher in exp. 1 and 3 than in exp. 2 during two periods: from 1 October to 31 December and from 1 April to 30 June. In the three experiments, the wettest period was observed during the beginning of the cycle for an autumn sowing: from 1 October to 31 December.

Table I.6. Weather conditions during the experiments.

	Exp. 1	Exp. 2	Exp. 3
<i>Mean daily incident radiation (MJ m⁻²)</i>			
From 1 October to 31 December	4.2	4.6	4.7
From 1 January to 31 March	7.5	13.1	7.8
From 1 April to 30 June	18.9	17.2	19.9
<i>Mean daily temperature (°C)</i>			
From 1 October to 31 December	9.3	7.6	6.9
From 1 January to 31 March	5.4	5.7	4.8
From 1 April to 30 June	15.1	15.4	14.2
<i>Number of days with mean temperature below 0°C during the crop cycle</i>			
D1	16	5	22
D2	0	1	0
<i>Cumulative rainfall (mm)</i>			
From 1 October to 31 December	213	150	285
From 1 January to 31 March	79	103	102
From 1 April to 30 June	111	78	136

Soil structure characterisation

The percentage of Δ zones varied from 6% in uncompacted soil (exp. 2 D2 UC) to 97% in compacted soil (exp. 2 D2 C) (Table I.7). C treatments had an average of 78% Δ zones whereas UC treatments had only 16% Δ zones. In the ploughed layer, the percentage of Δ zones differed significantly between UC and C treatments in the six situations (Table I.7). The highest percentage of Δ zones for UC treatments was 38% Δ zones (exp. 3, D2), whereas the lowest value for C treatments was 64% Δ zones (exp. 3, D2).

Bulk density in the ploughed layer varied from 1.36 Mg m⁻³ (exp. 1 UC D1 and exp. 2 UC D2) to 1.60 Mg m⁻³ (exp. 2 C D1). C treatments had a mean bulk density of 1.53 Mg m⁻³ whereas UC treatments had a mean bulk density of 1.39 Mg m⁻³. In three situations (exp. 1 D2, exp. 3 D1 and exp. 3 D2), C and UC treatments differed in bulk density by less than 0.10, which was not significant.

Subsoil bulk density varied between 1.44 Mg m⁻³ and 1.57 Mg m⁻³ and did not differ significantly between UC and C treatments (Table I.7), with the exception of exp. 1, D1 where the bulk density was higher in the UC treatment.

Table I.7. Soil structure in the three experiments: percentage of Δ clods in the ploughed layer and bulk density in and below the plough layer are given for each sowing date (D1: November, D2: February) and each soil structure treatment (Uncompacted: UC, Compacted: C). For a given variable, the values followed by a same letter are not significantly different at the 5% level.

Sowing date	Exp. 1				Exp. 2				Exp. 3			
	D1		D2		D1		D2		D1		D2	
Soil Struct.	UC	C	UC	C	UC	C	UC	C	UC	C	UC	C
<i>% Δ clods in the ploughed layer</i>												
	14 a	72 d	13 a	66 d	10 a	93 f	6 a	97 f	18 ab	75 de	38 c	64 d
<i>Bulk density in the ploughed layer (Mg m⁻³)</i>												
	1.36 a	1.53 def	1.39 ab	1.49 bcde	1.39 ab	1.60 f	1.36 a	1.57 ef	1.40 abc	1.46 bcd	1.43 abcd	1.50 cde
<i>Bulk density in the subsoil layer (Mg m⁻³)</i>												
	1.57 e	1.47 abc	1.51 bcde	1.46 ab	1.46 ab	1.50 abcd	1.44 a	1.51 bcde	1.56 de	1.53 bcde	1.55 de	1.53 cde

General pattern of root system

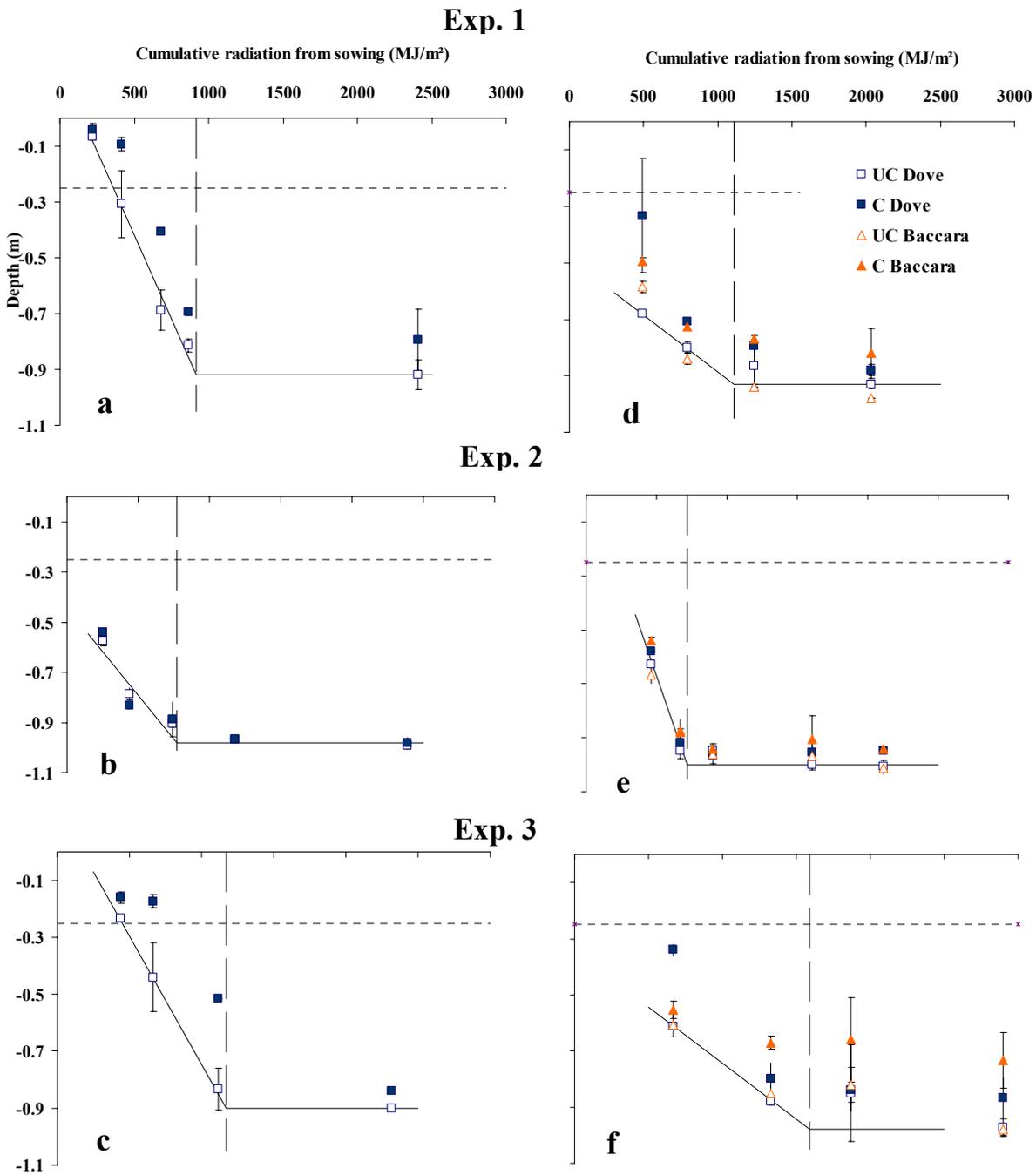
Root development dynamics on UC plots followed a two-phase pattern according to cumulative radiation from sowing (Figure I.5): (1) a period of linear root development during which maximum root depth increased rapidly, (2) a period during which root depth remained nearly constant, closed to final maximal root depth.

In two situations, the same two-phase pattern was observed in C and UC situations (exp. 2 D1 and D2, Figures I.5 b and e).

Root depth was significantly different for the C than for the UC treatments at the first observation in two situations (exp. 1 D2: Figure 2d, particularly for the cultivar Dove and exp. 3 D2, only for the cultivar Dove: Figure I.5 f). In subsequent observations, root depth was slightly different for C treatments than for UC treatments. For exp. 3 D2, the spring cultivar Baccara presented a general rooting pattern different from that of the winter cultivar Dove: for the first observation, root depths were similar for C and UC treatments, whereas root depths were smaller for C treatment than for UC treatment in subsequent observations (Figure I.5 f).

In the two last situations – exp. 1 D1 (Figure I.5 a) and exp. 3 D1 (Figure I.5 c) – root depth for the first observation was similar for C and UC treatments (exp. 1 D1) or slightly smaller for C than for UC treatments (exp. 3 D1). For the second observation, root depth was significantly smaller for the C (-0.10 m in exp. 1 D1 and -0.15 in exp. 3 D1) than for the UC (-0.31 m depth in exp. 1 D1 and -0.48 in exp. 3 D1) treatments. Thus, root growth downwards was delayed for the C treatment in comparison with the UC treatments.

Figure I.5. Root development according to the cultivar – Dove (■); Baccara (▲) – and soil structure (open symbols, uncompacted: UC; closed symbols, compacted: C) for a November sowing (figures a, b, c) and a February sowing (figures d, e, f). Each point is the mean value of the three replicates. Vertical bars represent the standard deviation.



Root elongation rate in the subsoil

RER was between $3.9 \times 10^{-4} \text{ m MJ}^{-1} \text{ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ and $18.8 \times 10^{-4} \text{ m MJ}^{-1} \text{ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ (Table I.8). The model of analysis of variance accounted for only 36% of the variability of RER and was significant at the 10% level (Table I.9).

Mean RER below the compacted ploughed layer was $9.8 \times 10^{-4} \text{ m MJ}^{-1} \text{ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ for C treatments and $8.1 \times 10^{-4} \text{ m MJ}^{-1} \text{ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ for UC treatments, and the difference between these two values was not significant ($P>0.05$). Sowing date had no significant effect ($P>0.05$): mean RER for D1 was $8.4 \times 10^{-4} \text{ m MJ}^{-1} \text{ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$, versus $9.9 \times 10^{-4} \text{ m MJ}^{-1} \text{ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ for D2. Mean RER was similar for Dove and Baccarat ($9.1 \times 10^{-4} \text{ m MJ}^{-1} \text{ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$). Finally, the environment was the only significant factor accounting for RER variability ($P<0.05$) (Table I.9). This was confirmed by the high variability of RER between experiments: RER was higher in exp. 2 (mean of $13.6 \times 10^{-4} \text{ m MJ}^{-1} \text{ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$) than in exp. 1 (mean of $8.0 \times 10^{-4} \text{ m MJ}^{-1} \text{ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$) and 3 (mean of $5.2 \times 10^{-4} \text{ m MJ}^{-1} \text{ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$) (Table I.8). No significant interaction was detected.

Table I.8. RER ($\times 10^{-4} \text{ m MJ}^{-1} \text{ m}^2$) and Dmax (m) by experiment, sowing date (D1 in autumn; D2 in spring), soil structure (UC: uncompacted; C: compacted) and cultivar. n.d. not determined. n.d.*: not determined due to missing data. For a given variable, the values followed by the same letter are not significantly different at the 5% level.

	Exp. 1				Exp. 2				Exp. 3			
Sowing Date	D1		D2		D1		D2		D1		D2	
Soil Struct.	UC	C	UC	C	UC	C	UC	C	UC	C	UC	C
Cultivar	<i>RER ($\times 10^{-4} \text{ m MJ}^{-1} \text{ m}^{-2}$)</i>											
Baccara	n.d.	n.d.	9.2 e	7.7 f	n.d.	n.d.	10.8 c	18.8 a	n.d.	n.d.	4.0 kj	4.3 j
Dove	10.0 d	10.7 c	3.9 k	9.2 e	6.8 g	6.6 g	15.9 b	15.6 b	7.7 f	n.d. *	4.8 i	5.4 h
	<i>Dmax (m)</i>											
Baccara	n.d.	n.d.	0.99 b	0.77 g	n.d.	n.d.	1.06 a	0.94 bc	n.d.	n.d.	0.98 b	0.81 f
Dove	0.88 d	0.71 h	0.93 c	0.91 dc	0.99 b	0.97 b	1.00 b	0.95 bc	0.90 cd	0.84 e	0.94 bc	0.87 ed

Table I.9. Results of analysis of variance explaining differences in RER and Dmax in terms of significant effects of soil structure (SS), sowing date (SD), cultivar (Cult), environment (Env), and interactions:

$$\text{model} = \text{constant} + \text{SS} + \text{SD} + \text{Cult} + \text{Env} + \text{SS} \times \text{SD} + \text{SS} \times \text{Cult}.$$

			RER	Dmax
Model quality				
R ²			0.36	0.69
RMSEP			4.2	6.3
Variable	Degrees of freedom		P value	P value
Soil structure	1		0.56	<0.01
Sowing date	1		0.14	0.07
Cultivar	1		0.44	0.87
Environment	8		0.02	<0.01
Soil structure x sowing date	1		0.99	0.18
Soil structure x cultivar	1		0.48	<0.01

Final maximum root depth at maturity

Effect of factors

The model of analysis of variance was significant ($P < 0.05$) and accounted for 69% of the Dmax variability (Table I.9). Dmax varied from 0.88 m to 1.06 m for UC treatments and from 0.71 m to 0.97 m for C treatments (Table I.8).

Compaction significantly reduced Dmax by 0.10 m in average (Table I.8). Dmax values were similar for both sowing dates ($P > 0.05$, Table I.9): mean Dmax was 0.93 m for spring sowing and 0.88 m for autumn sowing. No interaction was observed between sowing date and soil structure.

The two cultivars presented similar Dmax values ($P > 0.05$). In D2 UC treatments, mean Dmax was 1.01 m for Baccara and 0.96 m for Dove (Table I.8). In contrast, Baccara was more sensitive to soil compaction than Dove: for D2, compaction decreased the Dmax of Dove between 0.02 and 0.07 m, whereas it decreased that of Baccara between 0.12 and 0.22 m.

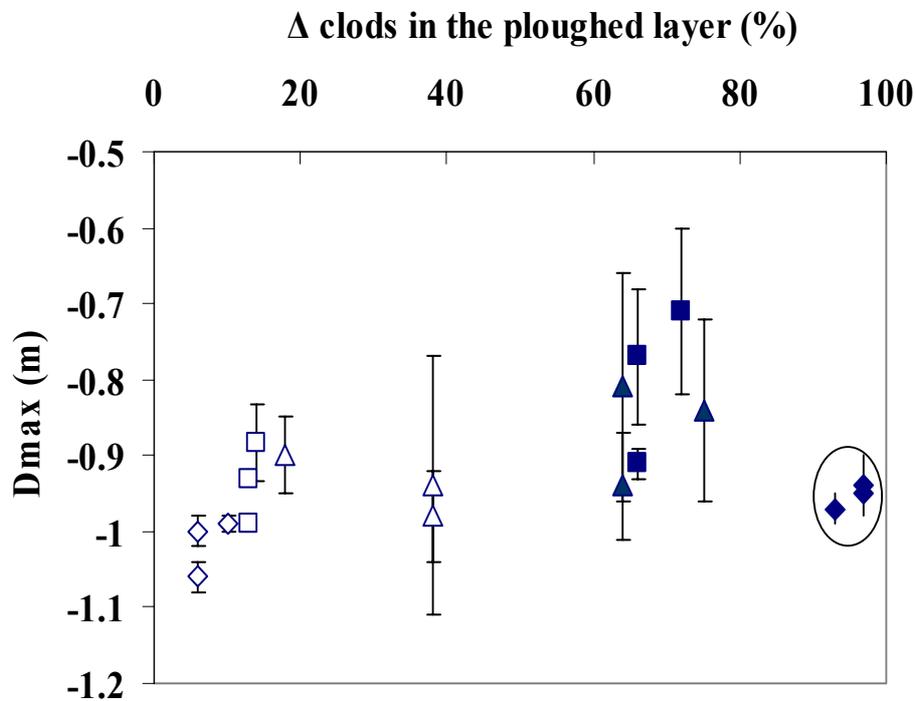
Dmax was highly sensitive to environmental conditions, and was greater in exp. 2 (mean: 0.99 m depth) than in exp. 1 and 3 (mean: 0.86 and 0.89 m, respectively).

Relationship to soil structure

We classified Dmax according to percentage of Δ clods into two groups: (1) for exp. 1 and 3, the higher the % of Δ clods, the smaller the value obtained for Dmax; (2) for exp.3, the percentage of Δ clods had no effect on Dmax (Figure I.6).

If all the data were considered together, Dmax was not linearly related to the percentage of Δ clods. The standard deviation was very high in exp. 1 and 3, for treatments with percentage of Δ clods higher than 38%.

Figure I.6. Relationship between final maximum root depth (D_{max} , m) and percentage of Δ clods in the ploughed layer, for uncompacted treatments (open symbols) and compacted treatments (closed symbols), in exp. 1 (■), exp. 2 (◆) and exp. 3 (▲). Vertical bars represent standard deviation. Circle points are special treatments. Three particular points are circled (see text).



Root distribution

Effect of factors

The model of analysis of variance was significant ($P < 0.05$), accounting for 71% of the variability of SWR (Table I.10). The four significant factors were soil structure, sowing date, environment and depth ($P < 0.05$).

The effect of soil structure on %SWR depended on depth ($P < 0.05$). There were about 40 to 100 %SWR in the ploughed layer for UC treatments. In all situations, compaction significantly reduced SWR in the ploughed layer ($P < 0.05$, Figure I.7): %SWR was 10 to 40 % lower for C than for UC treatments (Figure I.7). At a depth of 0.4 m, in all situations (except that shown Figure 4f), %SWR decreased, regardless of whether the soil structure was compacted or not. At depths greater than 0.5 m, bulk density was similar for different treatments (Table I.7), but some significant differences in %SWR were observed between C and UC soils in two situations, for Baccara, D2 exp. 1 and 2 (Figure I.7 a and b). Indeed, although cultivar had no significant effect on %SWR ($P > 0.05$), a significant interaction with soil structure was observed ($P < 0.05$). Although %SWR was significantly higher for D2 than for D1 ($P < 0.05$), no significant interaction with soil structure or cultivar was observed ($P > 0.05$). However, %SWR was very sensitive to environment ($P < 0.05$).

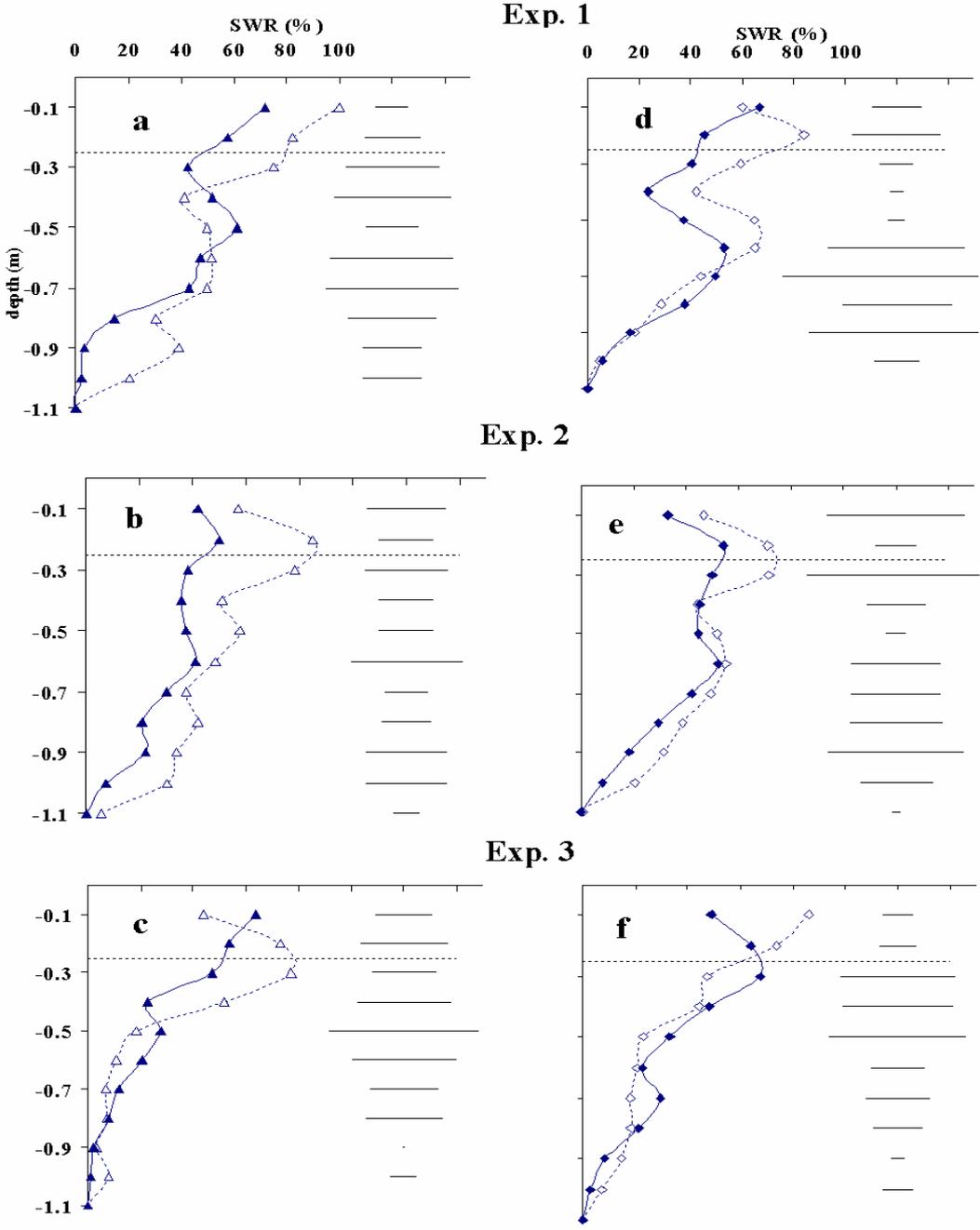
Table I.10. Results of analysis of variance explaining differences in SWR in terms of significant effects of soil structure (SS), sowing date (SD), cultivar (Cult), environment (Env), depth and interactions:

$$\text{SWR} = \text{constant} + \text{SS} + \text{SD} + \text{Cult} + \text{Env} + \text{depth} + \text{SS} \times \text{SD} + \text{SS} \times \text{Cult} + \text{SD} \times \text{Cult} + \text{SS} \times \text{depth}$$

(A) Analysis of variance						
Source	Degrees of freedom	Sum of squares	Pr>F	Model quality		
Model	34	14.1 x 10 ⁴	<0.001	R ² =0.71		
Residual	625	5.8 x 10 ⁴		RMSE=6.8		
Total	659	19.9 x 10 ⁴				

(B) Estimates of the effects of the factors						
Variable	Degrees of freedom	P value				
Soil structure	1	<0.01				
Sowing date	1	0.05				
Cultivar	1	0.60				
Environment	8	<0.01				
Depth	10	<0.01				
Soil structure x sowing date	1	0.30				
Soil structure x cultivar	1	0.02				
Sowing date x cultivar	1	0.55				
Soil structure x depth	10	<0.01				

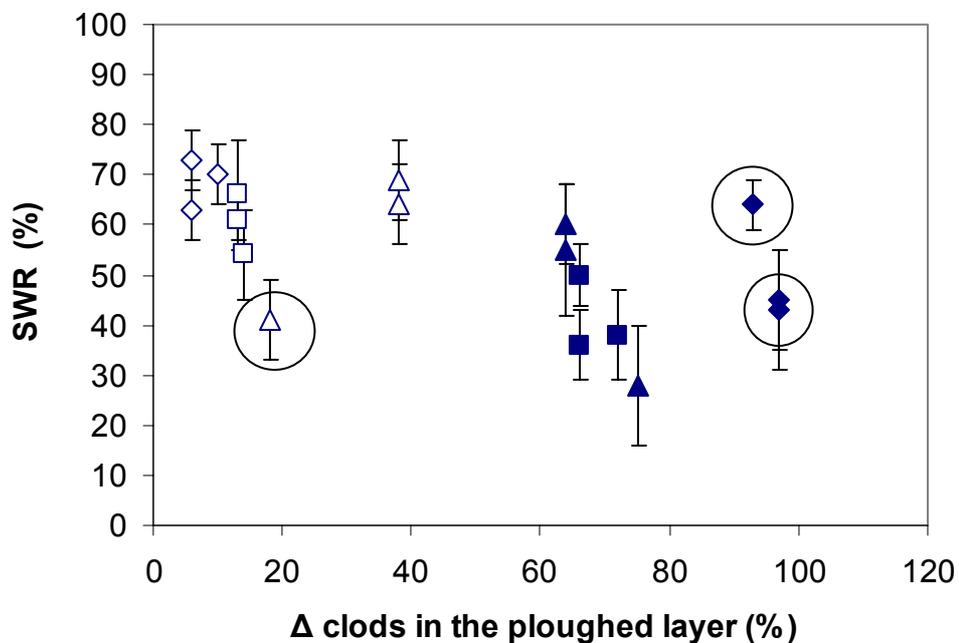
Figure I.7. Percentage of squares with at least one root impact (% SWR) in the profile (0 to -0.25 m: seed bed layer and ploughed layer; downward -0.25 m: subsoil layer), out of 50 squares observed, according to soil structure (open symbols, uncompacted; closed symbols, compacted) for the spring cultivar Baccara (figures a, b, c) and the winter cultivar Dove (figures d, e, f) for February sowing. Each point is the mean of the three replicates. Horizontal bars represent the LSD_{0.05}.



Relationship to soil structure

The % SWR in the ploughed layer decreased as the percentage of Δ clods in the ploughed layer increased (Figure I.8). Three situations stood out as being different: (1) exp.3 UC D2 Dove, which presented a significantly lower mean %SWR in the ploughed layer than the other uncompacted situations, (2) all the C treatments in exp.2, which presented a significantly higher mean %SWR in the ploughed layer than expected based on the high percentage of Δ clods.

Figure I.8. Relationship between percentage of squares with at least one root impact (%SWR) in the seed bed and ploughed layer and percentage of Δ clods in the ploughed layer, for uncompacted treatments (open symbols) and compacted treatments (closed symbols), in exp. 1 (■), exp. 2 (◆) and exp. 3 (▲). Vertical bars represent standard deviation. Circle points are special treatments (see text). Four particular points are circled. The linear regression and the phase are outlined for UC Dove only in all the experiments.



DISCUSSION

Soil structure

Bulk density in the ploughed layer varied from 1.36 Mg m⁻³ to 1.60 Mg m⁻³, as in the experiments in field conditions carried out by Crozat et al. (1992) and in controlled conditions by Pabin et al. (1998). Bulk density differed significantly between compacted and uncompacted treatments for only three of the six situations studied. In contrast, the percentage of Δ zones clearly distinguished between compacted and uncompacted treatments for all situations. The high percentage of Δ zones for uncompacted treatments in exp.3 D2 (38%) is accounted for by the high cumulative rainfall levels from October to March, resulting in more compaction at sowing in this experiment than in exp. 1 and 2 for the same sowing period, due to the higher soil water content. The mean percentage of Δ zones was 78% for compacted treatments and only 16% for uncompacted treatments, which is in the range of values also obtained by Tardieu (1984). Crozat et al. (1992) also observed situations in which the percentage of Δ zones (28%) was low whereas bulk density was high (1.46 Mg m⁻³). Soil strength varies considerably from place to place into the soil (Dexter, 1988). Tsegaye and Mullins (1994) showed that pea lateral and axial roots are highly flexible and able to avoid the obstructions presented by aggregates. The variability in soil strength is therefore important when considering soil structure. Bulk density is an averaged measure that cannot describe soil heterogeneity (Dexter, 1997). The percentage of Δ zones depends on the size distribution of clods: the higher the percentage of Δ zones, the larger the clods are likely to be (Manichon and Gautronneau, 1987). The percentage of Δ zones is therefore a good indicator of the spatial variability of soil structure with respect to root development and growth.

Root growth along the vertical axis

As observed by Massé et al. (1990) for winter wheat, the depth of the pea roots increase linearly to a maximum final value. Three situations were observed in comparison of compacted and uncompacted treatments.

First, for autumn sowings in 2002 (exp. 1 and 3), root development was slower in the ploughed layer in compacted treatments than in uncompacted treatments. Similar results were obtained by Tardieu (1984) for maize and by Stirzaker et al. (1996) for pea. We suggest that there may be an interaction between soil structure and experiment. Indeed, cumulative rainfall levels were much higher during the winter of 2002 in both sites than during the winter of 2003: compaction may therefore have led to water logging (Boone et al., 1994). The number of days with mean temperatures below 0°C was higher during the winter of 2002, at both sites, than during the winter of 2003. A compacted layer at the base of the seed bed may prevent root penetration (Dexter, 1988) and favour root development within the seed bed layer. Tricot (1993) showed that low root temperature affects root elongation rate of laterals roots in pea. Root systems were shallower for compacted than for uncompacted treatments and this may have led to the low winter air temperatures having a more marked effect for compacted than uncompacted treatments.

Second, for the spring sowing in exp. 1 and 3, compaction affected rooting at the beginning of the cycle, but less than for the autumn sowings. In these experiments, compaction was achieved in November. Weathering during winter, more especially freeze-thaw cycles, should have led to the appearance of cracks in Δ clods (Dexter, 1991). Furthermore, earthworms have a profound effect on soil structure (Dexter, 1991), facilitating root penetration. They are more active in spring than in autumn and this should also favour the formation of a pathway of low mechanical resistance for root

penetration, even in compacted situations. The effect of compaction should be decreased for a spring sowing if the compaction is realised in autumn.

Third, compaction did not affect general rooting pattern in 2003 (exp. 2), despite the very high percentage of Δ zones (93% and 97% in respectively D1 and D2). Δ zones were defined by Manichon and Gautronneau (1987) as zones with no visible structural porosity, highly resistant to penetration, and this resistance is greatest at high soil water content. Thus, when the soil dries, these zones may begin to crack and may be crossed by roots. This probably happened in these two situations.

Root elongation rate in the subsoil

RER in the subsoil highly varied between experiments and treatments, as reported by Tardieu and Manichon (1987) for maize and Massé et al. (1990) for winter wheat. Compaction in the ploughed layer had variable effects on RER in the subsoil, depending on the experimental conditions. In controlled conditions, Bengough and Young (1993) suggested that the effect of bulk density on root elongation in pea seedlings also depended on the supply of assimilate to the root, which varied according to crop requirement and the interaction between weather and soil conditions (Boone and Veen, 1994).

The compaction of a soil layer has physical, chemical and biological consequences on the layer itself and on the layers above and below it (Brussaard and Faasen, 1994). For instance, compacted soils display more cracks than uncompacted soils during dry periods. Roots use these cracks to colonise subsoil layers, thus limiting the effect of compaction on RER.

RER was calculated on the whole root system. No difference between main axis and laterals was made. As reported by Dexter (1997), soil compaction should have had significant reduced RER of axis or/and laterals, none observed when considering root system as a whole.

Final maximum root depth and relationship to soil structure

Compaction reduced mean D_{max} by 0.10 m, in all situations, consistent with the findings of Tricot (1993). Indeed, as previously shown (Stepniewski et al., 1994), root growth and activity in the subsoil may be restricted by a compacted top layer, which limits the supply of oxygen to the subsoil, thereby limiting early downward root growth. However, the decrease in D_{max} was smaller in exp. 2 (mean decrease of 0.06 m) than in exp. 1 (mean decrease of 0.13 m) and exp. 3 (mean decrease of 0.10 m). All experiments were carried out on very similar soils, and the only difference between these two experiments (exp. 1 and 2) was therefore climatic conditions. There was a clear interaction between soil structure and climatic conditions: if the winter was cold and wet, compaction had a non-negligible effect on D_{max} . In exp.1 and 3, compaction reduced D_{max} to similar extents for spring and autumn sowings.

Baccara was more sensitive to compaction than Dove: for spring sowing, compaction reduced D_{max} by a mean of 0.17 m for Baccara and 0.05 m for Dove. This result is consistent with those of Bushamuka and Zobel (1998) who observed differences in response to compaction between cultivars in both maize and soybean. Whalley et al. (1995) showed that hormones play a major role in the plant adaptation to compaction. It is possible that Baccara and Dove differ in terms of hormonal control. Baccara would also be expected to require more water than Dove due to differences in crop growth and development: Baccara presented a total aerial dry matter at maturity 9% higher than Dove in uncompacted treatments (data not shown). As compaction reduces the amount of water available for roots (Dexter, 1988), Baccara may have suffered from water stress earlier than Dove, resulting in an early cessation of downward root growth.

As suggested by Clark et al. (2003), cultivars differ in terms of root morphology, including root diameter, and this may affect the ability of a cultivar to grow in compacted soil. This hypothesis is supported by the results of Tsegaye and Mullins (1994), who observed different sensitivity to high soil bulk density between two spring pea cultivars (Progreta and Solara).

Dmax and the percentage of Δ clods were not linearly correlated. The three situations in which Dmax was high despite the percentage of Δ clods being high corresponded to exp. 2, in which compaction had no effect on downward root growth. In the other situations, compaction affected downward root growth, ultimately affecting Dmax. For these situations, a linear relationship was found between Dmax and the percentage of Δ clods (Δ) (eq.1):

$$D_{max} = 0.0025 \Delta - 1.00 \quad r^2=0.54 \text{ (eq.1)}$$

Root distribution

The spatial distribution of the roots in the ploughed layer was strongly affected by compaction in all situations, confirming the results of Tricot (1993) for pea and Tardieu and Manichon (1987) for maize. The stronger physical constraints in the compacted layers limits root lateral development to smoother zones, cracks and biopores. Indeed, the higher the percentage of Δ zones, the lower was the mean percentage of SWR in the ploughed layer, in all but two situations. For exp. 3 UC D2 Dove, the climatic conditions during winter probably damaged the root system, accounting for the very low value obtained for %SWR. For compacted treatments in exp. 2, weathering should have resulted in the Δ zones being dry enough to be crossed by roots. If we did not include these two situations in our calculations, the %SWR in the ploughed layer decreased linearly with the percentage of Δ zones (Δ) (eq. 2):

$$\%SWR = - 0.31 \Delta + 69 \quad r^2=0.58 \text{ (eq. 2)}$$

As P and K are not very mobile, the uptake of these two elements by the crop may be limited, leading to deficiencies, with consequences for pea growth and development (Croizat et al., 1991). Cooke (1954) showed that the lateral root production of pea was highest in the zones in which P and K were most concentrated. Hackett (1968) reported that differences in P and K levels of deficiencies were responsible for differences in the morphological characteristics of the different cultivars of barley. Pea cultivars may also display specificity, reacting differently to soil compaction due to differences in sensitivity to P and K deficiencies. We would also expect the depth of soil explored by nodules to be smaller in compacted soils, with consequences for N₂ fixation (Tricot et al., 1990).

Root distribution in the subsoil was not affected by compaction in most of the situations, in contrast to the finding of Tardieu (1984) for maize. The maize crop cycle runs from April to September, a period in which water stress frequently occurs. This may result in a high frequency of crack formation in compacted situations due to dry conditions (Dexter, 1991). Maize roots may be more concentrated in such cracks, which were more numerous in Tardieu (1984)'s study than in ours. Lateral root development in the subsoil should have been affected by direct soil strength only, a factor that does not differ significantly between uncompacted and compacted situations (Roger-Estrade et al., 2000).

Compaction modifies root parameters such as root diameter that were not studied here but would be expected to interfere with the crop's ability to take up water and nutrients (Clark et al., 2003 38).

However, we found that root development was very sensitive to the experimental conditions, essentially climate and soil type. Compaction affects water regimes in the whole soil that have many indirect and complex effects on aeration status, soil mechanical resistance to rooting, root extension and uptake of water and plant nutrients (Horton et al., 1994). As suggested by Pabin et al. (1998),

other factors, such as soil texture and organic carbon, may modulate the effect of compaction on root development. Further work is required to investigate these aspects. The preservation of soil structure is also important for the development of environment-friendly sustainable agriculture, decreasing soil erosion and the risk of N leaching and for economic development, due to the increases in machinery and fuel costs, and decreases in crop yields associated with soil structure degradation (Dexter 1988).

Acknowledgements

We would like to thank J.Troizier and his team for assistance with trials at the experimental Unit at Grignon, and J.J. Stempniak and his team for the trial in Estrées-Mons. We also thank G. Grandeau, V. Tanneau, B. Le Fouillen, A. Chauveau, and M. Bazot for their help with the measurements and for root maps in particular. Financial support was obtained from Union Nationale Interprofessionnelle des plantes riches en Protéines, GAE-Recherche and Institut National de la Recherche Agronomique (Action Impact). We would like to thank Alan Scaife for English language revision.

References

- Bengough A G and Young I M 1993 Root elongation of seedling peas through layered soil of different penetration resistances. *Plant Soil* 149, 129-139.
- Boone F R, Vermeulen G D and Kroesbergen B 1994 The effect of mechanical impedance and soil aeration as affected by surface loading on the growth of peas. *Soil Till. Res.* 32, 237-251.
- Boone F R and Veen B W 1994 Mechanisms of Crop Responses to Soil Compaction. *In Soil Compaction in Crop Production*. Eds. B D Soane and C van Ouwerkerk. pp 237-264. Elsevier Science B.V., Amsterdam.
- Brussaard L and Faasen H G 1994 Effects of Compaction on Soil Biota and Soil Biological Processes. *In Soil Compaction in Crop Production*. Eds. B D Soane and C van Ouwerkerk. pp 212-235. Elsevier Science B.V., Amsterdam.
- Bushamuka V N and Zobel R W 1998 Differential Genotypic and Root Type Penetration of Compacted Soil Layers. *Crop Sci.* 38, 776-781.
- Campbell D J 1994 Determination and use of soil bulk density in relation to soil compaction. *In Soil compaction in crop production*, Eds B D Soane and C van Ouwerkerk. pp 113-139. Elsevier, Amsterdam.
- Clark L J, Whalley W R and Barraclough P B 2003 How do roots penetrate strong soil? *Plant Soil* 255, 93-104.
- Cooke G W 1954 Recent advances in fertilizer placement. II. Fertilizer placement in England. *J. Sci. Food Agric.* 5, 429-440.
- Crozat Y, Gillet J P and Domenach A M 1992 Nodulation, N₂ fixation and incorporation of combined N from soil into pea crop : effects of soil compaction and water regime. *In Proc. of First European Conference on Grain Legumes*. Eds Plancquaert. pp 141-142. AEP, Paris.
- Crozat Y, Gillet J P and Tricot F 1991 Effects of the soil compaction on root distribution N, P, K uptakes and growth of pea crop. *In Proc. of the 3rd International Symposium of the Society of root research*, Vienna, 2-6 september, 1991.
- Dawkins T C K, Hebblethwaite P D and McGowan M 1984 Soil compaction and the growth of vining pea. *Ann. Appl. Biol.* 105, 329-343.
- Dexter A R 1988 Advances in Characterization of Soil Structure. *Soil Tillage Research* 11, 199-238.
- Dexter A R 1991 Amelioration of soil by natural processes. *Soil & Tillage Research* 20, 87-100.

- Dexter A R 1997 Physical properties of tilled soils. *Soil Till. Res.* 43, 41-63.
- Doré T 1992 Analyse, par voie d'enquête, de la variabilité des rendements et des effets précédents du pois protéagineux de printemps (*Pisum sativum* L.). Thèse de Doctorat, Institut National Agronomique, Paris-Grignon (France), 214 p.
- Eavis B W 1972 Soil physical conditions affecting seedling root growth. III. Comparisons between root growth in poorly aerated soil and at different oxygen partial pressures. *Plant Soil* 37, 151-158.
- FAO 1998 Top-soil characterization for sustainable land management, FAO LW division, Rome.
- Hackett C 1968 A study of the root system of barley. I. Effects of nutrition on two varieties. *New Phytol.* 67, 287-299.
- Horton R, Ankeny M D and Allmaras R R 1994 Effects of Compaction on Soil Hydraulic Properties. *In Soil Compaction in Crop Production*. Eds. B D Soane and C van Ouwerkerk. pp 141-165. Elsevier Science B.V., Amsterdam.
- Le Bail M and Meynard J M 2003 Yield and protein concentration of spring malting barley: the effects of cropping systems in the Paris basin (France). *Agronomie* 23, 13-27.
- Manichon H and Gautronneau Y 1987 Guide méthodologique du profil cultural. GEAREA et CEREF, Paris. 71 p.
- Massé J, Crosson P and Tardieu F 1990 Effects of soil compaction on winter wheat root system and on yield elaboration. *In Proc. of First Congress of European Society of Agronomy*. Ed A Scaife. pp session 3 p32. ESA, Colmar.
- Pabin J, Lipiec J, Wlodek S, Biskupski A and Kaus A 1998 Critical bulk density and strength for pea seedling root growth as related to other soil factors. *Soil Till. Res.* 46, 203-208.
- Roger-Estrade J, Richard G, Boizard H, Boiffin J and Caneill J 2000 Modelling structural changes in tilled topsoil over time as a function of cropping systems. *Eur. J. Soil Sci.* 51, 455-474.
- SAS Institute 1987 SAS/STAT Guide for Personal Computer. 6th edition, SAS institute, Cary, NC.
- Stepniewski W, Glinski J and Ball B C 1994 Effects of compaction on soil aeration properties. *In Soil compaction in crop production*, Eds B D Soane and C van Ouwerkerk. pp 167-189. Elsevier, Amsterdam.
- Stirzaker R J, Passioura J B and Wilms Y 1996 Soil structure and plant growth: Impact of bulk density and biopores. *Plant Soil* 185, 151-162.
- Tardieu F 1984 Etude au champ de l'enracinement du maïs : influence de l'état structural sur la répartition des racines, conséquences sur l'alimentation hydrique. Thèse de Doctorat, Institut National Agronomique, Paris-Grignon (France), 232 p.
- Tardieu F and Manichon H 1986 Caractérisation en tant que capteur d'eau de l'enracinement du maïs en parcelle cultivée. II. - Une méthode d'étude de la répartition verticale et horizontale des racines. *Agronomie* 6, 415-425.
- Tardieu F and Manichon H 1987 Etat structural, enracinement et alimentation hydrique du maïs. II. - Croissance et disposition spatiale du système racinaire. *Agronomie* 7, 201-211.
- Taylor H M and Ratliff L F 1969 Root elongation rates of cotton and peanuts as a function of soil strength and soil water content. *Soil Sci.* 108, 113-119.
- Tricot F 1993 Mise en place des nodosités du pois protéagineux de printemps (*Pisum sativum* L.). Influence de la nutrition carbonée. Thèse de Doctorat, Université Paris-Sud, centre d'Orsay (France), 78 p.
- Tricot F, Crozat Y, Domenach A M, Gillet J P, Sebillotte M and Tardieu F 1990 Root and nodules distribution, N uptake and N₂ fixed in pea (*Pisum sativum* c.v. Solara) as affected by

- compaction of the ploughed layer. *In* First Congress of the European Society of Agronomy, Paris, 1990. Ed A Scaife. pp session 3 p 51.
- Tsegaye T and Mullins C E 1994 Effect of mechanical impedance on root growth and morphology of two varieties of pea (*Pisum sativum* L.). *New Physiol.* 126, 707-713.
- Unger P W and Kaspar T C 1994 Soil Compaction and Root Growth: A review. *Agron. J.* 86, 759-766.
- UNIP 2005 UNIP Statistiques Plantes riches en protéines. pp 93. UNIP, Paris.
- Venables W N and Ripley B D 2002 Time series analysis. *In* Modern Applied Statistics with S. pp 387-418. Springer, New-York.
- Whalley W R, Dumitru E and Dexter A R 1995 Biological effects of soil compaction. *Soil Till. Res.* 35, 53-68.

3. Agronomic performance of different pea cultivars for various sowing periods and contrasting soil structures

Aurélie Vocanson*, and Marie-Hélène Jeuffroy

Unité Mixte d'Agronomie Institut National de Recherche en Agronomie – Institut National Agronomique de Paris-Grignon, BP01, 78850 Thiverval-Grignon, France.

* Corresponding author. Tel: 33(0)130815906; fax: 33(0)130815425; e-mail: vocanson@grignon.inra.fr

Abstract

Yield variability of spring pea (*Pisum sativum* L.) cultivars is mainly due to soil compaction at sowing and abiotic stresses during the reproductive period. The use of winter pea cultivars should provide an opportunity to limit the effect of these factors on crop growth and development, and thus on yield. Cultivated winter peas are sown in mid-November in the north of France. But nowadays breeders are working on new winter cultivars, resistant to frost for a greater proportion of their life and more reactive to photoperiod, that can be sown in October and therefore in better soil conditions. Experiments factorially combining two contrasted soil structures (compacted and uncompacted), three sowing periods (spring, early and late autumn) and four cultivars (one spring, two winter and one winter highly, highly reactive to photoperiod) were carried out at two sites (Grignon and Mons) during two successive years. The aim of this study was to determine the effects of these three factors on crop development and growth. Compaction reduced seed yield by 18% in Grignon and 6% in Mons, but had no significant effect on crop development. November sowing increased seed yield by around 1 t ha⁻¹ at both sites, in comparison with spring sowings, because of a larger number of reproductive nodes, and thus seeds m⁻². For October sowing, the highly photoperiod-reactive cultivar was the one which best resisted winter conditions, but seed yield was not increased because the beginning of flowering was late. Cultivars presented contrasting characteristics in terms of mean seed dry weight, seeds m⁻² and number of reproductive nodes. But finally seed yield was similar for a given sowing period. A positive linear relationship was found between seed yield and seeds m⁻² respectively for each cultivar. The ability of the crop to convert crop growth rate to seed number was independent of the environment but decreased linearly with the seed dry weight of the cultivar.

Abbreviations: BF: beginning of flowering, DAS: number of days after sowing, FSSA: final stage of seed abortion, HI: harvest index, NRN: number of reproductive nodes per plant, SN: number of seeds per m², PM: physiological maturity, SDW: mean seed dry weight, SY: seed yield.

INTRODUCTION

In France, pea yield is highly variable from year to year in comparison with other crops: for instance, between 1993 and 2004, the coefficient of variation of mean yields in France was 6.6% for wheat, 7.5% for maize, 6.5% for sugar beet (ONIC, 2004) and 8.9% for pea (UNIP, 2005). During the same period, the mean annual increase of yield was + 0.58 t ha⁻¹ year⁻¹ for sugar beet, +0.06 t ha⁻¹ year⁻¹ for both wheat and maize (ONIC, 2004) whereas it was -0.04 t ha⁻¹ year⁻¹ for peas (UNIP, 2005). This is

one of the reasons for the great decrease in the area of peas in France from 1993 (737 500 ha) until 2004 (354 000 ha; UNIP, 2005), as the profitability is uncertain. Moreover, a large proportion of this area is sown with spring peas (90% in 2004; UNIP, 2005). The yields of spring peas vary greatly, depending mainly on the amount and distribution of the spring rainfall (Uzun and Açıkgöz, 1998). As shown by Lecoeur and Guillioni (1998) and Guillioni et al. (2003), peas are highly sensitive to water stress. Ney et al. (1994) also showed that the seed number was greatly reduced by water stress occurring during the period of seed formation, between the beginning of flowering and the final stage of seed abortion. Furthermore, Jeuffroy et al. (1990) reported that high temperatures during the same period were detrimental for yield. For spring cultivars, these two types of stress occur around one year in two in the Paris basin, where large areas are sown with peas.

Beginning of flowering is the visible start of the period of seed set and thus a key stage in yield elaboration. Winter peas sown in autumn generally flower 2 to 3 weeks earlier than spring-sown peas (Lejeune-Hénaut et al., 1999). Therefore autumn sowings should provide an opportunity to bring forward yield elaboration, thus escaping the main abiotic stresses. But the effects of a modifying the sowing season on pea crop growth are controversial. For instance, Ranalli et al. (1997) found no consistent advantage from autumn sowing on seed yield because of a large interaction between sowing date and year. In contrast, Uzun and Açıkgöz (1998) showed that autumn, rather than spring sowings, produced the highest dry biomass and seed yield at maturity, whatever the cultivar used. Yet these studies compared the effect of sowing season only on seed yield and its components but not on crop growth. Furthermore, the comparison was always carried out between spring and autumn sowings, but no study was carried out to determine the effect of various sowing dates in autumn on crop growth and development.

The available winter cultivars have to be sown very late in the autumn (not before mid-November in northern France) in order to maintain their frost resistance until the end of winter (Biarnès et al., 2004). New winter pea cultivars with a resistance to frost for a greater proportion of their life, which can thus be sown at the beginning of October, are now being selected (Etévé et al., 2004). These cultivars are called Hr because they have, in their genome, a single dominant gene, Hr, which is responsible for their qualitative higher response of flowering to photoperiod than most cultivated pea cultivars (Lejeune-Hénaut et al., 1999). Moreover, as shown by Mokashi et al. (1997) and Gosse et al. (1986) for many species, yield potential is often increased by a longer crop cycle. It is thus assumed that these new cultivars could lead to more stable and higher yields. However, their agronomic performance is not well known in field conditions.

As shown by Jeuffroy and Ney (1997), current knowledge of development, growth, plant structure determination and their consequences for yield formation is good for spring peas and can be used to analyse the performance of various genotypes. For instance, Dumoulin et al. (1994) used the general pattern of development proposed by Ney and Turc (1993) to study the variable behavior of 10 contrasting genotypes. Pea cultivars have various characteristics influencing seed yield: indeed, according to Roche (1998), the number of nodes with pods varied from 4.5 for the spring cultivar Solara to 12.4 for the winter cultivar Alex and the range of variation of mean seed dry weight was between 0.12 g seed⁻¹ for the winter pea cultivar Frisson and 0.27 g seed⁻¹ for the spring pea cultivar Solara. Moreover Poggio et al. (2005) reported genotypic differences in above-ground biomass, seed yield, pod and seed numbers. As pea cultivars present various degrees of sensitivity to the environment (weather conditions, photoperiod), it is assumed that sowing date and cultivar should influence yield potential.

In order to avoid water and heat stresses during reproductive stages, farmers try to sow spring peas very early at the end of winter, sometimes when the soil is too wet, frequently causing

compaction (Doré, 1992). Soil structure greatly affects pea yield, as reported by many authors (Croizat et al., 1992; Doré, 1992). For a spring sowing and a spring cultivar, the yield reduction due to soil compaction varied from 0% to 30%, the amount of reduction depending on the weather during the growing season (Croizat et al., 1992). Because of differences in environmental conditions between an autumn and spring sowing, compaction should not have the same effect on crop growth and development at different sowing dates, but no results are available on this point.

In this study, our objective was to determine the effects of two different soil structures (compacted and uncompacted), three sowing dates (early and late autumn, spring), and three types of cultivars (spring, winter and winter photo-reactive) on crop development, growth and yield in various soil and weather conditions.

MATERIALS AND METHODS

Sites and treatments

Experiments were carried out in field conditions during two growing seasons: 2002-2003 and 2003-2004 in Grignon (France, 48.9 °N, 1.9 °E) (experiments 1 and 2 respectively) and Estrées-Mons (France, 49.7 °N, 3.4 °E) (experiments 3 and 4). The soil at both sites was loamy silt (21% clay, 70% silt, 9% sand in Grignon and 21% clay, 74% silt, 5% sand in Estrées-Mons; FAO, 1998). Soil depths, defined as the depth of soil above the parent rock, were 1.1 m in exp.1 and 2 and more than 10 m in exp.3 and 4 (Boizard, pers. com.).

Four pea cultivars were sown in each location: a commercial spring one, Baccara (mean seed dry weight of 0.28 g seed⁻¹), two commercial winter ones, Cheyenne and Dove (respectively mean seed dry weight of 0.20 and 0.19 g seed⁻¹) and a winter photo-reactive one undergoing selection, Hr200 (mean seed dry weight of 0.13 g seed⁻¹). Each cultivar was sown at three sowing periods: October (D1), November (D2) and February-March (D3), the precise dates being given in Table I.11.

For D2 and D3, two different soil structures were created in the plowed layer: (a) a favorable structure, without compacted zones (UC) and (b) a compacted structure (C). The compaction was not carried out for the first sowing date D1, as it was assumed that the risk of compaction in field conditions at this date would always be less than for D2 and D3. Compaction of the plowed layer was obtained with intense traffic after a wet period over the whole plot after plowing and before tillage for seedbed preparation (Table 1). In Grignon (exp.1 and 2), only Baccara and Dove were sown in the compacted (C) soil; in Mons (exp.3 and 4), the four cultivars were sown in the compacted soil. In exp.4, Baccara was not sown at D1 because of a very low chance of survival during winter because of hard frost, and also a high risk of being a source of disease contamination for the other cultivars. Treatments on which measurements were done are summarized in Table I.11.

The sowing density was 90 seeds m⁻². Each plot was 1.75 m wide by 30 m long in Grignon and 1.25 m wide by 24 m long in Mons. The row spacing was 0.17 m in both sites. Each plot was replicated three times. Diseases, insects and weeds were controlled by pesticide applications.

At Grignon, the three sowing dates were randomized. For technical reason, the compaction treatment was placed in the middle of the three replicates. For the trials at Mons, lattice designs with three replicates were used for each sowing date x soil structure combination. Inside each replicate of each lattice, cultivars were randomly arranged.

Table I.11. Dates of plowing, compaction for the C treatments, secondary tillage and sowing according to the sowing date and the experiment.

Experiment	Plowing	Compaction*	Secondary tillage and sowing	Cultivars
<i>Exp.1</i>				
D1	4 Oct. 2002		4 Oct. 2002	Baccara ^{†‡} , Cheyenne [†] ,
D2	28 Oct. 2002	28 Oct. 2002	15 Nov. 2002	Dove ^{†‡} , Hr200
D3	28 Oct. 2002	28 Oct. 2002	27 Feb 2003	
<i>Exp.2</i>				
D1	13 Oct. 2003		13 Oct. 2003	Baccara [†] , Cheyenne,
D2	3 Nov. 2003	3 Nov. 2003	13 Nov. 2003	Dove [†] , Hr200
D3	3 Nov. 2003	3 Nov. 2003	5 Feb. 2004	
<i>Exp.3</i>				
D1	7 Oct. 2002		7 Oct. 2002	Baccara ^{†‡} , Cheyenne ^{†‡} ,
D2	30 Oct. 2002	30 Oct. 2002	30 Oct. 2002	Dove ^{†‡} , Hr200 ^{†‡}
D3	28 Feb. 2003	28 Feb. 2003	28 Feb. 2003	
<i>Exp.4</i>				
D1	30 Sept. 2003		30 Sept. 2003	Baccara [†] (not sown in
D2	20 Nov. 2003	20 Nov. 2003	20 Nov. 2003	D1), Cheyenne [†] , Dove [†] ,
D3	4 March 2004	4 March 2004	4 March 2004	Hr200 [†]

* only for D2 and D3

[†] cultivar not studied in D1 because of excessive risk of frost damages

[‡]cultivar in both compacted and uncompacted soil structures

Development

As soon as the first flowers on the first plants began opening on a plot, observations were made every two days in order to quantify the proportion of stems with at least an open flower. Thus the date of beginning of flowering (BF) was recorded when 50% of the stems in a plot reached this stage (Maurer et al., 1966).

The final stage of seed abortion (FSSA, Pigeaire et al., 1986) was calculated from the measurement of the final number of reproductive nodes. As the thermal time (basis 0°C) between BF and Beginning of Seed Filling (BSF) is 265 degree-days (dd) for spring cultivars and 300 dd for winter cultivars (Dumoulin et al., 1994), and the thermal time between reaching FSSA on two successive nodes is constant and equal at 30 dd (Ney and Turc, 1993), the thermal time in dd between BF and FSSA can be estimated using the following equation:

$$dd_{bf-fssa} = dd_{bf-bsf} + 30 \times (NRN - 1)$$

where NRN is the mean number of reproductive nodes per plant, dd_{bf-bsf} and $dd_{bf-fssa}$ are cumulative degree-days (basis 0°C) from BF to BSF and FSSA, respectively.

In exp.1 and 2, physiological maturity (PM) was determined in the field on each treatment when the plot turned yellow (Chaillet and Biarnès, 2004). It was then checked by measuring the water content of the seeds of the last node on 10 stems randomly taken in the sample. A seed water content of 0.55 g g⁻¹ fresh weight was the threshold used to confirm whether or not the stage had been reached (Le Deunff, 1988).

Plant growth

Above-ground biomass of peas was harvested once a month from emergence to maturity on one sample (0.85 m² in exp.1 and 2 and 1 m² in exp.3 and 4) per replicate. A sample was also taken precisely at BF.

For each sample, stems were cut at the green part of their base in order to harvest only aerial matter. Samples were then washed and packed to be dried for 48 hours at 80°C, and then weighed.

At maturity, only the dry vegetative biomass (pods without seeds, stems and leaves) and the mean number of reproductive nodes per plant (NRN) were measured on the samples. For determining NRN, 10 stems were randomly sampled. On each of them, the number of reproductive nodes bearing at least one pod with seeds per plant was counted. Then seeds were separated from the vegetative parts of the sample. The vegetative biomass was dried during 48 hours at 80°C and then weighed.

Seed yield (SY) and its components (seeds m²: SN and mean seed dry weight: SDW) were estimated on plots 10 m long in Grignon and 5 m long in Mons, on the whole width. After harvesting, seeds were cleaned and weighed fresh. Around 0.50 kg of seeds were sampled, weighed and then dried for 48 hours at 80°C and reweighed. Seed water content at harvest was calculated to estimate dry seed yield. On all these seed samples, the number of seeds was counted using a Contador (Pfeuffer) to determine SN and SDW.

As observed by several authors (Egli, 1993; Guillioni et al., 2003; Jeuffroy and Ney, 1997), SN is determined by crop growth rate between BF and FSSA, as described by the following equation:

$$SN = Ngunit \times (BM_{fssa} - BM_{bf}) / (dd_{fssa} - dd_{bf})$$

where BM_{fssa} and BM_{bf} are above-ground dry biomass at FSSA and BF respectively, and dd_{bf} and dd_{fssa} are cumulative degree-days (basis 0°C) from sowing until BF and FSSA respectively. Above-ground biomass of the sample, taken at the date closest to FSSA (never more than 8 days from the calculated date) was taken to estimate Ngunit. Ngunit represents the ability of the crop to convert crop biomass into seed number (seeds g⁻¹ degree-day⁻¹).

Weather conditions

Minimal and maximal daily aerial temperatures (T_{min} and T_{max}, °C), daily rainfall (R, mm), daily Penman evapo-transpiration (ETP, mm) and mean daily total radiation (MJ m⁻² day⁻¹) were measured by permanent weather stations situated at most 200 m from each experimental site.

The effect of high temperature on crop growth and development was characterized by the number of days with maximal daily aerial temperature above 25°C during the period BF-FSSA (Jeuffroy et al., 1990).

A daily water balance was calculated to determine the intensity of water stress:

$$WR(d) = WR(d-1) + R(d) + Irr(d) - ETP(d)$$

where WR(d) is the quantity of water available for crop requirements in the soil on day d and Irr(d) is the amount of water from irrigation applied on day d, and R(d) and ETP(d) were as defined previously. The balance was initiated on the 1 January assuming the soil was then at field capacity. The number of days with WR(j) = 0 was calculated during two different periods: BF-FSSA and FSSA-PM.

Characterization of soil structure

Soil structure variability was characterized using image analysis of soil profiles of the plowed layer. This method consisted firstly of characterizing soil structure using a morphological method proposed by Manichon and Gautronneau (1987). On the observation face of a soil pit (1.5 m wide in Grignon and 1.0 wide in Mons, 0.5 m deep at both sites), the severely compacted zones with no visible macro

porosity, called Δ in the present paper (Manichon and Gautronneau, 1987), were put into evidence in the plowed layer. Then the percentage of soil with a Δ structure was calculated for the plowed surface area using image analysis (software Optimas 6.0.) on photographs of the observation face taken with a digital camera (Sony, DSC-S75). Soil profiles of the plowed layer were characterized on 8 April 2003 for exp.1, 11 May 2004 for exp.2, 20 March 2003 for exp.3 and 21 April 2004 for exp.4 for the five treatments UC D1, UC and C D2, UC and C D3, always on the cultivar Dove.

Statistical analysis

Statistical analysis was performed using the GLM procedure (type III) of SAS (SAS, 1987) separately for Grignon and Mons to take into account the difference in experimental design between the two sites. As the experiment was conducted in different fields for the two successive years at each site, a block effect was introduced into the analysis of variance which resulted from the combined effects weather, the field, the year of the experiment, and the replicate. Finally, four factors were studied in the analysis (block, soil structure, sowing date and cultivar) and all the first-order interactions between the last three of these factors.

To compare the time-course of above-ground dry biomass accumulation (BM) in the 29 and 33 treatments in Grignon and Mons respectively, non-linear regressions were adjusted to the above-ground dry biomass values of the three replicates of each treatment using the NLIN procedure of SAS (SAS, 1987). The beta function of Yin et al. (2003) was the reference:

$$BM = BM_{\max} \times (1 + (t_e - t) / (t_e - t_m)) \times (t / t_e)^{t_e/(t_e-t_m)} \text{ with } 0 \leq t_m < t_e$$

where t is time, BM_{\max} is the maximum value of BM, t_e is time when BM_{\max} is reached, and t_m is the abscissa of the inflection point at which the growth rate reaches its maximum value. Time was expressed in number of days from sowing and dry weight in $t \text{ ha}^{-1}$. We especially chose to use this growth function because it is flexible in describing various asymmetrical sigmoid patterns by varying the value of t_m . It is useful in our case because autumn and spring sowings have an initial phase of varying length (Yin et al., 2003). The parameter BM_{\max} was the mean of the maximum biomass value of the three replicates, reached at maturity in most situations. The maximum growth rate, c_m (in $t \text{ ha}^{-1} \text{ day}^{-1}$), was given by:

$$c_m = BM_{\max} \times (2 t_e - t_m) / ((t_e \times (t_e - t_m)) \times (t_m / t_e)^{t_m/(t_e-t_m)})$$

As the parameters of this equation correspond to plant growth traits, we assumed that this function was suitable to characterize the effects of soil structure, sowing date and cultivars on crop growth.

RESULTS

Weather conditions

The winter was colder in exp.1 and 3 than in exp.2 and 4: the number of days with mean temperatures below 0°C was higher for D1 and D2 in exp.1 and 3 than in exp.2 and 4 (Table I.12). For the latest sowing (D3), in all the experiments, not more than one day was observed with temperature below 0°C from sowing in the whole cycle.

The period between 16 May and 31 May was dryer in exp.2 and 4 than in exp.1 and 3: cumulative rainfall during this period was 13 and 8 mm in exp.2 and 4 respectively, whereas it was 33 and 31 mm in exp.1 and 3 respectively. The driest period was observed for exp.2 during June with a cumulative rainfall of 13 mm in comparison with the other experiments (34, 51 and 32 mm in exp. 1, 3 and 4, respectively).

Mean daily total radiation increased slightly from 15 April to 31 May in exp.1 and 4. In exp.2 and 3, from 16 May to 31 May, it was about $8.6 \text{ MJ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ much higher than during the two other earlier periods.

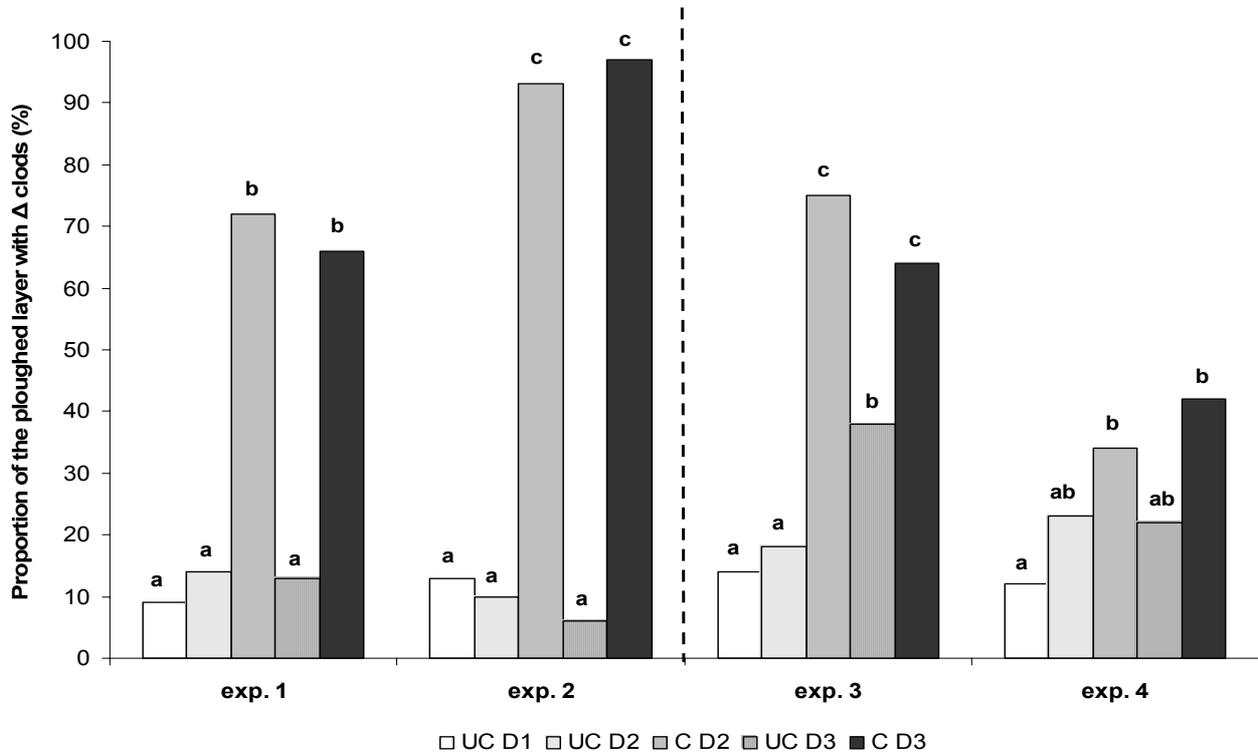
Table I.12. Main features of the weather over the 2 years at the 2 sites.

	Exp.1	Exp.2	Exp.3	Exp.4
<i>Number of days with mean temperatures below 0°C from sowing to the end of the cycle</i>				
D1	16	4	21	7
D2	16	4	21	7
D3	0	1	0	0
<i>Cumulative rainfall between</i>				
			<i>mm</i>	
16 April and 30 April	23	24	30	15
1 May and 15 May	19	15	22	21
16 May and 31 May	33	13	31	8
1 June and 15 June	15	4	36	20
16 June and 30 June	19	9	15	12
<i>Mean daily total radiation</i>				
			<i>MJ m⁻² day⁻¹</i>	
16 April and 30 April	16.6	16.8	16.7	18.4
1 May and 15 May	18.1	15.5	14.7	19.0
16 May and 31 May	19.0	24.3	24.6	20.0
1 June and 15 June	21.1	21.2	22.5	20.7
16 June and 30 June	23.1	21.9	22.5	18.7

Characterization of soil structure

In exp.1 and 2, for UC treatments, the proportion of the plowed layer with Δ zones (% Δ zones) varied from 6% (exp.2 D3) to 14% (exp.1 D2) (Figure I.9). For both D2 and D3, C and UC treatments had significantly different % Δ zones. For C situations, in exp.1, % Δ zones averaged 69%, whereas it was 95% in exp.2. In exp.3 and 4, for UC treatments, % Δ zones ranged from 12% (exp.4 D1) to 38% (exp.3 D3), which was higher than in exp.1 and 2. The contrast between C and UC treatments for a given sowing date was significant only in exp.1, 2 and 3. In exp.4, the difference in % Δ zones between C and UC situations was only 11% for D2 and 20% for D3.

Figure I.9. Proportion of the ploughed layer occupied by Δ clods in the four experiments according to soil structure (UC: uncompacted; C: compacted) and sowing date (D1: October; D2: November; D3: February-March). Treatments with the same letter above the bars are not significantly different ($P < 0.05$) within an experiment.

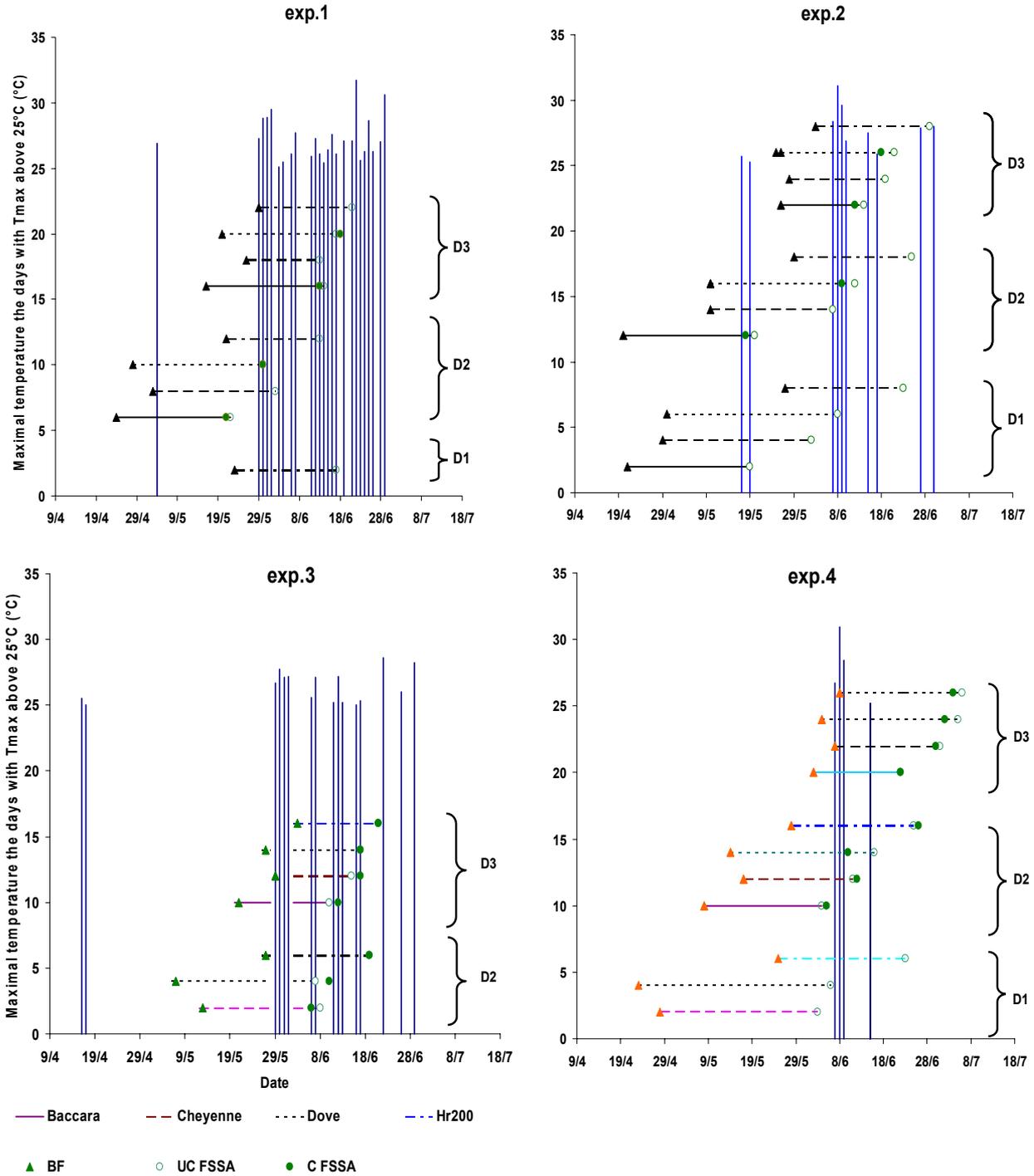


Beginning of flowering and seed set period

In all experiments, for the sowing dates D2 and D3, the dates of BF were exactly the same in C and UC treatments (Figure I.10). Compaction had little effect on FSSA: in 12 situations out of 23, FSSA in UC and C treatments did not differ by more than one day; in 3 situations out of 23, FSSA was later in C than in UC treatments by 2 or 3 days; in the 8 last situations, FSSA occurred 2 or 3 days earlier in C than in UC treatments, with the exception of one situation (exp.4 D2 Dove) for which the difference was 6 days.

For the photo-reactive winter cultivar Hr200, BF was late in the growing season and varied a little according to the sowing date (between 21 May and 9 June). In contrast, the date of BF of the three other cultivars highly varied according to the sowing date: between 21 April and 3 June for Baccara, between 19 April and 8 June for Cheyenne and between 24 April and 8 June for Dove. For the three commercial cultivars, the earlier the sowing date, the earlier the BF: BF was observed between 21 April and 30 April for D1, 20 April and 17 May for D2 and 21 May and 7 June for D3.

Figure I.10. Periods of seed formation (between beginning of flowering: BF and final seed set abortion: FSSA) for each treatment, according to soil structure (UC: uncompacted; C: compacted), sowing date (D1: October, D2: November; D3: February-March) and cultivar in the four experiments. Days with maximal temperature higher than 25°C are shown as an indication of heat stress.



The three commercial cultivars differed in terms of earliness to flower: for a given sowing date, the spring cultivar Baccara flowered between 1 (exp.2 D3) and 12 (exp.2 D2) days before the winter cultivar Dove; Dove was observed to flower between 0 (exp.2 D2) and 6 days (exp.1 D2) before Cheyenne. Finally, the winter cultivars (Cheyenne and Dove) sown in autumn (D2) flowered earlier than the spring cultivar (Baccara) sown in spring (D3): on average for the 4 experiments, Dove sown on D2 flowered on 7 May (standard deviation of 7.3 days), Cheyenne sown on D2 on 11 May (standard deviation of 6.1 days) and Baccara sown on D3 on 24 May (standard deviation of 7.9 days).

The date of BF affected the time of the seed setting period, and thus the occurrence of heat and water stresses. Weather conditions differed as regards the number and frequency of days with maximal temperatures above 25°C (Figure I.10). In exp.1, 25 days had maximal temperatures above 25°C; in exp.2, it was 10 days; 16 days in exp.3 and only 4 days in exp.4. For the three commercial cultivars, the number of days with maximal temperatures above 25°C during the seed set period depended on sowing date: between zero (exp.4) and 4 days (exp.2) for D1, 2 (exp.2) and 6 days (exp.2) for D2, 4 (exp.4) and 15 days (exp.1) for D3. For Hr200, because of a late BF, whatever the sowing date, seed setting occurred during a risky period for heat stress (between 4 and 15 days).

Table I.13. Number of days with no water available in soil for crop requirements during the periods BF-FSSA and FSSA-PM according to the treatment.

Treatment		Exp.1		Exp.2		Exp.3		Exp.4	
		BF-FSSA	FSSA-PM	BF-FSSA	FSSA-PM	BF-FSSA	FSSA-PM	BF-FSSA	FSSA-PM
D1									
UC	Baccara	*	*	0	17	*	*	†	†
	Cheyenne	*	*	0	15	*	*	0	25
	Dove	*	*	3	14	*	*	5	23
	Hr200	18	9	18	19	*	*	7	16
D2									
UC	Baccara	0	16	0	16	*	*	3	25
	Cheyenne	6	15	2	17	8	10	8	20
	Dove	3	15	7	13	7	10	12	16
	Hr200	16	11	18	14	12	11	16	16
C	Baccara	0	16	0	12	*	*	4	25
	Cheyenne	†	†	†	†	6	12	8	20
	Dove	2	15	3	9	10	7	10	18
	Hr200	†	†	†	†	12	11	17	16
D3									
UC	Baccara	17	6	8	15	9	10	14	11
	Cheyenne	16	12	14	11	12	10	18	5
	Dove	18	11	16	10	12	11	24	6
	Hr200	21	7	23	13	11	17	22	6
C	Baccara	16	7	6	10	10	9	14	11
	Cheyenne	†	†	†	†	12	10	17	6
	Dove	17	12	15	9	12	11	21	9
	Hr200	†	†	†	†	11	17	20	8

* Treatments not studied because of too large frost damages

† Treatment not sown

During the period BF-FSSA, for the three commercial cultivars, the number of days with no water available for crop growth was lower for D1 (between 0 and 5 days, Table I.13) than for D2 (between 0 and 12 days) and for D3 (between 9 and 24 days). In contrast, little effect of sowing date on the duration of water stress was observed during the period FSSA-PM: the number of days with no water available varied between 14 and 25 days for D1, 10 and 25 days for D2 and 6 and 17 days for D3. For Hr200, whatever the period and the sowing date, water stress was higher than for the three commercial cultivars: the number of days with no soil water available varied from 7 to 23 days during BF-FSSA and from 7 to 19 days during FSSA-PM. Little difference between the three commercial cultivars was observed in terms of water stress: during the period BF-FSSA, in 16 situations out of 18, water stress was lower for Baccara than Cheyenne and lower still than for Dove (maximal difference of 10 days); for the period FSSA-PM, in only 3 situations out of 18, water stress was lower for Baccara than Cheyenne and lower still than for Dove (maximal difference of 9 days).

Biomass accumulation

On the 62 studied situations, the coefficient of determination of the fit (r^2) to the observed values varied from 0.87 to 0.99 (data not shown). In 55 situations, above-ground dry biomass accumulation usually followed a 2-phase pattern (Figure I.11 A): a period of slow growth, with an accelerating growth rate (phase 1), followed by a phase with a nearly linear growth (phase 2). Phase 1 included most of the vegetative period and phase 2 began close to BF. In these situations, t_e was similar to PM. In the last 7 situations, a third phase (phase 3) was observed that consisted on a period with decreasing growth (Figure I.11 B). This period did not last more than 5 days.

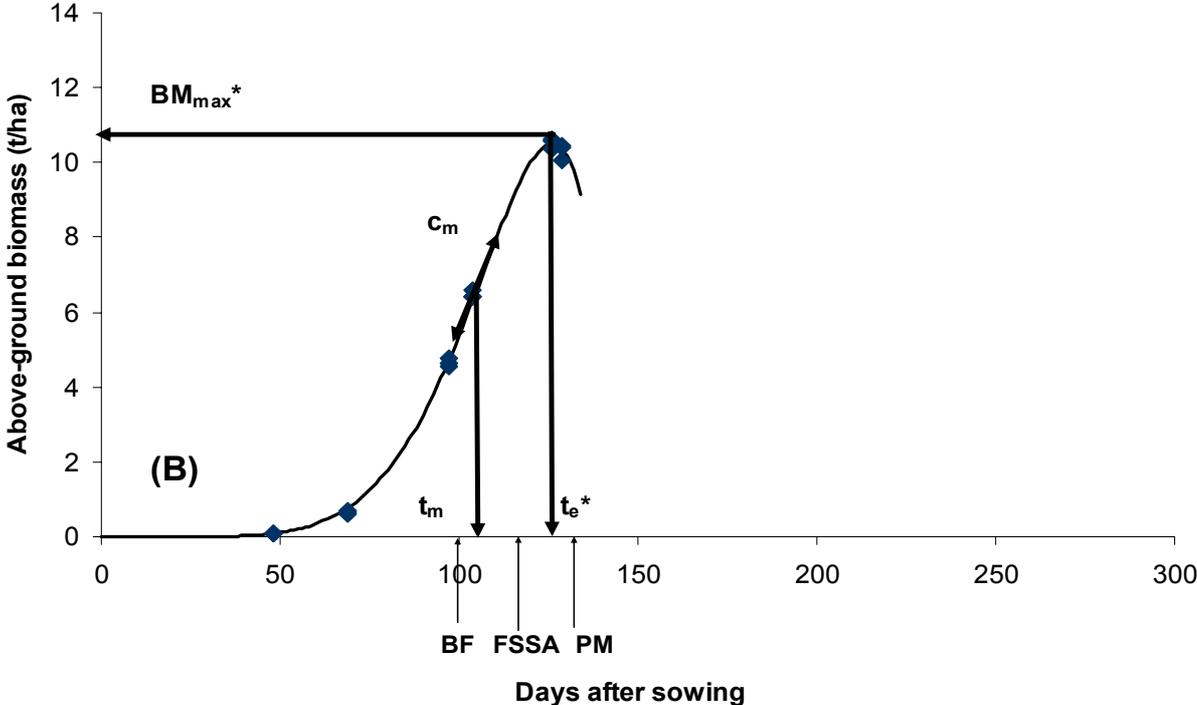
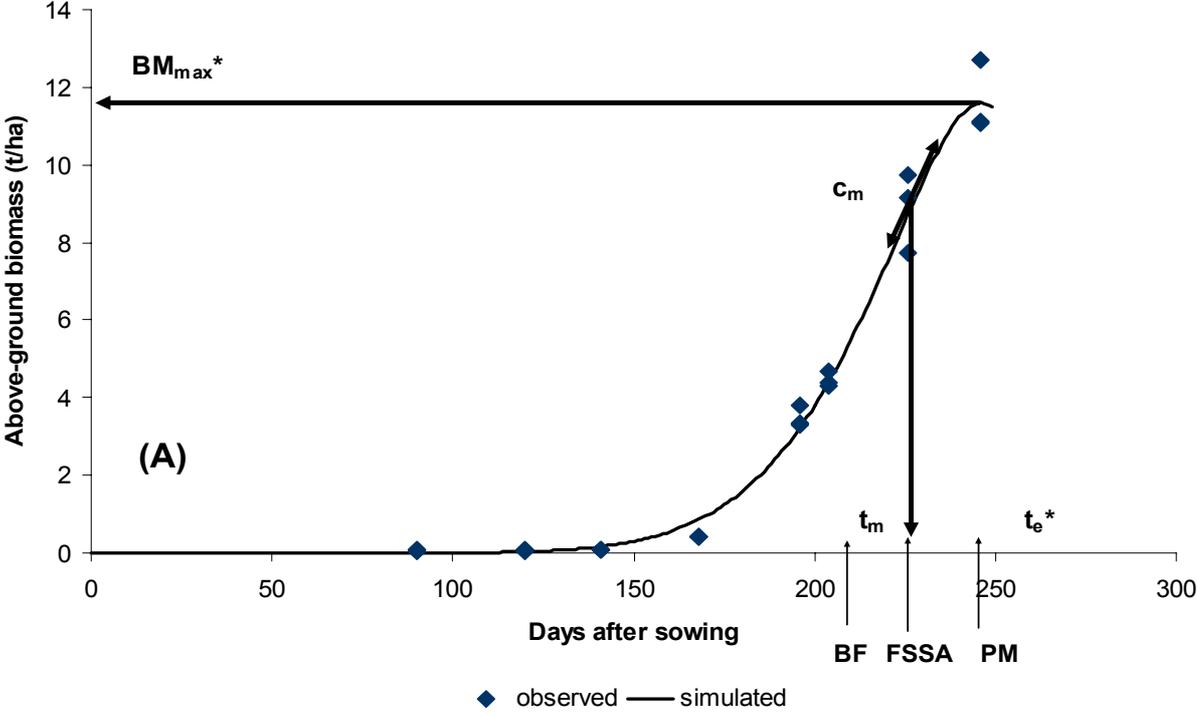
The eight Anova models accounted for 66-99% of the variance of the four studied parameters (Table I.14). At both sites, the best-fitting models were for the prediction of t_e and t_m .

At both sites, the parameters t_m and t_e differed significantly between years ($P < 0.05$). In contrast, at both sites, BM_{max} did not depend on the year ($P > 0.05$). Only in Grignon, was c_m significantly higher in exp.1 than in exp.2 ($P < 0.05$).

The effect of compaction on BM_{max} and c_m depended on the site: only in Grignon compaction significantly reduced BM_{max} (by 18%, $P < 0.05$) and c_m (by 20%, $P < 0.05$). At both sites, compaction had no significant effect on the two other parameters ($P > 0.05$).

The growth cycle was 92 and 114 days longer in D2 than in D3 in Grignon and Mons respectively. The time between t_m and t_e was from 26 to 29 days for D2 and from 21 to 25 days for D3: autumn sowing lengthened this period slightly in comparison with a spring sowing. Finally, BM_{max} was significantly higher in D2 than in D3 ($P < 0.05$). The parameter c_m was similar for both sowing dates in Grignon ($P > 0.05$), whereas it was significantly higher in D3 than in D2 in Mons ($P < 0.05$). For the three sowing dates, for Hr200, the lowest BM_{max} was observed for D1 and the highest for D3. For D1, the cycle was 20 and 128 days longer than D2 and D3 respectively. The time between t_e and t_m was similar in D1 and D2 (32 days), but higher than in D3 (20 days). The sowing date also affected c_m : the highest value was observed in D3 ($0.23 \text{ t ha}^{-1} \text{ day}^{-1}$) in comparison with D1 and D2 (around $0.15 \text{ t ha}^{-1} \text{ day}^{-1}$). For the four cultivars, in half of the situations, t_m occurred before FSSA for D1 and D2, whereas it always occurred before FSSA in D3. t_m occurred between 16 days before FSSA to 9 days after FSSA for D1 and D2 (on average two days before FSSA), whereas it was between 0 to 16 days before FSSA for D3 (on average 8 days before FSSA).

Figure I.11. Above-ground dry biomass (BM, t ha⁻¹) (A: exp. 3 UC D2 Cheyenne, r²=0.98; B: exp.4 UC D3 Dove, r²=0.99): observed values per replicate and fitted curve of the beta growth function. BF, FSSA and PM correspond to the stages beginning of flowering, final stage of seed abortion and physiological maturity respectively. BM_{max} is the maximum value of BM, t_e is time when BM_{max} is reached, t_m is the abscissa of the inflection point at which the growth rate reaches its maximum value, and c_m is the growth rate at t_m. * indicates the parameters that were experimentally determined.



The effect of the cultivar on the four parameters varied according to the site. Indeed, in Grignon, the four cultivars had similar BM_{max} , whereas in Mons, Cheyenne and Baccara had a significantly higher BM_{max} than the two other cultivars ($P<0.05$). The longest crop cycle was observed for Hr200 at all sites ($P<0.05$), no significant difference existing among the three other cultivars. In Grignon, t_m was the highest for Hr200, whereas no significant difference was observed in Mons. The four cultivars presented significantly different c_m ($P<0.05$): the highest values were observed for Cheyenne and Dove, whereas the lowest ones were observed for Baccara and Hr200. Only the interaction between sowing date and cultivar was significant ($P<0.05$) in Grignon for BM_{max} and c_m .

Table I.14. Effects of experiment in Grignon (exp.1 in 2002-2003 and exp.2 in 2003-2004) and in Mons (exp.3 in 2002-2003 and exp.4 in 2003-2004), soil structure (UC: uncompacted; C: compacted), sowing date (D1: October; D2: November; D3: February-Marc) and cultivar (B: Baccara; C: Cheyenne; D: Dove; H: Hr200) on the four parameters of the beta growth function: BM_{max} , t_e , t_m and c_m .

		Grignon: exp.1 and 2				Mons: exp.3 and 4				
		BM_{max}	t_m	t_e	c_m	BM_{max}	t_m	t_e	c_m	
		t ha ⁻¹	DAS	DAS	t ha ⁻¹ day ⁻¹	t ha ⁻¹	DAS	DAS	t ha ⁻¹ day ⁻¹	
Experiment	2002-2003	11.2a	154b	176b	0.24a	10.6a	156a	181a	0.20a	
	2003-2004	10.2a	172a	198a	0.19b	11.4a	147b	174b	0.20a	
Soil structure (SS)	UC	11.7a	155a	180a	0.25a	11.3a	162a	187a	0.20a	
	C	9.6b	152a	174a	0.20b	10.7a	159a	187a	0.21a	
Sowing date (SD) † x	D1	-	-	-	-	X	X	X	X	
	Baccara, Cheyenne and Dove	D2	13.0a	199a	225a	0.24a	11.5a	215a	244a	0.18b
	Hr200	D3	10.4b	112b	133b	0.25a	10.5b	105b	130b	0.21a
Sowing date (SD) † x	D1	8.8c	238a	270a	0.13b					
	Hr200	D2	10.4b	218b	250b	0.16b				
		D3	12.0a	122c	142c	0.23a				
Cultivar (Cult) †	Baccara	11.4a	154b	182b	0.22bc	10.4ab	101a	127b	0.20c	
	Cheyenne	11.5a	156b	177b	0.24b	11.3a	105a	127b	0.24a	
	Dove	12.0a	157b	178b	0.27a	10.2b	105a	127b	0.22b	
	Hr200	11.2a	170a	196a	0.19c	9.8b	106a	135a	0.18d	
Interaction	SSxSD									
	SSxCult	*			*					
	SDxCult									
r^2		0.80	0.98	0.99	0.66	0.71	0.99	0.99	0.77	

* significant at $P<0.05$

- only the cultivar Hr200 was studied in the two experiments for the three sowing dates. To compare the effect of the three sowing date on the four parameters, means were calculated separately for Hr200 and the three other cultivars.

X means no average because of absence of treatment in exp.3

† numbers followed by the same letter are not significantly different at $P<0.05$

Seed yield and its components

Experiment, soil structure, sowing date, cultivar and interactions between the three last factors accounted for 78% of the variance of SY in Grignon and 60% in Mons (Table I.15).

Table I.15. Seed Yield (SY), seeds m⁻² (SN), mean Seed Dry Weight (SDW), number of reproductive nodes per plant (NRN) and Harvest Index (HI) for each experiment, soil structure, sowing date and cultivar in Grignon (2002-2003: exp.1 and 2003-2004: exp.2) and in Mons (2002-2003: exp.3 and 2003-2004: exp.4).

		Grignon: exp.1 and 2					Mons: exp.3 and 4				
		SY	SN	SDW	NRN	HI	SY	SN	SDW	NRN	HI
		t ha ⁻¹	number m ⁻²	g seed ⁻¹	Number plant ⁻¹		t ha ⁻¹	number m ⁻²	g seed ⁻¹	Number plant ⁻¹	
Experiment	2002-2003	6.1a	3650a	0.177a	4.8b	0.54a	6.8a	3759a	0.187a	5.9a	0.64a
	2003-2004	4.9b	2934b	0.175a	5.4a	0.48b	6.5a	3684a	0.182a	5.4b	0.57b
Soil											
Structure (SS)	UC	6.1a	3386a	0.191a	5.5a	0.52a	6.8a	3793a	0.185a	5.6a	0.60a
	C	5.3b	3050b	0.188a	4.6b	0.55a	6.4b	3695a	0.180a	5.7a	0.60a
Sowing											
date (SD) †	D1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	D2	6.6a	3743a	0.183a	5.6a	0.51a	7.2a	4019a	0.182a	6.3a	0.63a
x Baccara, Cheyenne and Dove	D3	5.5b	3008b	0.186a	4.7b	0.53a	6.2b	3577b	0.179a	5.0b	0.59a
	D1	3.7c	3152b	0.116b	7.3a	0.42b					
Sowing date (SD) †	D2	4.7a	3779a	0.124a	6.0b	0.45ab					
	D3	4.1b	3270b	0.124a	5.7b	0.49a					
Cultivar (Cult) †	Baccara	6.2a	2588c	0.238a	4.1c	0.54a	6.3a	2377c	0.266a	4.1c	0.61a
		(0.12)					(0.11)				
	Cheyenne	5.8a	3353b	0.172b	4.4c	0.50a	6.4a	3431b	0.187b	3.7c	0.57b
		(0.20)					(0.10)				
	Dove	6.1a	4185a	0.145c	7.0a	0.51a	6.3a	3900a	0.161c	6.8a	0.62a
		(0.22)					(0.06)				
	Hr200	4.4b	3524b	0.124d	5.9b	0.40b	6.2a	4045a	0.154d	5.2b	0.63a
		(0.20)					(0.04)				
Interaction	SSxSD	*	*			*			*		
	SSxCult	*									
	SDxCult	*	*			*	*	*		*	*
R ²		0.78	0.87	0.98	0.81	0.82	0.60	0.84	0.95	0.79	0.77

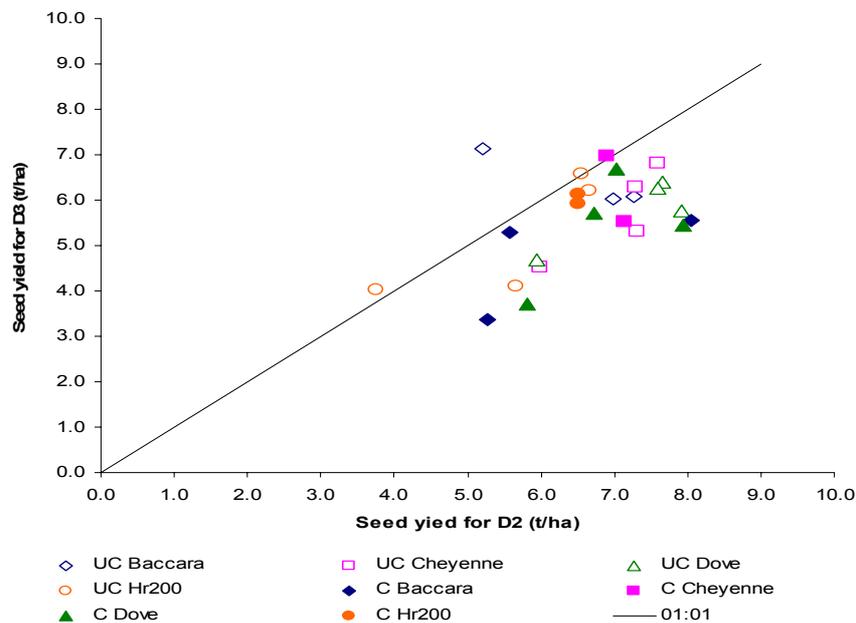
* significant at P<0.05

† numbers followed by the same letter are not significantly different at P<0.05

Values between brackets are coefficient of variation

SY differed significantly between experiments only in Grignon ($P < 0.05$). Compaction significantly reduced SY ($P < 0.05$, Table I.15) but more so in Grignon (by 13%) than in Mons (by 6%). Only in Grignon did compaction not had the same effect for a given sowing date and cultivar ($P < 0.05$). In three situations out of 4 in D3, compaction significantly reduced SY, whereas this happened in only one out of 4 in D2. In three situations out of 4 for Baccara, compaction significantly reduced SY, but in only one out of 4 for Dove. D2 treatments had a significantly higher mean yield (1.1 t ha^{-1} in Grignon and 1.0 t ha^{-1} in Mons) than D3 ($P < 0.05$) but this depended on the cultivar, as shown by the significantly interaction between these two factors ($P < 0.05$, Figure I.12). In one situation for Baccara (exp.2), the yield was lower for D2 than D3, whereas for Hr200, yield was similar for both sowing dates in D2 and D3 in three situations (exp.2, 3 and 4). For Hr200, in Grignon, the highest yield was observed for D2 (4.7 t ha^{-1}) and the lowest for D1 (3.7 t ha^{-1}). The three commercial cultivars had similar SY in both sites with an average value of 6.0 t ha^{-1} in Grignon and 6.3 t ha^{-1} in Mons. In contrast, the level of Hr200's yield depended on the site: in Grignon, it was significantly lower than the yield of the three commercial cultivars ($P < 0.05$) which was not observed in Mons ($P > 0.05$). The coefficient of variation differed among cultivars and sites: in Grignon, the most stable yield was observed for Baccara (coefficient of variation of 12%, Table I.15), whereas, in Mons, it was for Hr200 and Dove (coefficients of variation of 4% and 6%, respectively).

Figure I.12. Comparison between seed yield (t ha^{-1}) for D2 (November sowing) and for D3 (February-March sowing) according to soil structure (UC: uncompacted; C: compacted) and cultivar in the four experiments.



SN was well explained by experiment, soil structure, sowing date, cultivar and interactions between the three last factors as they accounted for 87% of the variance of SN in Grignon and 84% in Mons (Table I.15). As observed for SY, SN was significantly affected by the experiment and compaction only in Grignon ($P < 0.05$). As observed for SY, SN was significantly higher in D2 than in D3 in Grignon (by 20%, $P < 0.05$) and in Mons (by 11%, $P < 0.05$) but the difference depended on the cultivar. For Hr200, the highest SN was observed in D2 ($3779 \text{ seeds m}^{-2}$), although D1 and D3 had comparable values ($3152 \text{ seeds m}^{-2}$ and $3270 \text{ seeds m}^{-2}$, respectively). Cultivar had a significant effect

on SN ($P < 0.05$). The three commercial cultivars were ranked in the same order at both sites for SN: Baccara < Cheyenne < Dove. In contrast, the SN of Hr200 was comparable to that of Cheyenne in Grignon, whereas it was closer to that of Dove in Mons.

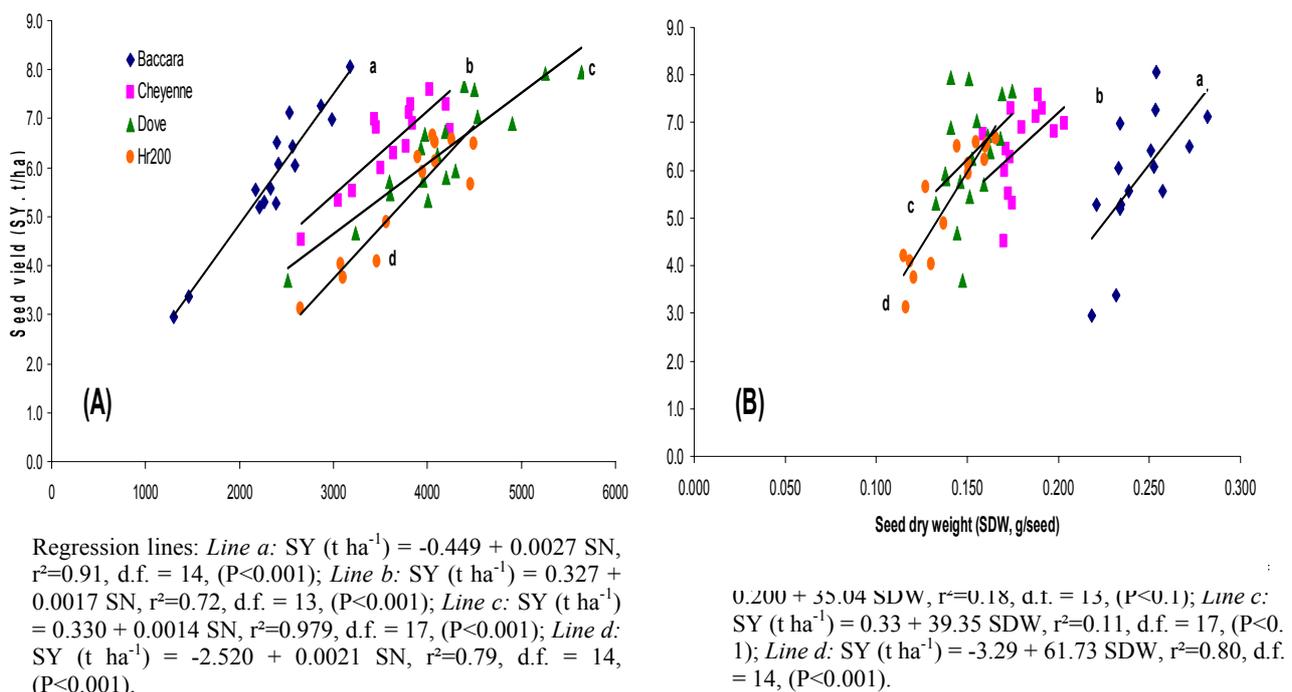
SDW was the variable best explained by the factors studied, as the coefficients of determination were 0.98 in Grignon and 0.95 in Mons (Table I.15). SDW was the most stable seed yield component as it did not depend on the experiment, soil structure and sowing date at either site ($P > 0.05$). In contrast, cultivar differed significantly in terms of SDW ($P < 0.05$): at both sites, SDW were ranked: Hr200 < Dove < Cheyenne < Baccara.

The factors studied and their interactions explained NRN well, as the coefficients of determination ranged between 0.81 in Grignon and 0.79 in Mons (Table I.15). Experiment had a significant effect on NRN at both sites ($P < 0.05$). In contrast, NRN was significantly lower in compacted than in uncompacted treatments only in Grignon ($P < 0.05$). D2 significantly increased NRN by 0.9 in Grignon and 1.3 in Mons ($P < 0.05$). For Hr200, NRN was significantly higher in D1 than in D2 and D3. At both sites, cultivar had a significant effect on NRN ($P < 0.05$). The same ranking of the four cultivars was observed in Grignon and in Mons, from the lowest to the highest: Baccara = Cheyenne (average of 4.2 in Grignon and 3.9 in Mons) < Hr200 (5.9 in Grignon and 5.2 in Mons) < Cheyenne (7.0 in Grignon and 6.8 in Mons).

Experiment, soil structure, sowing date, cultivar and interactions between the three last factors explained 82% of the variance of HI in Grignon and 77% in Mons (Table I.15). HI was significantly different among experiments ($P < 0.05$) but not between soil structures and sowing dates ($P > 0.05$). For Hr200 in Grignon, HI was increased with later sowing dates. Finally, Baccara and Dove had the highest HI at both sites, the ranking of the two other cultivars depending on the site.

For each cultivar, SY was positively correlated to SN, the coefficient of determination ranging from 0.72 to 0.98 (Figure I.13 A). The highest slope was observed for Baccara and the lowest one for Dove. In contrast, no significant relationship was obtained between SY and SDW, with the exception of Hr200 ($r^2 = 0.80$, Figure I.13 B).

Figure I.13. Relationship between seed yield (SY, $t\ ha^{-1}$) and (A) seeds m^{-2} (SN) and (B) mean seed dry weight (SDW, $g\ seed^{-1}$).



Plant growth rate between BF and FSSA and SN

At both sites, the only factor that had a significant effect on Ngunit was cultivar ($P < 0.05$, Table I.16). In Mons, the interaction between sowing date and cultivar was significant ($P < 0.05$). Neither the soil structure, the year, nor the sowing date had a significant effect ($P < 0.05$). At each site, for each cultivar, the average Ngunit was calculated. The highest values of the coefficient of variation of Ngunit were observed for Hr200 at both sites (30% in Grignon and 39% in Mons) and for Baccara in Mons (35%). For the other situations, the coefficient of variation of Ngunit varied between 10% and 22%.

Table I.16. Analysis of variance of the effects of year, soil structure, sowing date and cultivar on Ngunit (seeds g^{-1} degree-day $^{-1}$) according to the site.

		Grignon	Mons
Year	2002-2003	2762a	2633a
	2003-2004	2487a	3066a
Soil structure (SS)	UC	2538a	3692a
	C	2372a	3435a
Sowing date (SD) †	D1	X	X
	D2	3255a	2995a
	D3	2785a	2717a
Cultivar (Cult) †	Baccara	2000c	2244c
	Cheyenne	2665b	2591bc
	Dove	2961b	2873b
	Hr200	5427a	3720a
Interaction	SS*SD		*
	SS*Cult		
	SD*Cult		
r^2		0.91	0.80

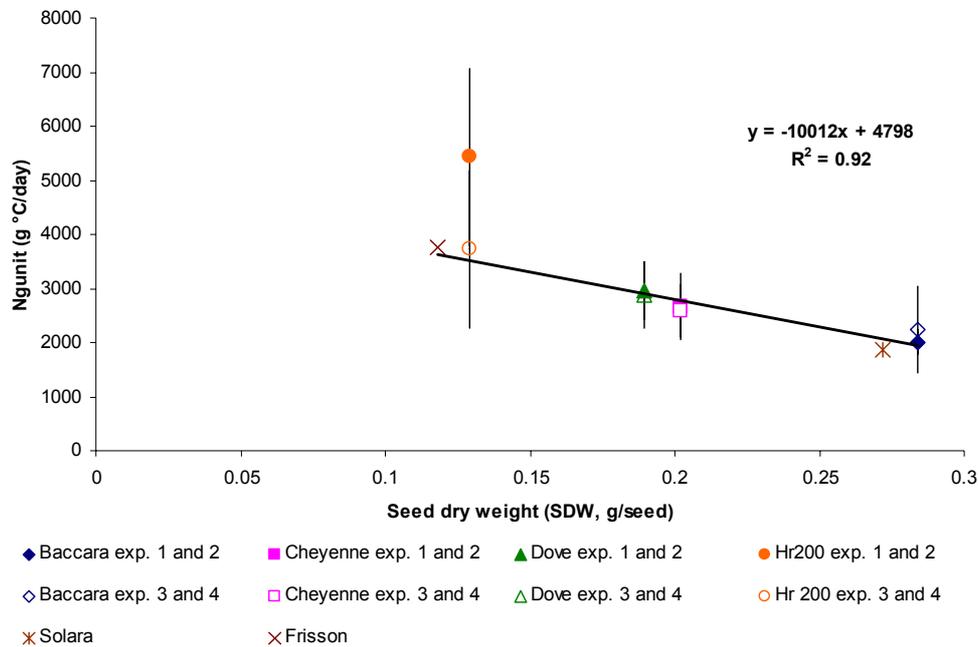
* significant at $P < 0.05$

X means no average because of absence of treatment in exp.1 and 3.

† numbers followed by the same letter are not significantly different at $P < 0.05$

With the exception of Hr200 (its high standard deviation in Grignon is assumed to be linked to the fact that the genotype is not really fixed), a negative linear regression was found between the mean genotypic value of SDW and Ngunit (Figure I.14). The mean genotypic value of SDW is the mean value for Baccara, Cheyenne and Dove (ARVALIS, 2003), Roche (1998) for Solara and Frisson and the mean value observed in the 4 experiments for Hr200.

Figure I.14. Relationship between mean cultivar seed dry weight (SDW, g seed⁻¹) and Ngunit (seeds g⁻¹ degree-day⁻¹). The regression line was calculated using the data of the five cultivars: Baccara, Cheyenne, Dove, Frisson and Solara. Vertical bars are the standard deviation of Ngunit.



DISCUSSION

Effect of sowing date

For commercial cultivars, November sowing increased seed yield (SY) at both sites in comparison with February-March sowing, in both years. Our results are in agreement with those of Peksen et al. (1977), Ridge and Pye (1985) and Uzun and Açıkgöz (1998) who compared the effects of autumn and spring sowing on plant traits and production.

Firstly, the higher SY for a November than a February-March sowing was explained purely by the higher seeds m⁻² (SN) and number of reproductive nodes (NRN), since mean seed dry weight (SDW) was not affected by the sowing date. Secondly, seed setting period, between BF and FFSA, occurred from the end of April to the end of May for a November sowing and from the end of May to the end of June for a February-March sowing (with the exception of Hr200). For a November sowing, weather conditions are more favorable and the favorable period for crop growth is longer (Saharia, 1986). SN was increased by 20% in Grignon and 11% in Mons for a November sowing in comparison with a February-March sowing, as observed by Ranalli et al. (1997). Short periods of heat stress occurred in three of the four experiments close to BF for a November sowing. This should have no effect on seed setting, as observed by (Jeuffroy et al., 1990) or at least should have less effect than a longer stress during the seed setting period, as is the case for a February-March sowing. In the case of short periods of water and heat stresses, NRN should have been reduced, but not SN, because of the compensatory effect of number of seeds per pod in the lower reproductive nodes, which were not affected by these heat stresses during their seed setting period (Guilioni, 1997; Guilioni et al., 2003). For D3, heat and water stresses were severe and must have induced seed abortion (Jeuffroy et al., 1990). The higher NRN for November sowings in comparison with February-March sowing dates also

increased the length of seed setting period as observed by Acosta-Gallegos et al. (1996) for common bean. Other seed yield components should have differed between a November and a February-March sowing. Indeed, Ranalli et al. (1997) observed that pod numbers per plant and seed numbers per pod were 12.3% and 4.5% respectively higher for an autumn than a spring sowing respectively.

Second, SN depends on crop growth rate between BF and FSSA and on the ability of the crop to convert crop biomass in seed number (Ngunit). In agreement with the results of Guilioni et al. (2003), for other varying growth factors, Ngunit did not vary between years, soil structures and sowing dates. The maximum growth rate, c_m , was close to FSSA for a November sowing whereas it was on average 8 days before FSSA for a February-March sowing. Crop growth rate between BF and FSSA was thus close to potential for a November sowing whereas it should have been affected by heat and water stresses for a February-March sowing. Lecoecur and Sinclair (1996) showed that dry matter production is affected by water stress. Guilioni et al. (2003) reported that the efficiency of the crop to convert solar radiation into dry matter was decreased by temperatures above 25°C, limiting the quantity of available assimilates for seed set. These two stresses, longer during seed set for a February-March than a November sowing, should have resulted in a lower crop growth rate, limiting SN.

SDW was similar at all sowing dates. Our results confirm that filling seeds have priority for assimilates in comparison with developing seeds in the event of heat and water stresses (Munier-Jolain et al., 1998). For November sowing, more assimilates were produced from vegetative parts than for February-March sowing. Indeed, above-ground dry biomass at maturity was 23% higher in Grignon and 11% in Mons for November than February-March sowing (Peksen et al., 1977). This is probably due to cumulative incident solar radiation (Monteith, 1977). November and February-March sowings had a growing period of around 5 and 3 months respectively. As observed by Gesch et al. (2002) for Cuphea and Uzun and Açıkgöz (1998) for pea, the longer vegetative period should have favored branch formation and hence above-ground dry biomass accumulation.

HI varied from 0.33 to 0.72, which is within the range of values observed by Lecoecur and Sinclair (2001). Uzun and Açıkgöz (1998) observed a mean HI of 0.48 for autumn sowings and 0.44 for spring sowings, whereas in our study, the HI ranking between sowing dates depended on the site.

For the photo-reactive cultivar Hr200, BF was concentrated between the end of May and the beginning of June for all sowing dates. For the three sowing dates, water and heat stresses occurred during seed filling. SN was higher for November than February-March sowing, in spite of a similar NRN and SDW. The higher leaf area production, due to a longer vegetative cycle for the November than the February-March sowing, should have made more assimilates available for seed production. As observed by Ranalli et al. (1997), seed number per nodes was thus increased. In contrast, crops sown in October had a higher NRN but a lower SDW than those from the two other sowing dates. In general, plants favour seed filling than seed number elaboration (Munier-Jolain et al., 1998). The lower SDW was due to problem that occurred after FSSA, when seed number was fixed and seeds were filling. An earlier cessation of seed filling occurs when carbon or nitrogen remobilisation to the seeds is no longer possible (Carrouée and Le Souder, 1992). The lowest BM_{max} was observed for the October sowing. In 2002-2003 the winter was very cold and most of aerial biomass was damaged. The crop regrew from axial buds. The potential carbon and nitrogen assimilation and remobilization were thus lower than for the two other sowing dates.

In addition to increasing the risk of frost damage, sowing in early autumn should increase the risk of diseases Heenan (1994) and weed competition (Rasmussen, 2004) that were not quantified in the present study.

Effect of cultivar

Cultivars differ in their resistance to frost (Lejeune-Hénaut et al., 1999; Ranalli et al., 1997). In Grignon, exp.1 D1, because of a mild autumn and a very severe winter, the stage of frost resistance was over for the three commercial cultivars when the frost occurred, and only Hr200 survived. In exp.3, because of severe weather, all the cultivars sown in D1 died. In exp.3 D2, only Baccara succumbed to the winter conditions.

The maximum crop growth rate (c_m) depended on the cultivars, probably because of differences in the rate of leaf appearance (Poggio et al., 2005; Roche, 1998) and Radiation Use Efficiency (Lecoeur and Ney, 2003) between cultivars. For the three commercial cultivars, c_m occurred between 16 days before to 3 days after FSSA. FSSA was earlier for Baccara than for Cheyenne and Dove, due to an earlier BF and lower NRN.

Few differences were observed between these three cultivars for the date of beginning of flowering (BF), perhaps due to genotypic differences in photoperiod and the temperature response of development as observed by many authors for legumes (Bourion et al., 2002 for pea; Acosta-Gallegos et al., 1996 for common bean). In spite of differences in SN, SDW and NRN, at all sowing dates the three commercial cultivars had similar yields, which were around 6.1 t ha⁻¹ in Grignon and 6.3 t ha⁻¹ in Mons. The date of PM did not differ more than 6 days for these three cultivars, maybe because of genotypic differences in the rate of progression of the beginning and end of seed filling along nodes (Atta et al., 2004). In contrast, the late BF for Hr200 (end of May-beginning of June at all sowing dates) should explain the lower yield in comparison with the three other cultivars: yield elaboration was more exposed to water and heat stresses. Nowadays, breeders are working to delay floral initiation until the main winter freezing periods and to keep a relatively early date of BF to escape high temperature and late water stress (Lejeune-Hénaut et al., 1999).

Poggio et al. (2005) observed two parallel relationships between SY and SN, corresponding to large and small seed weights. Linear relationships between these two variables were also found but slopes and intercepts varied among cultivars. The differences in the values of the slopes and the intercepts found by Poggio et al. (2005) may be due to the differences in the range of SDW, which was 0.067 to 0.150 g seed⁻¹ for Poggio et al. (2005) against 0.130 to 0.28 g seed⁻¹ in our study. For the three commercial cultivars, the higher the SDW, the lower the NRN and the steeper the slope of the regression line. Cultivars with a low SDW should present a SY very sensitive to SN. As reported by many authors (Doré, 1992; Guilioni et al., 2003; Lecoeur, 1994), SN depends on environmental conditions. Dumoulin et al. (1994) showed that for a spring sowing, the shorter the duration of seed set period, the higher was the yield, in order to limit the risk of abiotic stress during yield elaboration. Yield variation depends on soil and weather conditions: indeed, Baccara presented the most stable yield in Grignon, whereas it was Dove and Hr200 did so in Mons. Baccara flowered between one and twelve days before Dove. In Grignon, heat stress was more severe (in frequency and intensity) than in Mons, which should have penalized particularly those cultivars with a longer and later BF-FSSA period, such as Dove. Water and heat stresses occurred simultaneously, both affecting crop growth. In Mons the soil is deeper than in Grignon, so water stress should have been less intensive than in Grignon, limiting yield instability whatever the cultivar. Cultivars with more indeterminate growth, such as Dove, would face abiotic stress with compensatory effects between nodes (Guilioni et al., 2003). More studies are needed to confirm this hypothesis, as yield instability from year to year is a major problem for pea. The recombinant inbred line Hr200 behaved similarly to Cheyenne.

As observed for winter wheat (Leterme et al., 1994), no relationship was found between SDW and SY, with the exception of the Hr200. The later period of seed filling due to a later BF should explain the greater sensitivity of SY to SDW.

Guilioni et al. (2003) showed that water and heat stresses had no effect on the ability of the crop to convert crop growth rate into seed number (Ngunit). It may help to explain why soil structure and sowing date, that have indirect effect on water availability, did not affect Ngunit. Guilioni et al. (2003) did not find any effect of the cultivar on this parameter, in contradiction with our observations. This may be due to the narrower range of SDW (from 0.20 g seed⁻¹ to 0.30 g seed⁻¹) in Guilioni et al.'s (2003) experiment. Moreover, for commercial pea cultivars, a negative relationship existed between SDW and Ngunit, what is relevant for selecting cultivars with higher yield potential. Hr200 is a recombinant inbred line, not yet fixed, which probably explains its considerable variability.

Effect of soil structure

SY was significantly reduced by compaction by 13% in Grignon and 6% in Mons, as reported by Crozat et al. (1991). The small effect of compaction on SY and the absence of an effect on above-ground biomass accumulation in Mons were probably due to the small (non-significant) difference between uncompacted and compacted soil structures. In exp. 3, the excessive soil water at sowing in spring increased the percentage of Δ zones in the uncompacted treatment up to 38% (compared with 64% in the compacted one). In exp. 4, insufficient soil water at the time of compaction resulted in low percentages of Δ zones in the plowed layer for the compacted treatments at all sowing dates (only 34% and 42% of Δ zones in the compacted treatments of the autumn and the spring sowings respectively). However, as reported by Lindemann et al. (1982) for soybean, although seed yield is not significantly affected by compaction, a trend is discernable.

Compaction did not affect mean seed dry weight (SDW), in agreement with the observations of Dawkins et al. (1984).

In Grignon, SN was significantly reduced by compaction, maybe because of fewer NRN in compacted than in uncompacted treatments. Indeed, SN and NRN can be affected by nitrogen nutrition level (Jeuffroy and Ney, 1997). Doré (1992) observed a linear inverse correlation between crop nitrogen uptake from BF to PM and the proportion of Δ zones in the plowed layer. The fraction of N fixed is also reduced by compaction (Crozat et al., 1992). Thus, the reduction of SN by compaction could be due to a restriction in N accumulation. Compaction reduces soil exploration by roots (Bengough and Mullins, 1990; Tsegaye and Mullins, 1994) and hence the ability of the crop to extract soil water (Tardieu and Manichon, 1987). Water stress should thus have been greater in compacted than uncompacted situations, with a bigger effect on NRN.

Ngunit was not affected by compaction. In contrast, in Grignon, compaction reduced maximum growth rate (c_m) by 20%, with no effect on when this was reached (t_m). This should have affected crop growth rate during seed set. c_m occurred close to FSSA, period during which the risk of water stress was high, especially in compacted situations as suggested by Tardieu and Manichon (1987). Finally BM_{max} was reduced by 16% in compacted situation in comparison with uncompacted ones, in agreement with the results of Lindemann et al. (1982) for soybean. Compaction had no effect on harvest index (HI), possibly as a consequence of regulation of carbon partitioning between vegetative and reproductive parts of the crop.

Acknowledgements

We would like to thank J. Troizier and his team for assistance with trials at the experimental Unit at Grignon, and J.J. Stempniak and his team for the trial in Mons. We also thank G. Grandeau, V. Tanneau, B. Le Fouillen, A. Chauveau, and M. Bazot for their help with the measurements. We specially thank J.F. Fourbet and D. Makowski for their statistical assistance. Financial support was obtained from UNIP, GAE-Recherche and INRA-(Action Impact). We would like to thank Alan Scaife for English language revision.

References

- Acosta-Gallegos, J.A., P. Vargas-Vazquez, and J.W. White. 1996. Effect of sowing date on the growth and seed yield of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) in highland environments. *Field Crop Res.* 49:1-10.
- ARVALIS. 2003. Pois protéagineux de printemps et d'hiver: guide de culture. (In French) ARVALIS, Paris.
- ONIC. 2004. Publications [Online]. Available at www.onic.fr/. ONIC, Paris.
- Atta, S., S. Maltese, and R. Cousin. 2004. Protein content and dry weight of seeds from various pea genotypes. *Agronomie (Paris)* 24:257-266.
- Bengough, A.G., and C.E. Mullins. 1990. Mechanical impedance to root growth: a review of experimental techniques and root growth responses. *J. Soil Sci.* 41:341-358.
- Biarnès, V., I. Chaillet, and B. Carrouée. 2004. Frost damages observed on winter grain legumes in France in 2003. p. 295. *In* AEP-INRA (ed.), 5th European Conference on grain legumes Proc. Conf. Dijon, France. 7-11 June 2004. AEP, Paris, France.
- Bourion, V., M. Duparque, I. Lejeune-Hénaut, and M.-J. N.G. 2002. Criteria for selecting productive and stable pea cultivars. *Euphytica* 126:391-399.
- Carrouée, B., and C. Le Souder. 1992. Préviation du risque de fuite en azote derrière une culture de pois. (In French). *Perspect. Agric.* 183:75-81.
- Chaillet, I., and V. Biarnès. 2004. Technical proceedings: determination of development stages. (In French). p. 58-63, *In* V. Biarnès et al. (ed) *Agrophysiologie du pois protéagineux*. INRA-Arvalis, Paris, France.
- Crozat, Y., J.P. Gillet, and F. Tricot. 1991. Effects of the soil compaction on root distribution N, P, K uptakes and growth of pea crop. *In* Proc. of the 3rd International Symposium of the Society of root research. 2-6 Sept. 1991, Vienna, Austria.
- Crozat, Y., J.P. Gillet, and A.M. Domenach. 1992. Nodulation, N₂ fixation and incorporation of combined N from soil into pea crop: effects of soil compaction and water regime, p. 141-142, *In* A. Scaife (ed), *First European Conference on Grain Legumes Proc.* Angers, France. 5-7 Dec 1990. ESA, Colmar, France.
- Dawkins, T.C.K., M. McGowan, P.D. Hebblethwaite, and J.C. Brereton. 1984. The effect of thorough subsoil loosening on the yield of peas (1980) and a subsequent crop of winter wheat (1981). *Res. and Dev in Agric.* 1:53-57.
- Doré, T. 1992. Analyse, par voie d'enquête, de la variabilité des rendements et des effets précédents du pois protéagineux de printemps (*Pisum sativum* L.). (In French). INA, Paris-Grignon, France.
- Dumoulin, V., B. Ney, and G. Eteve. 1994. Variability of seed and plant development in pea. *Crop Sci.* 34:992-998.

- Egli, D.B. 1993. Cutivar maturity and potential yield of soybean. *Field Crops Res.* 32:147-158.
- Etévé, G., M. Boilleau, J.J. Stempniak, R. Devaux, and I. Lejeune. 2004. Breeding winter peas: Toward a new background. p. 128. *In* AEP-INRA (ed.), 5th European Conference on grain legumes Proc. Conf. Dijon, France. 7-11 June 2004. AEP, Paris, France.
- FAO 1998 Top-soil characterization for sustainable land management, FAO LW division, Rome.
- Gesch, R.W., F. Forcella, N. Barbour, B. Phillips, and W.B. Voorhees. 2002. Yield and growth response of *Cuphea* to sowing date. *Crop Sci.* 42:1959-1965.
- Gosse, G., C. Varlet-Grancher, R. Bonhomme, M. Chartier, J.M. Allirand, and G. Lemaire. 1986. Maximum dry matter production and solar radiation intercepted by a canopy. (In French, with English abstract). *Agronomie (Paris)* 6:47-56.
- Guilioni, L. 1997. Effet des hautes températures sur la croissance végétative et le développement des organes reproducteurs chez le pois (*Pisum sativum* L., cv. 'Messire'). Conséquences sur la production de biomasse et le nombre de graines. (In French). ENSA de Montpellier, Montpellier, France.
- Guilioni, L., J. Wéry, and J. Lecoœur. 2003. High temperature and water deficit may reduce seed number in field pea purely by decreasing plant growth rate. *Functional Plant Biology* 30:1151-1164.
- Jeuffroy, M.H., and B. Ney. 1997. Crop physiology and productivity. *Field Crop Res.* 53:3-16.
- Jeuffroy, M.H., C. Duthion, J.M. Meynard, and A. Pigeaire. 1990. Effect of a short period of high day temperatures during flowering on the seed number per pod of pea (*Pisum sativum* L.). (In French with English abstract). *Agronomie (Paris)* 10:139-145.
- Le Deunff, Y. 1988. Accumulation de la matière sèche chez le pois et sa modélisation. *Plant Physiol. Biochem.* 26:377-382.
- Lecoœur, J. 1994. Réponses phénologiques et morphologiques du pois (*Pisum sativum* L.) à la contrainte hydrique. Conséquences sur le nombre de phytomères reproducteurs., ENSA de Montpellier, Montpellier.
- Lecoœur, J., and T.R. Sinclair. 1996. Field pea (*Pisum sativum* L.) transpiration and leaf growth in response to soil water deficits. *Crop Sci.* 36:331-335.
- Lecoœur, J., and L. Guilioni. 1998. Rate of leaf production in response to soil water deficits in field pea. *Field Crops Res.* 57:319-328.
- Lecoœur, J., and T.R. Sinclair. 2001. Harvest index increase during seed growth of field pea. *Eur. J. Agron.* 19:91-105.
- Lecoœur, J., and B. Ney. 2003. Change with time in potential-use efficiency in field pea. *Eur. J. Agron.* 19:91-105.
- Lejeune-Hénaut, I., V. Bourion, G. Etévé, E. Cunot, K. Delhayé, and D. C. 1999. Floral initiation in fields-grown forage peas is delayed to a greater extent by short photoperiods, than in other types of European varieties. *Euphytica* 109:201-211.
- Leterme, P., H. Manichon, and J. Roger-Estrade. 1994. Analyse intégrée des rendements du blé tendre et de leurs causes de variation dans un réseau de parcelles d'agriculteurs du Thymerais. (In French with English abstract). *Agronomie (Paris)* 14:341-361.
- Lindemann, W.C., G.E. Ham, and G.W. Randall. 1982. Soil compaction effects on soybean nodulation, N₂(C₂H₄) fixation and seed yield. *Agron. J.* 74:307-311.
- Manichon, H., and Y. Gautronneau. 1987. Guide méthodologique du profil cultural. (In French). GEARA CEREF ed. GEAREA et CEREF, Paris, France.
- Maurer, A.R., D.E. Jaffray, and H.F. Fletcher. 1966. Response of peas to environment. III. Assessment of the morphological development of peas. *Can. J. Plant Sci.* 46:285-290.

- Mokashi, D.D., J.D. Jadhav, M.R. Shewale, C.B. Gaikwas, and J.D. Path. 1997. Performance of crops and cropping systems under different dates of sowing. *Indian J. Agron.* 42:220-223.
- Monteith, J.L. 1977. Climate and efficiency of crop production in Britain. *Phil. Trans. R. Soc. Lond.* 281:277-294.
- Munier-Jolain, N.G., Munier-Jolain N.M., R. Roche, B. Ney, and C. Duthion. 1998. Seed growth rate in grain legumes. I. Seed growth is not affected by assimilates availability on seed growth rate. *J. Exp. Bot.* 49:1963-1969.
- Ney, B., and O. Turc. 1993. Heat-unit-based description of the reproductive development of pea. *Crop Sci.* 33:510-514.
- Ney, B., C. Duthion, and O. Turc. 1994. Phenological response of pea to water stress during reproductive development. *Crop Sci.* 34:141-146.
- Peksen, E., H. Bozoglu, A. Peksen, and A. Gülümser. 1977. Determination of the effects of different row spacings on yield and some other properties of pea (*Pisum sativum* L.) cultivars sown in spring and autumn. *Acta Hort.* 579:313-318.
- Pigeaire, A., C. Duthion, and O. Turc. 1986. Characterisation of final stage of seed abortion in indeterminate soybean, white lupin and pea. (In French with English abstract). *Agronomie (Paris)* 6:371-378.
- Poggio, S.L., E.H. Satorre, S. Dethiou, and G.M. Gonzalo. 2005. Pod and seed numbers as a function of photothermal quotient during the seed set period of field pea (*Pisum sativum* L.) crops. *Eur. J. Agron.* 22:55-69.
- Ranalli, P., M. Di Candilo, and V. Faeti. 1997. Performance in northern Italy of pea breeding lines for dry seed yield. *Adv. Hort. Sci.* 11:85-90.
- Rasmussen, I.A. 2004. The effect of sowing date, stale seedbed, row width and mechanical weed control on weeds and yields of organic winter wheat. *Eur. Soc. Weed Res.* 44:12-20.
- Ridge, P.E., and D.L. Pye. 1985. The effects of temperature and frost at flowering on the yield of peas grown in a Mediterranean environment. *Field Crops Res.* 12:339-346.
- Roche, R. 1998. Modélisation de la variabilité des profils de graines associée à la séquentialité du développement chez différents génotypes de pois protéagineux de printemps. (In French). INA, Paris-Grignon, France.
- Roche, R., M.H. Jeuffroy, and B. Ney. 1998. A model to simulate the final number of reproductive nodes in pea (*Pisum sativum* L.). *Ann. Bot.* 81:545-555.
- Saharia, P. 1986. Relative performance of pea varieties to sowing dates. *Indian J. Agron.* 31:377-379.
- SAS Institute 1987 SAS/STAT Guide for Personal Computer. 6th edition, SAS institute, Cary, NC.
- Tardieu, F., and H. Manichon. 1987. Etat structural, enracinement et alimentation hydrique du maïs. II. - Croissance et disposition spatiale du système racinaire. (In French with English abstract). *Agronomie (Paris)* 7:201-211.
- Tsegaye, T., and C.E. Mullins. 1994. Effect of mechanical impedance on root growth and morphology of two varieties of pea (*Pisum sativum* L.). *New Phytology* 126:707-713.
- UNIP. 2005. Statistiques Plantes riches en protéines. (In French). UNIP, Paris, France.
- Uzun, A., and E. Açıkgöz. 1998. Effect of sowing season and seeding rate on the morphological traits and yields in pea cultivars of differing leaf types. *J. Agron. & Crop Sci.* 181:215-222.
- Yin, X., J. Goudriaan, E.A. Lantinga, J. Vos, and H.J. Spiertz. 2003. A flexible sigmoid function of determinate growth. *Ann. Bot.* 91:361-371.

4. Do various sowing conditions change seed quality and environmental value of pea?

Aurélié Vocanson*, and Marie-Hélène Jeuffroy

Unité Mixte d'Agronomie Institut National de Recherche en Agronomie – Institut National Agronomique de Paris-Grignon, BP01, 78850 Thiverval-Grignon, France.

* Corresponding author. Tel: 33(0)130815906; fax: 33(0)130815425; e-mail: vocanson@grignon.inra.fr

Abstract

The ability of pea (*Pisum sativum* L.) to fix nitrogen (N) is a major advantage in sustainable farming systems. But spring pea cultivars, which are generally preferred in France, vary widely in yield, due either to compaction at sowing or to abiotic stress during the reproductive period, both of which limiting the seed number and weight. Winter pea cultivars, sown in November, have a more stable yield, but they are not sufficiently frost resistance to be cultivated in some regions, particularly in the north of France. Nowadays breeders are working on new winter cultivars, resistant to frost for a longer period during their life and more reactive to photoperiod, that can be sown in October and therefore in better soil conditions than in spring or late autumn, when the soil is often too wet during sowing. Furthermore, peas, like other grain legumes, are often blamed for damaging the environment. The development of new cultivars should take into account this possible effect. We thus determined the effect of soil structure, sowing date and cultivar on N in the crop and in the soil and on water consumption, by combining two contrasting soil structures, three sowing periods and four cultivars at two sites (Grignon and Mons) during two successive years. November sowing increased seed protein content (SPC) by 8% and 5% in Grignon and Mons, respectively, in comparison with spring sowing. This may be the consequence of a better adequacy between crop water requirement and its availability in the soil. SPC also significantly varied among cultivars. N in the straw at maturity was also increased, possibly influencing the N balance of the following crop. N derived from symbiotic nitrogen fixation (%Ndfa) depended more on experimental conditions than on sowing date. The effect of compaction on crop N uptake and partitioning depended on experimental conditions. Water consumption appeared to be lower in compacted than in uncompacted soil when water was limited.

Abbreviations: %Ndfa: nitrogen derived from symbiotic nitrogen fixation, NHI: nitrogen harvest index, Nveg : nitrogen in vegetative organs, SPC: seed protein content

INTRODUCTION

In agricultural conditions, most of the N accumulated in pea (*Pisum sativum* L.) plants originates from N fixation (between 51% and 66% according to Jensen, 1986; 70% according to Crozat et al., 1991; 83% according to Voisin et al., 2002), which is a major advantage in sustainable farming systems (Jensen and Hauggaard-Nielsen, 2003; Munier-Jolain and Carrouée, 2003). In France, more than 90% of pea area was sown with spring cultivars in 2004 (UNIP, 2005). Yet spring sowings had three main drawbacks from an environmental point of view. First, the high soil moisture content at sowing often results in a high risk of compaction for spring pea cultivars (Vocanson et al., 2004), and this is frequently observed in practice (Doré, 1992). Farmers try to sow as soon as the end of winter in order to increase the length of the crop growing period and to avoid abiotic stress during the reproductive stage. As reported by Dexter (1997), soil structure is an important feature of soil quality influencing crop performance. Secondly, the risk N leaching can be high because of the absence of crop during the winter preceding the sowing and a shallow root system that limits the use of inorganic N in the soil profile (Hauggaard-Nielsen et al., 2003). Changes in soil structure by compaction directly affect soil physical factors and indirectly chemical and biological factors [Boone, 1986 #7], which could modify the N balance. Third, peas are very sensitive to water stress during the reproductive stages (Guilioni et al., 2003; Ney et al., 1994) and irrigation is thus sometimes used to ensure a satisfactory yield.

One solution to limit these problems would be the development of winter pea cultivars that can be sown in autumn. During this period, on average, the earlier the sowing date, the lower the soil water content and thus the lower the risk of compaction (Vocanson et al., 2004). However the available winter cultivars have too short a frost resistance phase, and thus have to be sown in mid-November, a risky period in terms of soil water content and compaction, because of high rainfall. Nowadays, breeders are working on new winter pea cultivars, highly sensitive to photoperiod, and thus with flowering initiation occurring at a fixed photoperiod, with frost resistance for a greater proportion of their life (Lejeune-Hénaut et al., 1999). For these reasons, they can be sown in October, when soil water content is lower and thus soil structure is better. While most of the previous experiments were carried out with spring cultivars sown in spring, few studies have dealt with the effects of autumn sowing dates and cultivars on crop N accumulation, soil N balance and water budget.

Because of a longer crop cycle with autumn sowing, crop N uptake at harvest should be higher than for spring sowing. Uzun and Açıkgöz (1998) showed that, on average, peas sown in autumn had a higher seed protein content than spring-sown ones, which is beneficial as pea seeds are used for animal feeding. However, it is not known how the amount of N left by the vegetative above-ground biomass varies, and this influences the risk of N leaching after the pea crop and the N used by the following crop in comparison with spring sowing (Jensen, 1994; Jensen, 1996).

For spring peas sown in spring, Voisin et al. (2002) showed that 235 cumulative degree-days from emergence were required before the beginning of N₂ fixation. Moreover, no nodulation occurred at a soil temperature below 5°C (Tricot, 1993). Minchin and Pate (1975) showed that excessive soil water, which is more likely in winter than in spring, particularly with a compacted soil structure [Boone, 1986 #7] and poor soil aeration reduce nodulation and N₂ fixation. Jensen (1986) and Voisin et al. (2002) observed that N₂ fixation is reduced if soil mineral N concentration is high, which is often the case in autumn because of rapid mineralisation of organic N. N₂ fixation would thus be lower in autumn for an autumn sowing than a spring sowing and in compacted soils.

The consequences for water use of bringing forward the sowing date are probably not beneficial as the earlier the sowing date, the higher water consumption (Mokashi et al., 1997). Peksen

et al. (2002) and Vocanson et al. (2005) showed that autumn sowings led to higher yield than spring sowings because peas sown in autumn have a longer growing period and therefore use soil water in winter and spring. It would thus be of interest to quantify this increase in water consumption, which could help to reveal the soil types (according to their water content) on which winter peas should be profitable.

In this study, our objective was to determine the effects of two contrasted soil structures (compacted and uncompacted), three contrasted times (spring, early and late autumn), and three types of cultivar (spring, winter and new winter) on water use, nitrogen balance, nitrogen uptake and fixation, and grain protein content.

MATERIALS AND METHODS

Sites and treatments

Field experiments were carried out on loamy-silt soil (FAO, 1998) in 2002-2003 and 2003-2004 in Grignon (France, 48.9 °N, 1.9 °E; 21% clay, 70% silt, 9% sand; experiments 1 and 2, respectively) and Estrées-Mons (France, 49.7 °N, 3.4 °E; 21% clay, 74% silt, 5% sand; experiments 3 and 4, respectively).

Four pea cultivars (a spring commercial one: Baccara; two winter commercial ones: Cheyenne and Dove; a winter one undergoing selection: Hr200) were sown for three sowing times (October: D1; November: D2 and February-March: D3).

Two different soil structures were created in the plowed layer for D2 and D3 (Table I.17): (a) a favourable structure, without compacted zones, denoted UC and, (b) a compacted structure, denoted C. Compaction of the plowed layer was achieved by intense traffic after a wet period over the whole plot after plowing and before tillage for seedbed preparation. We assumed that the risk of compaction was lower for D1 than for D2 and D3 and thus did not study this case.

Table I.17. Dates of plowing for all the treatments, compaction for the C treatments, secondary tillage and sowing according to the sowing date and the experiment.

Experiment	Plowing	Compaction*	Secondary tillage and sowing	Cultivars
<i>Exp.1</i>				
D1**	4 Oct. 2002		4 Oct. 2002	Baccara ^{†‡} , Cheyenne [†] ,
D2**	28 Oct. 2002	28 Oct. 2002	15 Nov. 2002	Dove ^{†‡} , Hr200
D3**	28 Oct. 2002	28 Oct. 2002	27 Feb 2003	
<i>Exp.2</i>				
D1**	13 Oct. 2003		13 Oct. 2003	Baccara [‡] , Cheyenne,
D2**	3 Nov. 2003	3 Nov. 2003	13 Nov. 2003	Dove [‡] , Hr200
D3**	3 Nov. 2003	3 Nov. 2003	5 Feb. 2004	
<i>Exp.3</i>				
D1	7 Oct. 2002		7 Oct. 2002	Baccara ^{†‡} , Cheyenne ^{†‡} ,
D2	30 Oct. 2003	30 Oct. 2003	30 Oct. 2003	Dove ^{†‡} , Hr200 ^{†‡}
D3	28 Feb. 2003	28 Feb. 2003	28 Feb. 2003	
<i>Exp.4</i>				
D1	30 Sept. 2003		30 Sept. 2003	Baccara [†] (no sown in
D2	20 Nov. 2003	20 Nov. 2003	20 Nov. 2003	D1), Cheyenne [‡] , Dove [‡] ,
D3	4 Mar. 2004	4 Mar. 2004	4 Mar. 2004	Hr200 [‡]

* only for D2 and D3

** experiments with barley sown

† cultivar not studied in D1 because of excessive frost damages

‡cultivar in both compacted and uncompacted soil structures

The sowing density was 90 seeds m⁻². The plot was 1.75 m wide by 30 m long in Grignon and 1.52 m wide by 6 m long in Mons. The between-row spacing was 0.17 m at both sites. In experiments 1 and 2, barley (cultivar Vanessa) was sown in exactly the same conditions and on the same sowing dates and soils as peas, in order to quantify the amount of N₂ fixed, using the ¹⁵N natural abundance method (Amarger et al., 1979).

For the trials at Grignon, the three sowing dates were randomized. For technical reason, compaction was carried out in the middle of the replicate. There were three replicates. For the trials at Mons, lattice designs with three replicates were used for each sowing date x soil structure combination. Within each replicate of each lattice, cultivars were randomly arranged.

Weather conditions

Minimal and maximal aerial temperatures and rainfall were measured daily at permanent weather stations situated within 200 m of each experiment site (Table I.18).

Table I.18. Experimental conditions according to the experiment (X: treatment not present).

	Exp.1	Exp.2	Exp.3	Exp.4				
Climatic conditions								
<i>Cumulative rainfall (mm)</i>								
Oct-Dec	213	150	285	89				
Jan-Mar	79	103	102	98				
Apr-Jun	111	78	136	83				
<i>Number of days with mean temperatures below 0°C from sowing to the end of the cycle</i>								
D1	16	4	21	7				
D2	16	4	21	7				
D3	0	1	0	0				
<i>Mean daily temperature (°C)</i>								
Oct-Dec	9.3	7.6	6.9	6.9				
Jan-Mar	5.4	5.7	4.8	4.9				
Apr-Jun	15.1	15.4	14.2	12.6				
Structure characteristics								
<i>Percentage of Δ areas in the plowed layer</i>								
	UC	C	UC	C	UC	C	UC	C
D1	9	X	13	X	14	X	12	X
D2	14	72	10	93	18	75	23	34
D3	13	66	6	97	38	64	22	42

Characterisation of soil structure

Soil structure variability was characterized using image analysis of soil profiles of the plowed layer, as described by Vocanson et al. (2006b). This method consisted firstly of characterizing soil structure using a morphological method proposed by Manichon and Gautronneau (1987). On the observation face of a soil pit (1.5 m wide in Grignon and 1.0 wide in Mons, 0.5 m deep in both sites), the severely compacted clods or zones, called Δ in the present paper (Manichon and Gautronneau, 1987), were mapped in the plowed layer. Secondly, the percentage of soil with a Δ structure was calculated in the plowed surface area (Table I.18) using image analysis (software Optimas 6.0.) on photographs of the observation face taken with a digital camera (Sony, DSC-S75).

Crop Nitrogen uptake

Above-ground parts of the pea crop were harvested once a month from emergence to maturity from one plot of 0.85 m² at Grignon per replicate and 1 m² at Mons. In exp.1 and 2, on the same date as peas, barley was also sampled from 0.85 m² per replicate.

For each sample (peas and barley), roots were cut at the base of the stem in order to keep only aerial matter. Samples were then washed and packed to be dried for 48 hours at 80°C.

At maturity, pea samples were threshed to separate seeds from the vegetative part of the sample (pods, stems and leaves). Seeds and vegetative matter were then dried for 48 hours at 80°C to determine seed protein content (SPC) and the amount of N in vegetative matter (Nveg).

On all the above-mentioned samples N content was measured in order to determine crop N uptake: after drying and weighing, they were ground using a grid of 0.5 mm mesh. A sub-sample of 7-9 mg was then taken and N content was analysed by the Dumas method. Nitrogen Harvest Index (NHI) was calculated as the ratio of the amount of N in the seeds to that in the whole crop.

Nitrogen fixation

At maturity, the amount of N fixed was estimated using differences in ¹⁵N natural abundance between peas, which use both soil and atmospheric N and a non-N-fixing plant which uses only soil-derived N, i.e. barley (Amarger et al., 1979; Mariotti et al., 1983). At maturity for peas and barley, on the same samples as described before, a 5-7 mg sub-sample was taken and analysed for ¹⁵N analyses. N derived from symbiotic nitrogen fixation (%Ndfa) was estimated as described by Jensen (1986). The amount of N₂ fixed was calculated as the product of pea biomass, N content in vegetative parts and the proportion of plant N derived from N₂ fixation (%Ndfa), from the equation:

$$\%Ndfa = 100 \times ((\delta^{15}N \text{ pea} - \delta^{15}N \text{ barley}) / (\beta_{fix} - \delta^{15}N \text{ barley}))$$

where β_{fix} is the isotopic fractionation factor associated with N₂ fixation ($\beta_{fix} = -1$ for pea at maturity, Mariotti et al., 1983).

Soil samples in the upper 0.3 m layer were taken at random on 21 July 2004 at Mons and 27 July 2005 at Grignon. Samples were ground using a 20 mm mesh. Sample of 50-70 mg were then taken and analysed (Table I.19) to determine if the difference in $\delta^{15}N$ between air and soil was higher than 3 ‰, the usual threshold of significance used for the application of the ¹⁵N natural abundance method (Croizat, pers. com.).

Table I.19. Isotopic excess between the soil sample and the air (0.3663‰ ¹⁵N) in the 0-0.3 m soil layer.

Replicate	Grignon	Mons
I	0.0027%	0.0023%
II	0.0027%	0.0025%
III	0.0031%	0.0024%

Volumetric soil water content and water consumption

Volumetric soil water content (VWC) was measured using time domain reflectometry (TDR), which is generally regarded as the best electronic means of VWC measurement (Chandler et al., 2004). Only the treatments UC and C of D2 and D3 in Grignon (exp.1 and 2) were studied. For each treatment, a soil pit was excavated by hand of 1 m depth by 0.6 m wide, perpendicular to the crop rows, at the end of the third replicate and adjacent to the second. In each pit, TDR waveguides (Soil Moisture

Equipment, Inc., Goletat, CA, USA) were placed at four depths: 0.10, 0.30, 0.45 and 0.75 m. In each pit, two replicates of the waveguides were set about 0.3 m apart. The TDR data were collected with a Trase TDR (Soil Moisture Equipment, Inc., Goletat, CA, USA) every two or three days. For each depth of each treatment, the mean of the two replicates was thus calculated. Data recording began in exp.1 on 26 March 2003 for both sowing dates, and in exp.2 on 16 December 2003 for D2 and 16 March 2004 for D3.

To estimate water consumption during the whole crop cycle for each TRASE measurement, the following equation was used:

$$ETR(t) = - \text{depth} \times \Delta H_v(t) - \sum R(t)$$

where t is the time between the two consecutive measurement dates, $ETR(t)$ is the evapotranspiration during this duration, $\Delta H_v(t)$ is the difference in the VWC measured at the two dates, and $\sum R(t)$ was the cumulative rainfall during the period. The balance was calculated for a soil depth of 1 m.

Nitrogen in soil

Soil mineral N was measured under peas and barley in exp.1 and 2 but only under peas in exp.3 and 4. For peas it was assumed that the cultivar had no effect on N mineralization and thus samples were taken randomly among the cultivars. In each treatment (UC D1, UC and C D2, UC and C D3), in each replicate, three samples per replicate were taken for each layer (seedbed: 0-0.05 m depth; plowed layer: 0.05-0.3 m depth; subsoil: divided into two layers, 0.3-0.6 m depth and 0.6-0.9 m depth) and mixed together. Finally for each replicate, only one sample per layer was analysed for N, using the Kjeldahl method. In exp.1 and 3, measurements were made once a month from sowing to harvesting, on the same day as the crop sampling. In exp.2 and 4, soil mineral N was only measured for every treatment at sowing, at the end of winter (11 February 2003 in exp.2 and 23 March 2004 in exp.4) and after harvest (27 July 2003 in exp.2 and 21 July 2004 in exp.4).

Statistical analysis

Statistical analysis was performed using the GLM procedure (type III) of SAS (SAS, 1987) for plant and soil samples. For plant, analysis of variance was carried out separately for Grignon and Mons because of the differences in experimental design between the two sites. As in a given site the two experiments were carried out in different fields, a block effect was introduced in the analysis of variance which combined the effects of: the year's weather and the field used in the year of the experiment. The main effects of four factors were studied in the analysis (block, soil structure, sowing date and cultivar) together with all the first-order interactions between the last three of these factors. For soil, for each period (sowing, end of winter and maturity), analysis of variance was carried out for each experiment to take into account the differences in N at sowing between fields.

To compare crop N uptake in the 62 different treatments (29 in Grignon and 33 in Mons), non-linear regressions were fitted to the experimental data using the NLIN procedure of SAS (Figure I.15). The beta function of Yin et al. (2003) was the reference:

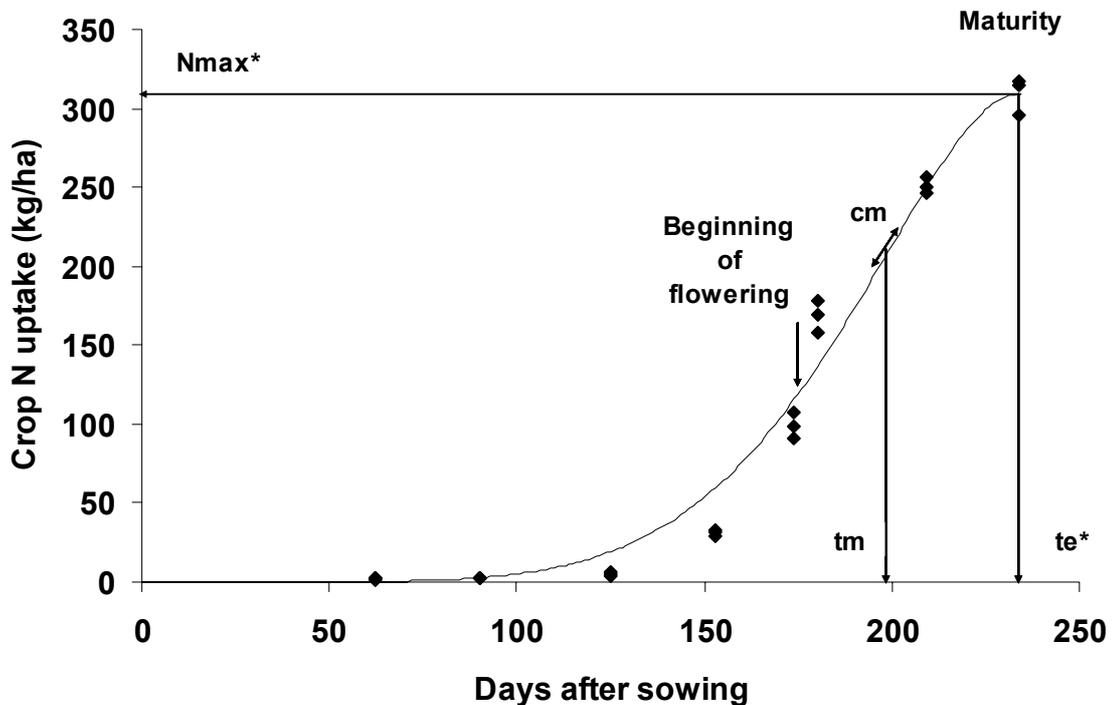
$$N = N_{\max} \times (1 + (t_e - t) / (t_e - t_m)) \times (t / t_e)^{t_e / (t_e - t_m)}$$

where N_{\max} is the maximum value of N, t_e is the date when N_{\max} was reached and t_m is the date when the N accumulation rate reached its maximum value (Yin et al., 2003). We chose this function because we assumed that soil structure, sowing date and cultivar would have significant effects on these three parameters. N_{\max} and t_e were observed values. The parameter t_m was determined by the fitting. The inflection point at which the N accumulation rate reaches its maximum value (c_m) was calculated by:

$$c_m = N_{\max} \times (2 t_e - t_m) / ((t_e \times (t_e - t_m)) \times (t_m / t_e)^{t_m / (t_e - t_m)})$$

We also assumed that soil structure, sowing date and cultivar have an effect on c_m .

Figure I.15. Crop N uptake (kgN ha^{-1}) (exp.4 UC D2 Cheyenne): observed values (\blacklozenge) and fitted curve from beta function (Yin et al., 2003), with the parameters c_m and t_m fitted. * indicate the parameters observed.



RESULTS

N accumulation

For the 62 situations, the correlation coefficient between observed and adjusted values varied between 0.87 and 0.99 (data not shown).

The three variables N_{\max} , t_e and t_m were well explained by the effects of the four-factors experiment as the statistical model accounted for between 82 and 99% of their variance in the four experiments (Table I.20). The ANOVA model accounted for 79% of the variance of c_m at Grignon, but only 48% at Mons.

N_{\max} depended on the year ($P < 0.05$): indeed, N_{\max} was 41 kgN ha^{-1} higher in exp.1 than in exp.2 and 23 kgN ha^{-1} higher in exp.4 than in exp.3. Compaction reduced N_{\max} in Grignon by 68 kgN ha^{-1} ($P < 0.05$). In Mons, N_{\max} was decreased by compaction by only 15 kgN ha^{-1} , which was not significant ($P > 0.05$). At both sites, D2 had a 28% and 16% higher N_{\max} than D3 at Grignon and Mons respectively ($P < 0.05$). For Hr200, D1 had a significantly lower N_{\max} than D2 and D3 ($P < 0.05$). At Grignon the lowest N_{\max} was observed for Cheyenne, whereas this was the case for Dove at Mons.

The values of the two variables t_e and t_m depended on the experiment ($P < 0.05$). Soil structure had no significant effect ($P > 0.05$). On both sites, t_e and t_m were lower in D2 than in D3 ($P < 0.05$). The time interval between t_e and t_m was similar between sites and sowing dates as it only varied between

27 and 29 days. For Hr200, the earlier the sowing date, the higher were t_e and t_m and the longer was the period between the two variables. Hr200 had significantly higher t_e and t_m than the three other cultivars only in Grignon ($P<0.05$).

In Mons, no factor had significant effect on c_m ($P>0.05$). In Grignon, the experiment had a significant effect on c_m , as it was $1.5 \text{ kgN ha}^{-1} \text{ day}^{-1}$ less in exp.2 than in exp.1. Compaction decreased c_m by 19% ($P<0.05$). For the three cultivated cultivars, no significant difference between D2 and D3 was observed ($P>0.05$). In contrast, for Hr200, the earlier the sowing date, the lower was c_m . Baccara presented a significantly higher c_m than the three other cultivars ($P<0.05$).

Table I.20. Effect of block, soils structure, sowing date and cultivar on the four parameters of the fitted curves represented in Figure 1, in the four experiments: N_{\max} (kgN ha^{-1}), t_e (days after sowing, DAS), t_m (days after sowing, DAS) and c_m ($\text{kgN ha}^{-1} \text{ day}^{-1}$).

		Grignon: exp.1 and 2				Mons: exp.3 and 4			
		N_{\max}	t_e	t_m	c_m	N_{\max}	t_e	t_m	c_m
		kgN ha^{-1}	DAS	DAS	$\text{kgN ha}^{-1} \text{ day}^{-1}$	kgN ha^{-1}	DAS	DAS	$\text{kgN ha}^{-1} \text{ day}^{-1}$
Experiment	1 or 3	281a	174b	148b	5.2a	259b	181a	152a	4.4a
	2 or 4	240b	194a	163a	3.7b	282a	172b	141b	4.6a
Soil structure (SS)	UC	292a	176a	149a	5.2a	279a	186a	156a	4.5a
	C	224b	170a	145a	4.2b	264a	184a	154a	4.4a
Sowing date (SD) † x B, C and D	1	-	-	-	-	-	-	-	-
	2	313a	220a	191a	5.0a	291a	240a	211a	4.4a
	3	243b	133b	106b	4.3a	251b	129b	100b	4.4a
Sowing date (SD) † x H	1	243b	270a	228a	2.8c				
	2	293a	246b	212b	3.9b				
	3	207c	138c	114c	5.1a				
Cultivar (Cult) †	B	303a	175b	148a	5.4a	266a	127a	96a	4.6a
	C	251b	177b	147a	4.0b	253a	127a	99a	4.6a
	D	281a	178b	151a	4.9ab	239b	127a	101a	4.6a
	H	291a	192a	163b	4.5b	262a	135a	101a	4.1a
Interaction	SSxSD								
	SSxCult								
	SDxCult								
r^2		0.82	0.99	0.98	0.79	0.85	0.99	0.99	0.48

* significant at $P<0.05$

- only the cultivar Hr200 was studied in the two experiments for the three sowing dates. To compare the effect of the three sowing date on the four parameter s, means were calculated separately on Hr200 and the three other cultivars.

X means no average because of absence of treatment in exp.3

† numbers followed by the same letter are not significantly different at $P<0.05$

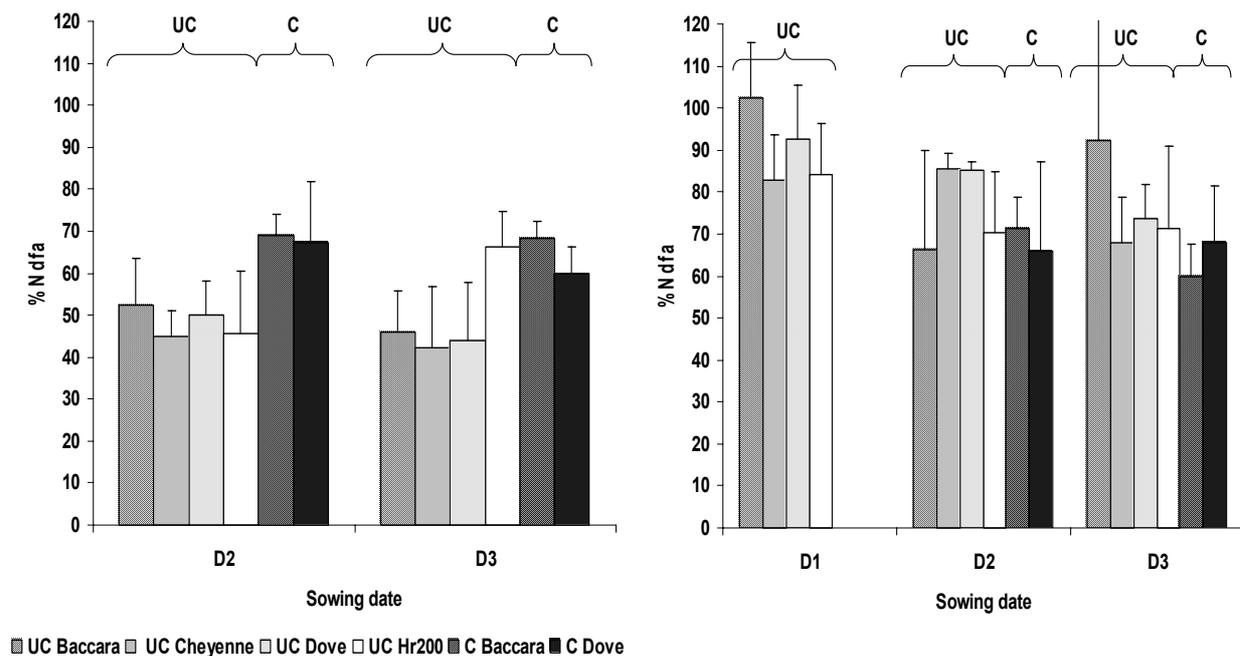
N fixed

In exp .1, the range of variation of %Ndfa was from 42% to 68%, whereas it was from 49% to 93% (with the exception of D1 Baccara) in exp.2 (Figure I.16).

In exp.1, %Ndfa was significantly lower in UC (between 42% and 52%) than in C (between 60% and 68%) situations for all treatments. In exp. 2, two cases were observed: for D2 Baccara and D3 Dove, %Ndfa was similar in UC and C treatments (difference between of 4% and 5%, respectively), while in D3 Baccara and D2 Dove, %Ndfa was between 20% and 32 % higher in UC than in C treatments.

In exp.1, no significant difference among sowings or cultivars was observed (average value of 47%), with the exception of D2 Hr200 (68%). In exp.2, the results were more extreme and depended on both sowing date and cultivar. For Baccara, the lowest %Ndfa was observed in D2 (66%). In contrast, for Cheyenne and Dove, D1 and D2 presented a higher %Ndfa (mean value of 88% in D1 and 85% in D2) than in D3 (average value of 71%). For Hr200, the highest %Ndfa was observed for D1 (84%) in comparison with D2 (70%) and D3 (71%).

Figure I.16. %N derived from air (%Ndfa) according to soil structure, sowing date and cultivar in exp.1 (A) and in exp.2 (B).



N in the crop, seeds and vegetative organs at maturity

The four factors accounted for between 73 and 86% of the variance of SPC, Nveg and NHI (Table I.21).

SPC, Nveg and NHI significantly depended on the experiment at both sites ($P < 0.05$). Compaction significantly decreased SPC by 1% and Nveg by 19 kgN ha⁻¹ in Grignon ($P < 0.05$), which was not observed in Mons ($P > 0.05$). At neither site was NHI affected by compaction ($P > 0.05$).

D2 increased SPC and Nveg in Grignon and in Mons ($P < 0.05$) compared with D3. SPC was 8% and 5% higher in D2 than in D3 in Grignon and Mons respectively. The effect of the sowing was much higher on Nveg than on SPC: Nveg was increased by 35% and 11% in D2 compared with D3 in Grignon and Mons, respectively. NHI was significantly higher in D3 than in D2 only in Grignon ($P < 0.05$). For Hr200, the highest SPC was observed for D2 and the lowest for D3. The earlier the sowing date, the higher was Nveg and the lower was NHI ($P < 0.05$).

At both sites, for the three classical cultivars, Baccara had the highest SPC, followed by Cheyenne and finally Dove ($P < 0.05$). Hr200 had a high SPC in Grignon whereas it was intermediate in Mons. Hr200 had on average 14 and 11 kgN ha⁻¹ more N in straw than the three classical cultivars in Grignon and Mons, respectively.

The lowest NHI was observed for Hr200 in Grignon and in Mons ($P < 0.05$).

The interaction between sowing date and cultivar was significant at both sites for the variables SPC and NHI ($P < 0.05$).

Table I.21. Effect of block, soil structure, sowing date and cultivar on Seed Protein Content (SPC, g/100g seed biomass), N in vegetative matter (Nveg, kgN ha⁻¹) and Nitrogen Harvest Index (NHI) in the four experiments.

		Grignon			Mons		
		SPC	Nveg	NHI	SPC	Nveg	NHI
		%	kgN ha ⁻¹		%	kgN ha ⁻¹	
Experiment	1 or 3	22.3a	55b	0.80a	20.1b	41b	0.84a
	2 or 4	20.2b	79a	0.68b	21.7a	58a	0.80b
Soil structure (SS)	UC	21.2a	69a	0.76a	20.8a	51a	0.82a
	C	20.2b	50b	0.77a	20.7a	49a	0.82a
Sowing date (SD) † x B, C and D	1	-	-	-	-	-	-
	2	22.2a	81a	0.74b	21.3a	53a	82a
	3	20.3b	52b	0.78a	20.2b	47b	81a
Sowing date (SD) † x H	1	22.7b	111a	0.55b			
	2	23.3a	95b	0.65a			
	3	21.9c	66c	0.68a			
Cultivar (Cult) †	B	22.2a	70b	0.77a	22.1a	43b	0.84a
	C	21.3b	61b	0.77a	20.4b	45b	0.82ab
	D	20.3c	68b	0.75a	19.3c	42b	0.82ab
	H	22.6a	80a	0.69b	20.8b	55a	0.79b
Interaction	SSxSD				*		
	SSxCult						
	SDxCult	*		*	*		*
r ²		0.78	0.78	0.81	0.86	0.73	0.73

* significant at $P < 0.05$

- only the cultivar Hr200 was studied in the two experiments for the three sowing dates. To compare the effect of the three sowing date on the four parameter s, means were calculated separately on Hr200 and the three other cultivars.

X means no average because of absence of treatment in exp.3

† numbers followed by the same letter are not significantly different at $P < 0.05$

N in soil and N mineralized

Mineral N in soil at sowing was between 10 kgN ha⁻¹ and 59 kgN ha⁻¹ higher for autumn than spring sowings (Table I.22). In autumn, the amount of mineral N in soil at sowing varied between 51 kgN ha⁻¹ and 155 kgN ha⁻¹ whereas it was between 38 kgN ha⁻¹ and 76 kgN ha⁻¹ for a spring sowing. D1 and D2 did not differ by more than 25 kgN ha⁻¹.

At the end of winter, N in soil did not differ by more than 8 kgN ha⁻¹ between UC and C treatments ($P < 0.05$). In exp.1, the mineral N values in soil at the end of winter in D1 and D2 were similar to those at sowing for D3 ($P > 0.05$). Mineral N in soil at the end of winter for an autumn sowing was a little lower than at sowing for a spring sowing: the difference was, on average, 22 kgN ha⁻¹ and 14 kgN ha⁻¹ in exp.3 and 4, respectively. In contrast, in exp.2, mineral N in soil was around 44 kgN ha⁻¹ higher at the end of winter for an autumn sowing than at sowing for a spring sowing.

In UC situations, the mineral N in soil at maturity was between 5 kgN ha⁻¹ and 19 kgN ha⁻¹ higher in D2 than in D3. In two of the six situations studied (exp.1 D3 and exp. 2 D3) it was similar in C and UC situations ($P < 0.05$). In three (exp.1 D2; exp. 3 D2 and D3) it was on average 18 kgN ha⁻¹ higher in C than in UC treatments ($P > 0.05$). In the last situation (exp.2 D2), it was 16 kgN ha⁻¹ lower in C than in UC treatment ($P < 0.05$).

Table I.22. Mineral N in soil (kgN ha⁻¹) for three periods (sowing, end of winter and maturity) according to experiment, soil structure and sowing date. For each experiment and period, numbers that are followed by the same letter are not significantly different at P<0.05.

	Period	D1		D2		D3	
		UC	UC	C	UC	C	
Exp.1	Sowing	51a	51a	51a	38a	41a	
	End of winter	36a	40a	32a			
	Maturity	30b	33b	44a	28b	29b	
Exp.2	Sowing	112a	115a	115a	56b	56b	
	End of winter	86a	106a	108a			
	Maturity	78a	72a	58b	53b	52b	
Exp.3	Sowing	88a	79a	86a	65b	65b	
	End of winter	47a	40a	41a			
	Maturity	n.m.	41b	64a	49b	53ab	
Exp.4	Sowing	155a	130b	147a	117c	112c	
	End of winter	88a	108a	106a			
	Maturity	86ab	70b	100a	63b	76b	

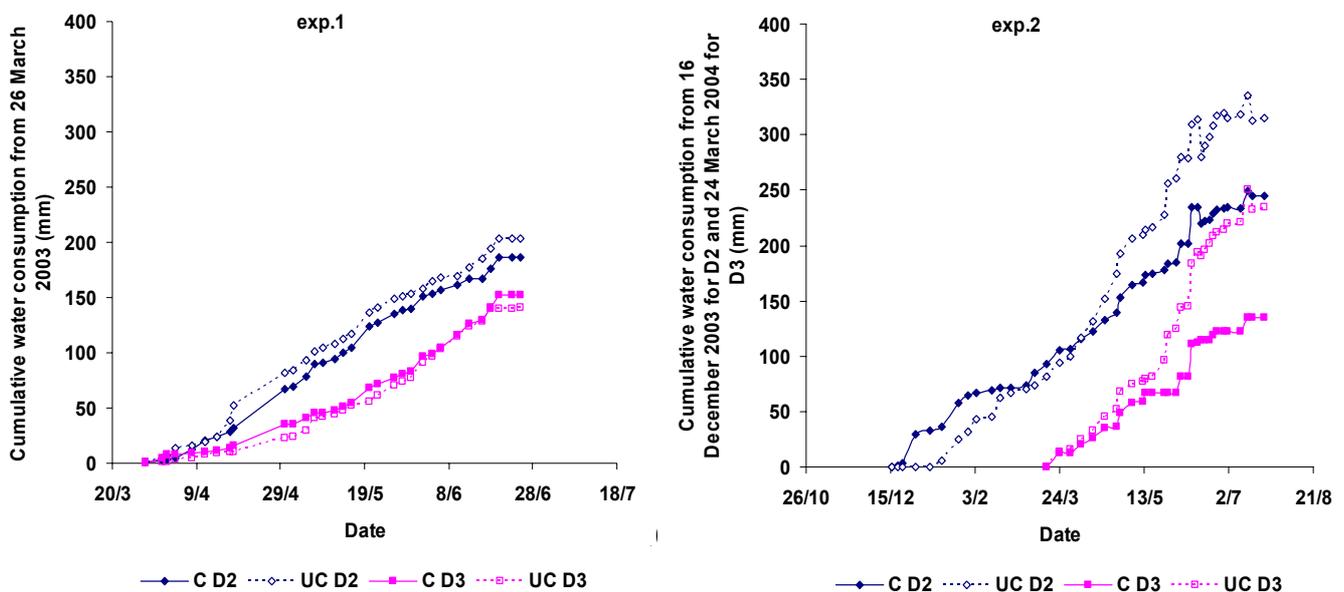
n.m. not measured

Water uptake

During the same period of measurement, the autumn-sown crop (D2) took up more water than the one sown in spring (D3) (Figure I.17): for instance, in exp.1, in UC treatments, total water consumption was 203 mm for D2 and 141 mm for D3 from 28 March until maturity. From mid-December to March, the water consumption of D2 in exp.2 was around 100 mm, whatever soil structure. Finally, during its whole cycle, water consumption in exp.2 was 315 mm for D2 and 234 mm for D3.

The effect of soil structure on water consumption depended on the experiment. In exp.2, compacted treatments accumulated 70 mm and 100 mm less water for D2 and D3 respectively than uncompacted treatments. The effect of compaction occurred in mid-April, regardless of the sowing date. In contrast, in exp.1, for D2 only, compacted treatments used 17 mm less water than uncompacted ones.

Figure I.17. Cumulative water consumption from 28 March 2003 in exp.1 for both sowing dates and from 16 December 2003 and 24 March 2004 for D2 and D3, respectively, in exp.2.



DISCUSSION

Sowing date

As observed by Horn et al. (1996a) for chickpea, the longer the crop cycle, the higher was the total aerial N accumulated by the crop (N_{\max}). The difference in N_{\max} between an autumn and a spring sowing depended on the site (95 kgN ha⁻¹ in Grignon and 42 kgN ha⁻¹ in Mons). This must be due to differences in the duration of N absorption and fixation, since the maximal rate of N accumulation (c_m) was similar in both sites (around 4.7 and 4.4 kgN ha⁻¹ in Grignon and Mons, respectively). For the inbred recombinant line Hr200, October sowing did not increase N_{\max} , maybe because of inadequate low frost resistance and thus frost damage.

O'Connor et al. (1993) observed that earlier sowing increased the proportion of plant N derived from fixation (%Ndfa). In the present study, %Ndfa varied greatly between experiments, confirming its high sensitivity to the weather, soil physical properties and agronomic management, as suggested by van Kessel and Hartley (2000). In exp.1, the temperatures during winter (Tricot, 1993) and the water logging (Minchin and Pate, 1975) may explain the low value of %Ndfa. Voisin et al. (2002) showed that symbiotic nitrogen fixation was not initiated unless nitrate availability in the soil dropped below 56 kgN ha⁻¹. This threshold was exceeded in exp.2 for D1 and D2, which may have limited N fixation until it was reached. Crops produce higher dry matter with autumn than spring sowings (Uzun and Açıkgöz, 1998). Evans et al. (1989) showed that, with more biomass production, N₂ fixation was higher for a given level of extractable soil N, which may explain why the November sowing had a higher %Ndfa than the spring sowing. However, the effect of the sowing date on %Ndfa depended on the cultivar: the highest %Ndfa was observed when the cultivar was sown at its intended sowing date.

November sowing increased seed protein content (SPC), as already observed by Uzun and Açıkgöz (1998). N for seeds originates from crop N accumulation during seed filling and N transfer from the vegetative biomass (Lecoeur and Sinclair, 2001a). Crops sown in November had a longer vegetative period than those sown in February-March, and thus more available N. However, as suggested by Lhuillier-Soundélé et al. (1999), the larger pool of available N may have increased the rate of seed N accumulation and hence SPC: Vocanson et al. (2005) found that sowing date had only a small effect on the duration of yield elaboration. Accumulation of N in seeds was shown to be sensitive to water stress (Lecoeur and Sinclair, 2001a). A better match between the crop water requirements and availability would have also contributed to the higher SPC for November than February-March sowing, as suggested by Fougereux et al. (1997). Autumn sowing increased water consumption during the cycle by about 80 mm. However, even with autumn sowing, the quantity of water taken up by the crop (315 mm) is less than for maize (500 mm) and soybean (450 mm) (Munier-Jolain and Carrouée, 2003). Autumn sowing should thus be of interest to improve seed N content and make better use of water. For Hr200, the October and the November sowings had an advantage in terms of SPC in comparison with spring sowing, because of a higher N_{\max} . The earlier the sowing date, the higher the risk of disease, which may influence processes leading to N assimilate availability and thus SPC. This should be taken into account when testing earlier sowing dates for the new winter pea cultivars.

The varying effects of the sowing date on NHI confirmed the latter's high sensitivity to weather variability (Stevenson and van Kessel, 1996a), in contradiction with the results of Lecoeur and Sinclair (2001b). For Hr200, the absence of a correlation between SPC and NHI classification suggested that the lower NHI for the earlier sowing date may be the consequence of a low seed yield,

perhaps because of inadequate frost resistance or no poor disease control, favoured by early autumn sowing.

Crop residues can have a significant role in nutrient cycling since N is usually the nutrient limiting crop production (Soon and Arshad, 2004). The earlier the sowing date, the larger was the quantity of N in the straw at maturity (N_{veg}) due to the greater dry matter accumulation. Horn (1996b) suggested this explanation for chickpea, rather than higher remobilisation. Autumn sowing could increase potential returns of N to the soil by around 20 kgN ha⁻¹ in comparison with spring sowing, possibly reducing the amount of N fertilizer needed for the following crop. But the type and the quality of the residue also determine their contribution to the N nutrition of the subsequent crop (Nicolardot et al., 2001; Soon and Arshad, 2004). As Munier-Jolain and Carrouée (2003) suggested, mineralization of pea straw and roots is limited in autumn, studies are needed to assess the impact of an increase in N residues on the balance of the subsequent crop. Furthermore, the net N contribution of legumes to the soil is usually estimated without consideration of the below-ground N inputs from roots, root exudates and nodules (Sawatsky and Soper, 1991; Jensen, 1994; van Kessel and Hartley, 2000), which should be significantly increased by autumn sowing because of the longer growing period. Further research into below-ground inputs from roots is necessary to best quantify the effect of autumn sowing on N balance.

Bourgeais et al. (2004) showed that, after spring peas, soil mineral N at the time of sowing winter wheat on a shallow soil was around 64 kgN ha⁻¹, whereas it varied from 28 to 63 kgN ha⁻¹ in uncompacted treatments for spring sowing in our experiment. Autumn sowing (October and November) increased it from 2 to 30 kgN ha⁻¹. The higher N_{veg} and mineral N in the soil after an autumn-sown pea crop benefit the following crop but at the risk of more N leaching. Jensen (1994) showed that the release of inorganic N was very fast during the initial 3 months of decomposition in the autumn. Weather conditions during autumn and winter, and the turn-over of the easily decomposed pea residues, may result in N losses and less residual N for subsequent crops (Jensen, 1994). Autumn sowing of peas would thus increase the risk of N losses during the following autumn and winter. As the harvest is earlier for an autumn than a spring sowing, the sowing of a catch-crop during summer might alleviate this problem. Another solution would be the use of a following crop which is very efficient in accumulating N during autumn, such as mustard or rapeseed (Munier-Jolain and Carrouée, 2003).

Cultivars

On all sites, Baccara accumulated more N than the three other winter cultivars, reflecting differences in N fixation and/or absorption. Zary et al. (1978) showed that genetic variability existed for the N₂ fixation traits such as nodule activity and nodule mass and number in southern pea. Atta et al. (2004) suggested that there was a huge variation between genotypes in maximum fixation. The great variability of the effect of the cultivar between experiments and sowing dates suggests that, in field conditions, environmental conditions greatly influenced %N_{dfa}, hiding the effects of sowing date and soil structure. Pea cultivars differed in terms of root system characteristics, such as maximum rooting depth at maturity and root distribution (Vocanson et al., 2006a), but not enough to affect N_{max}. Cultivars with a higher N_{max} should thus possess a greater ability to absorb soil mineral N than others. For the three cultivated cultivars, SPC depends on the cultivar, which confirmed the results of Uzun and Açıkgöz (1998). Generally, N_{veg} and NHI were similar. The inbred recombinant line Hr200 is still under selection and thus not fixed, which may explain the variation in the SPC classification according to the site in contrast with the three other cultivars. Hr200 is more reactive to photoperiod than the three other classical cultivars. Hr200 flowered late (Vocanson and Jeuffroy, 2005). The longer

vegetative period for this cultivar may have increased the vegetative biomass and hence the quantity of N accumulated. As suggested by Stevenson and van Kessel (1996b), the difference in development between Hr200 and the three other cultivars may explain its differences in NHI. Breeders have obtained new inbred lines with earlier flowering dates and higher seed weight than Hr200. Further experiments need to be conducted on these new cultivars to study the effect of earliness of flowering on N accumulation and remobilisation.

Soil structure

Compaction reduced the amount of N accumulated by the crop by 23% in Grignon, as previously observed by Tricot et al. (1990). Buttery et al. (1998) showed that, in the field, the effects of compaction would probably be less under conditions of high rainfall, which was a major weather factor that differed between the two years of experiments. Our results were in agreement with this observation only in Grignon (data not shown). For November sowing, compaction did not reduce water consumption during winter (from mid-December to the end of March), in spite of slower downward root growth (Vocanson et al., 2006b). During this period, water was not a limiting factor. For this reason, in spite of increased resistance to water transport in compacted soil structure (Horton et al., 1994), water consumption should not have been affected. In contrast, from April to June, differences between compacted and uncompacted treatments were observed in terms of water consumption in exp.1 for autumn sowing and in exp.2 for both sowings. The effect of compaction on maximal root depth (Vocanson et al., 2006b) would have limited water absorption at the end of the cycle, especially when water may have been a limiting factor (Buttery et al., 1998). In Mons, in exp. 3, D3 and in exp.4 D2 and D3, the difference between compacted and uncompacted soils was not significant because of insufficient soil water content at the time of compaction. This explains the smaller effect of compaction on N accumulated by the crop observed in Mons (only 6%).

The reduction in the amount of N accumulated may be the consequence of the reduction of N absorbed but also fixed. As observed by many authors (Jensen, 1994 and Evans et al., 2001 for pea; Buttery et al., 1994 for soybean), the estimates of the amount of symbiotic N₂ fixation varied considerably between the two years. The effect of compaction on N fixation depended on the year, possibly due to differences in water regime (Buttery et al., 1994 for soybean) and/or soil mineral N at sowing (Jensen, 1994). In exp. 1, in which water was not limiting even at the end of growth, compaction increased the fraction of N derived from fixation regardless of sowing dates. The amount of N absorbed may have been more restricted by compaction than by N fixed because of lower soil N availability (Evans et al., 1989) or a shallower root system (Dawkins et al., 1984; Vocanson et al., 2006b). Doran (1980) showed that when tillage is minimized, so that soil structure is more compact than with conventional tillage, lower rates of mineralization and nitrification, coupled with increased N immobilization and a higher potential for denitrification, will lead to a decrease in available N. Fixation would then be used to meet the crop N requirements. In exp.2, in which water may have been a limiting factor at the end of the cycle, two kinds of situations were observed. In the two treatments in which the cultivar was sown at its usual sowing date (Baccara sown in D3 and Dove sown in D2), compaction reduced the fraction of N derived from fixation (%Ndfa) by about 34% and 12% respectively. Crozat et al. (1992) observed that nodules were concentrated in the upper 0.1 m layer with no effect on the maximum number of nodules per plant. Frechilla et al. (2000) also showed that N fixation was strongly affected by water stress. The reduction of %Ndfa is thus explained by a greater sensitivity of nodules to water stress. When cultivar was not sown for its normal sowing date, compacted and uncompacted soils had similar %Ndfa. In this case some other physiological factor may have affected fixation. For instance, compaction may have modified other factors such as nodule

weights and numbers (Buttery et al., 1998; Crozat et al., 1992), which were not studied in our experiment. The results should be considered carefully. Indeed, an isotopic excess between the soil sample and the air of more than 3 ‰ is required (Crozat, com. pers.), whereas it was around 2.6 ‰ in our experiment. Furthermore, the use of barley as a non-fixing reference crop may underestimate the amount of %Ndfa (Jensen, 1986). Results might also be expected to be different on other soil types (Evans et al., 1989). However, the range of variation of %Ndfa was in agreement with the observations of Voisin et al. (2002) and Crozat et al. (1992) who reported %Ndfa between 30% and 84%. Compaction did not affect the duration of N accumulation and the date at which its rate was maximal. In spite of the compensation between fixation and absorption, N may be a limiting factor in compacted soil structure, with possible consequences on seed yield (Sagan et al., 1993).

The lower N_{\max} in compacted than uncompacted treatments may have tended to decrease SPC, as Lhuillier-Soundélé et al. (1999) showed that the rate of individual seed N accumulation depends on the pool of N available per seed at a given time. N_{veg} was thus also reduced by compaction, without any effect on N partitioning between seeds and straw.

In most of the situations, in spite of the effect of compaction on N_{\max} , compaction did not increase the quantity of N leached during crop growth. The method used did not take into account the contribution of pea roots, nodules and rhizodeposits to organic soil N or processes such as denitrification and ammonia volatilisation. Evans et al. (2001) showed that the amount of N in below-ground plant biomass was about 21 kgN ha⁻¹ for peas, although it varies with site, season and cultivar. As Tardieu and Manichon (1987) showed that total root weight was decreased by compaction, the contribution of pea roots to the soil N pool would be lower in compacted soil. It is possible that the modification of soil physical factors such as water, air, mechanical impedance and heat (Boone, 1986) by compaction may affect biological and chemical soil processes. Most biological and chemical effects have an even longer duration and the establishment of a new equilibrium in, for instance, the organic matter and N balance is not to be expected within a year (Titulaer and Boone, 1984). In the future, we believe that long-term experiments are needed to assess the effect of compaction on the N balance of crop rotations.

Acknowledgements

We would like to thank J.Troizier and his team for assistance with trials at the experimental Unit at Grignon, and J.J. Stempniak and his team for the trial in Mons. We thank G. Etévé for the seeds of Hr200. We also thank G. Grandeau, V. Tanneau, B. Le Fouillen, A. Chauveau, and M. Bazot for their help with the measurements; D. Le Floch and R. Gosse for their help in TDR installation. We specially thank J.F. Fourbet and D. Makowski for their statistical assistance, Olivier Delfosse, INRA Laon, for ¹⁵N analysis and Florence Lafouge for N analysis. Financial support was obtained from UNIP, GAE-Recherche and INRA (Action Impact). We would like to thank Alan Scaife for English language revision.

References

- Amarger, N., A. Mariotti, F. Mariotti, J.C. Durr, C. Bourguignon, and B. Lagacherie. 1979. Estimate of symbiotically fixed nitrogen in field grown soybeans using variations in ^{15}N natural abundance. *Plant Soil* 52:269-280.
- Atta, S., S. Maltese, and R. Cousin. 2004. Protein content and dry weight of seeds from various pea genotypes. *Agronomie* 24:257-266.
- Boone, F.R. 1986. Towards soil compaction limits for crop growth. *Netherlands Journal of Agricultural Science* 34:349-360.
- Bourgeais, E., B. Carrouée, and A. Aveline. 2004. Nitrate leaching after dry pea compared to other arable crops. In T. Nemecek, et al. (ed.) Proc. International workshop on the methodology for environmental assessment of grain legumes. Agroscope and AEP, Zurich, Switzerland.
- Buttery, B.R., C.S. Tan, and S.Y. Park. 1994. The effects of soil compaction on nodulation and growth of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.). *Can. J. Pl. Sci.* 74:287-292.
- Buttery, B.R., C.S. Tan, C.F. Drury, S.J. Park, R.J. Armstrong, and K.Y. Park. 1998. The effects of soil compaction, soil moisture and soil type on growth and nodulation of soybean and common bean. *Can. J. Pl. Sci.* 78:571-576.
- Chandler, D.G., M. Seyfried, M. Murdock, and J.P. McNamara. 2004. Field calibration of water content reflectometers. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 68:1501-1507.
- Crozat, Y., J.P. Gillet, and F. Tricot. 1991. Effects of the soil compaction on root distribution N, P, K uptakes and growth of pea crop. In Proc. of the 3rd International Symposium of the Society of root research, Vienna, Austria.
- Crozat, Y., J.P. Gillet, and A.M. Domenach. 1992. Nodulation, N_2 fixation and incorporation of combined N from soil into pea crop : effects of soil compaction and water regime. Plancquaert (ed.). First European Conference on Grain Legumes. Angers, France.
- Dawkins, T.C.K., P.D. Hebblethwaite, and M. McGowan. 1984. Soil compaction and the growth of vining pea. *Annal Applied Biology* 105:329-343.
- Dexter, A.R. 1997. Physical properties of tilled soils. *Soil Till. Res.* 43:41-63.
- Doran, J.W. 1980. Soil microbial and biochemical changes associated with reduced tillage. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 44:765-771.
- Doré, T. 1992. Analyse, par voie d'enquête, de la variabilité des rendements et des effets précédents du pois protéagineux de printemps (*Pisum sativum* L.). PhD report. (In French, with English abstract). INA, Paris-Grignon, France.
- Evans, J., A.M. McNeill, M.J. Unkovich, N.A. Fettell, and D.P. Heenan. 2001. Net nitrogen balances for cool-season grain legume crops and contributions to wheat nitrogen uptake: a review. *Aust. J. Exp. Agri.* 41:347-359.
- Evans, J., G.E. O'Connor, G.L. Turner, D.R. Coventry, N.A. Fettell, J. Mahoney, E.L. Armstrong, and D.N. Walscott. 1989. N_2 fixation and its value to soil N increase in lupin, field pea and other legumes in South-Eastern Australian. *Aust. J. Agric. Res.* 40:791-805.
- FAO. 1998. Top-soil characterization for sustainable land management. FAO LW division, Rome, Italy.
- Fougereux, J.A., T. Doré, F. Ladonne, and A. Fleury. 1997. Water stress during reproductive stages affects seed quality and yield of pea (*Pisum sativum* L.). *Crop Sci.* 37:1247-1252.
- Frechilla, S., E.M. Gonzalez, M. Royuela, F.R. Minchin, P. Aparicio-Tejo, and C. Arrese-Igor. 2000. Source of nitrogen nutrition (nitrogen fixation or nitrate assimilation) is a major factor involved in pea response to moderate water stress. *J. Plant Physiol.* 157:609-617.

- Guilioni, L., J. Wéry, and J. Lecoer. 2003. High temperature and water deficit may reduced seed number in field pea purely by decreasing plant growth rate. *Functional Plant Biology* 30:1151-1164.
- Hauggaard-Nielsen, H., P. Ambus, and E.S. Jensen. 2003. The comparison of nitrogen use and leaching in sole cropped versus intercropped pea and barley. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 65:289-300.
- Horn, C.P., R.C. Dalal, C.J. Birch, and J.A. Doughton. 1996a. Sowing time and tillage practice affect chickpea yield and nitrogen fixation. 2. Nitrogen accumulation, nitrogen fixation and soil nitrogen balance. *Aust. J. Exp. Agri.* 36:701-706.
- Horn, C.P., C.J. Birch, R.C. Dalal, and J.A. Doughton. 1996b. Sowing time and tillage practice affect chickpea yield and nitrogen fixation. 1. Dry matter accumulation and grain yield. *Aust. J. Exp. Agri.* 36:695-700.
- Horton, R., M.D. Ankeny, and R.R. Allmaras. 1994. Effects of compaction on soil hydraulic properties, p. 141-165, *In* B. D. Soane and C. van Ouwerkerk (ed). *Soil compaction in crop production*. Elsevier, Amsterdam, The Netherlands.
- Jensen, E.S. 1986. Symbiotic N₂ fixation in pea and field bean estimated by ¹⁵N fertilizer dilution in field experiments with barley as a reference crop. *Plant Soil* 92:3-13.
- Jensen, E.S. 1994. Availability of nitrogen in ¹⁵N-labelled mature pea residues to subsequent crops in the field. *Soil Biol. Biochem.* 26:465-472.
- Jensen, E.S. 1996. Compared cycling in a soil-plant system of pea and barley residue nitrogen. *Plant Soil* 182:13-23.
- Jensen, E.S., and H. Hauggaard-Nielsen. 2003. How can increased use of biological N₂ fixation in agriculture benefit the environment? *Plant Soil* 252:177-186.
- Lecoer, J., and T.R. Sinclair. 2001a. Nitrogen accumulation, partitioning, and nitrogen harvest index increase during seed fill of field pea. *Field Crop Res.* 71:87-99.
- Lecoer, J., and T.R. Sinclair. 2001b. Analysis of nitrogen partitioning in field pea resulting in linear increase in nitrogen harvest index. *Field Crop Res.* 71:151-158.
- Lejeune-Hénaut, I., V. Bourion, G. Etévé, E. Cunot, K. Delhayé, and C. Desmyster. 1999. Floral initiation in fields-grown forage peas is delayed to a greater extent by short photoperiods, than in other types of European varieties. *Euphytica* 109:201-211.
- Lhuillier-Soundélé, A., N. Munier-Jolain, and B. Ney. 1999. Influence of nitrogen availability on seed nitrogen accumulation in pea. *Crop Sci.* 39:1741-1748.
- Manichon, H., and Y. Gautronneau. 1987. Guide méthodologique du profil cultural. (In French). GEARA CEREF ed. GEAREA et CEREF, Paris, France.
- Mariotti, A., F. Mariotti, and N. Amarger. 1983. The use of natural ¹⁵N isotope tracing for measurement of symbiotic nitrogen fixation by legumes. *Physio. Veg.* 21:279-291.
- Minchin, F.R., and J.S. Pate. 1975. Effects of water, aeration, and salt regime on nitrogen fixation in a nodulated legume - a definition of an optimum root environment. *J. Exp. Bot.* 26:60-69.
- Mokashi, D.D., J.D. Jadhav, M.R. Shewale, C.B. Gaikwas, and J.D. Path. 1997. Performance of crops and cropping systems under different dates of sowing. *Indian J. Agron.* 42:220-223.
- Munier-Jolain, N., and B. Carrouée. 2003. Quelle place pour le pois dans une agriculture respectueuse de l'environnement ? *Argumentaire agri-environmental*. (In French, with English abstract). *Cahiers Agricultures* 12:111-120.
- Ney, B., C. Duthion, and O. Turc. 1994. Phenological response of pea to water stress during reproductive development. *Crop Sci.* 34:141-146.

- Nicolardot, B., S. Recous, and B. Mary. 2001. Simulation of C and N mineralisation during crop residue decomposition: a simple dynamic model based on the C:N ratio of the residues. *Plant Soil* 228:83-103.
- O'Connor, G.E., J. Evans, N.A. Fettell, I. Bamforth, J. Stuchberry, D.P. Heenan, and P.M. Chalk. 1993. Sowing date and varietal effects on the N₂ fixation of field pea and implications for improvement of soil nitrogen. *Aust. J. Agric. Res.* 44:151-163.
- Peksen, E., H. Bozoglu, A. Peksen, and A. Gülümser. 2002. Determination of the effects of different row spacings on yield and some other properties of pea (*Pisum sativum* L.) cultivars sown in spring and autumn. *Acta Hort.* 579:313-318.
- Sagan, M., B. Ney, and G. Duc. 1993. Plant symbiotic mutants as a tool to analyse nitrogen and yield relationship in field grown peas (*Pisum sativum* L.). *Plant Soil* 153:33-45.
- Sawatsky, N., and R.J. Soper. 1991. A quantitative measurement of the nitrogen loss from the root system of field peas (*Pisum avense* L.) grown in the soil. *Soil Biol. Biochem.* 23:255-259.
- Soon, Y.K., and M.A. Arshad. 2004. Contribution of di-nitrogen fixation by pea to the productivity and N budget of a wheat-based cropping system. *J. Agri. Sci.* 142:629-637.
- Stevenson, F.C., and C. van Kessel. 1996a. A landscape-scale assessment of the nitrogen and non-nitrogen rotation benefits of pea. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 60:1797-1805.
- Stevenson, F.C., and C. van Kessel. 1996b. The nitrogen and non-nitrogen rotation benefits of pea to the succeeding crops. *Can. J. Pl. Sci.* 76:635-735.
- Tardieu, F., and H. Manichon. 1987. Etat structural, enracinement et alimentation hydrique du maïs. II. - Croissance et disposition spatiale du système racinaire. (In French, with English abstract). *Agronomie* 7:201-211.
- Titulaer, H.H.H., and F.R. Boone. 1984. Aspects of chemical soil fertility, p. 58-71, *In* F. R. Boone, ed. Experiences with three tillage systems on a marine loam soil. II. 1976-1979. Agricultural Research Reports 925. Pudoc., Wageningen, The Netherlands.
- Tricot, F. 1993. Mise en place des nodosités du pois protéagineux de printemps (*Pisum sativum* L.). Influence de la nutrition carbonée. PhD report. (In French, with English abstract). Paris-Sud Orsay, Paris, France.
- Tricot, F., Y. Crozat, A.M. Domenach, J.P. Gillet, J.P, and M. Sebillotte. 1990. Root and nodules distribution, N uptake and N₂ fixed in pea (*Pisum sativum* c.v. Solara) as affected by compaction of the plough layer. *In* A. Scaife (ed.) 1990. First Congress of the European Society of Agronomy, 5-7th december. Paris, France.
- UNIP. 2005. Statistiques Plantes riches en protéines. (In French). UNIP, Paris, France.
- Uzun, A., and E. Açıkgöz. 1998. Effect of sowing season and seeding rate on the morphological traits and yields in pea cultivars of differing leaf types. *J. Agronomy & Crop Science* 181:215-222.
- van Kessel, C., and C. Hartley. 2000. Agricultural management of grain legumes: has it led to an increase in nitrogen fixation? *Field Crops Research* 65:165-181.
- Vocanson, A., J. Roger-Estrade, H. Boizard, and M.H. Jeuffroy. 2004. Is it better sowing pea in autumn to preserve soil structure? *In* T. Nemecek, et al. (ed.) Proc. International workshop on the methodology for environmental assessment of grain legumes. Agroscope and AEP, Zurich, Switzerland.
- Vocanson, A., and M.H. Jeuffroy. submitted in November 2005. Agronomic performance of different pea cultivars for various sowing periods and contrasting soil structures. *Agron. J.*
- Vocanson, A., M.H. Jeuffroy, and J. Roger-Estrade. 2006a. Effect of sowing date and cultivar on root system development in pea (*Pisum sativum* L.). *Plant Soil*, under press.

- Vocanson, A., J. Roger-Estrade, H. Boizard, and M.H. Jeuffroy. 2006b. Effects of soil structure on pea (*Pisum sativum* L.) root development according to sowing date and cultivar. *Plant Soil*, under press.
- Voisin, A.S., C. Salon, N. Munier-Jolain, and B. Ney. 2002. Quantitative effects of soil nitrate, growth potential and phenology on symbiotic nitrogen fixation of pea (*Pisum sativum* L.). *Plant Soil* 243:31-42.
- Yin, X., J. Goudriaan, E.A. Lantinga, J. Vos, and H.J. Spiertz. 2003. A flexible sigmoid function of determinate growth. *Ann. Bot.* 91:361-371.
- Zary, K.W., J.C. Miller, R.W. Weaver, and L.W. Barnes. 1978. Intraspecific variability for nitrogen fixation in Southernpea (*Vigna unguiculata* (L.) Walp). *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 103:806-808.

PARTIE II :

**Modélisation du fonctionnement
d'une culture de pois semée à
l'automne et au printemps :
intégration de l'effet de l'état
structural, de la période de semis et
du type variétal**

1. Introduction

Dans la littérature, de nombreux modèles de culture existent, les plus connus étant adaptés à plusieurs cultures : CERES (IBSNAT, 1990), les modèles GRO (Hoogenboom et al., 1992), STICS (Brisson et al., 1998, 2002, Corre-Hellou, 2005), AZODYN (Jeuffroy et Recous, 1999), APSIM (Keating et al., 2003), SUCROS (Ittersum et al., 2003), DAISY (Hansen et al., 1991). Ces modèles simulent, à pas de temps généralement journalier, à l'échelle de la parcelle et en fonction des conditions pédo-climatiques, la croissance et le développement aérien et souvent racinaire, la dynamique de fourniture en azote dans le sol et l'évolution de l'accumulation d'azote dans la culture. Ils possèdent tous des fonctions permettant de simuler les conséquences d'états de nutrition azotée variés sur la croissance et la production. Ils ont également un module hydrique simulant l'évolution de la réserve en eau du sol et son effet sur le fonctionnement de la culture. A la récolte, ces modèles prédisent le rendement (et parfois ses composantes) et la qualité des produits récoltés (teneur en protéines ou en lipides, selon l'espèce). Si les variables d'état simulées sont généralement les mêmes pour ces différents modèles, ils diffèrent par la nature de leurs données d'entrée, les techniques culturales considérées (densité, espace entre rangs), les formalismes utilisés pour rendre compte des processus physiologiques déterminants dans la production, et le nombre et la nature des paramètres utilisés.

Dans l'objectif de déterminer les caractéristiques que doivent avoir les nouvelles variétés de pois d'hiver pour présenter des intérêts agronomiques et environnementaux ainsi que les situations culturales adaptées à ces nouveaux géotypes, nous avons choisi d'utiliser un modèle de culture, appelé AFISOL dans la suite du rapport. Le modèle AFILA, issu d'une collaboration INRA-UNIP depuis 1993 (référence de la convention : UNIP : n°388 ; J. Lecoœur, com. pers. ; Biarnès et al., 2004b), simule le développement et la croissance des parties aériennes et racinaires d'une culture de pois en fonction des conditions climatiques, à pas de temps journalier et à l'échelle de la parcelle. Il a été paramétré pour des variétés et des conditions de culture françaises. Son domaine de validité est limité aux variétés et aux semis de printemps. Il rend compte des effets de stress hydriques et thermiques. Nous avons choisi d'utiliser AFILA comme modèle de départ pour deux raisons. D'une part, ce modèle était reconnu et déjà utilisé par l'UNIP, futur utilisateur de ce travail. D'autre part, AFILA était le seul modèle déjà paramétré sur pois dans des conditions françaises, disponible en début de thèse et ses équations étaient simples et accessibles : STICS (Brisson et al., 2002, 2003) a été paramétré pour un grand nombre de céréales (blé, orge), de cultures maraîchères (carotte, salade) et quelques légumineuses (soja, sorgho, luzerne), les modèles de type CERES ont été essentiellement développés pour le maïs (Jones et Kiniry, 1986), le colza (Gabrielle et al., 1998) et le tournesol (Villalobos et al., 1996), les modèles de type GRO ont été mis au point pour quelques légumineuses comme le soja, le haricot (Boote et al., 1998), la féverole (Boote et al., 2002) et le pois chiche (Singh and Virmani, 1996). Cependant, AFILA ne rend pas compte des effets de compaction du sol, facteur auquel la culture de pois est très sensible (Crozat et al., 1992 ; Doré et al., 1998) et susceptible d'expliquer des différences de rendement entre périodes de semis (Partie 1). De plus, comme l'a mis en évidence Doré (1998), un état structural tassé peut être à l'origine d'une carence azotée et avoir des conséquences importantes sur le rendement, d'où la nécessité de prendre en compte ce facteur également dans le modèle, ce qui n'est pas le cas dans la version actuelle d'AFILA. Il faudrait également rajouter qu'AFILA ne simule pas la part d'azote accumulée par la culture provenant de la fixation, or ceci est nécessaire pour évaluer les impacts des différentes variétés sur le bilan azoté de la culture (notamment le reliquat d'azote minéral du sol après culture). Il apparaît donc nécessaire de compléter ce modèle, afin qu'il simule les effets de l'état structural, de la période de semis et de la variété sur la production quantitative et qualitative, ainsi que sur le bilan azoté d'une culture de pois.

Nos objectifs ont donc été :

- de compléter et modifier AFILA afin qu'il simule les effets d'états structuraux du sol variés, de période de carences azotées, de la date de semis et de la variété sur la production qualitative et quantitative et sur le bilan azoté d'une culture de pois, en incluant un module simulant la part de l'azote de la culture provenant de la fixation et de l'assimilation,
- d'évaluer le modèle AFILA, dans le but d'en faire un outil pour aider les sélectionneurs à déterminer certains caractères d'intérêt des nouvelles variétés de pois d'hiver en quantifiant d'autres critères que ceux utilisés habituellement (risques climatiques, stabilité des rendement, structure du sol, date de semis) et à identifier les conditions pédo-climatiques dans lesquelles les nouvelles variétés de pois d'hiver pourraient présenter un intérêt en terme de potentiel et de stabilité du rendement, ainsi que de respect de l'environnement.

Les modifications apportées au modèle ont été faites avec le souci d'avoir des variables d'entrée faciles d'accès pour les futurs utilisateurs et des paramètres en nombre limité et directement mesurables, en particulier ceux correspondant aux caractéristiques variétales comme l'ont proposé Jeuffroy et al. (2006). Pour garantir ce résultat, nous avons organisé, au cours de la construction du modèle, des discussions régulières avec les deux types d'utilisateurs, sélectionneurs et agents de l'UNIP.

2. Description des bases de données et des méthodes statistiques utilisées pour mettre au point et évaluer le modèle

2.1. Bases de données

2.1.1. Objectif de chaque base de données

Les essais réalisés à Grignon en 2002-2003 et 2003-2004, déjà présentés dans les quatre articles de la partie 1, ainsi que d'autres d'expérimentations complémentaires réalisées antérieurement (Tableau II.1) ont servi à établir les formalismes manquants et à estimer certains paramètres du modèle.

Les essais de Mons en 2002-2003 et 2003-2004 (également décrits dans la partie 1) ont été utilisés pour l'évaluation du modèle. Dans la suite de cette partie, exp.3 et exp.4 désigneront les campagnes expérimentales menées en 2002-2003 et 2003-2004 à Mons, respectivement (partie 1) ; UC et C signifieront état structural du sol non tassé et tassé, respectivement (partie 1) ; D1, D2 et D3 représenteront des semis d'octobre, novembre et février-mars, respectivement.

2.1.2. Informations et mesures et complémentaires

A Grignon en 2002-2003 et 2003-2004, sur les traitements UC D1 Hr200, UC D2 Cheyenne et Hr200, UC D3 Baccara et Cheyenne, C D3 Cheyenne (sauf en 2003-2004), des mesures de surfaces foliaires ont été réalisées entre levée et début floraison, à chaque date de prélèvement présentée dans la partie 1. Pour ces traitements, dans l'échantillon prélevé pour le suivi de biomasse, dix plantes ont été prises au hasard. Sur chaque plante, les tiges ont été séparées des stipules et des vrilles. Ces deux derniers organes ont été passés au planimètre à rouleau (Li-cor, model Li-3000) afin de déterminer leur surface foliaire (SF10 plantes). Puis les tiges, stipules et feuilles de ces 10 plantes ont été séchées pendant 48h à 80°C et pesées séparément du reste de l'échantillon (Mstotale10 plantes).

Tableau II.1. Présentation et source des essais complémentaires utilisés pour établir certaines relations du modèle.

Source et lieu	Année	Variété	Spécificité	Utilisation
UNIP				
Bernienville (27)	2003	Athos		LAI=f(Qnc)
		Hardy		LAI=f(Qnc)
Epieds (41)	2003	Athos		LAI=f(Qnc)
Boigneville (91)	2001	Cheyenne		LAI=f(Qnc)
Burey (27)	2001	Cheyenne		LAI=f(Qnc)
Etoile (69)	2000			LAI=f(Qnc)
Mons (80)	2001			LAI=f(Qnc)
Novion	2001			LAI=f(Qnc)
Villiers	2001			LAI=f(Qnc)
INRA Dijon				
	1994	Solara		Courbe maximale
		Frisson		Courbe maximale
	1996	Solara		Courbe maximale
		Frisson		Courbe maximale
	1997	Lignée non nodulante P2	3 types d'apport d'azote au semis : 50, 250 et 500 N	MS/MSmax=f(INN) et courbe maximale
	1997	Frisson	2 types d'apport d'azote au semis : 0 et 250 N	MS/MSmax=f(INN) et courbe maximale
	2000	Baccara	4 types d'apport d'azote au semis : 0, 100, 200 et 400 N	MS/MSmax=f(INN) et courbe maximale
INRA Grignon				
		Solara		Calibration Ngunit
(B. Ney, com. pers., cité par Maltas, 2002)		Frisson		Calibration Ngunit

L'indice foliaire (Leaf Area Index, LAI) a ensuite été calculé de la façon suivante :

$$\text{LAI} = \text{SF}_{10 \text{ plantes}} \times \text{Mstotaleplacette} / \text{Mstotale10 plantes} / \text{Splacette}$$

avec Splacette, la surface au sol de la placette prélevée (0.86 m²) et MStotaleplacette, la biomasse totale de la placette prélevée (après avoir inclus la biomasse des 10 plantes).

2.2. Méthodes statistiques et évaluation du modèle

2.2.1. Evaluation des paramètres des équations du modèle

Toutes les analyses statistiques (régressions linéaires et non linéaires, procédure GLM et REGNL, respectivement) ont été réalisées avec le logiciel SAS (SAS, 1987).

Afin de tester l'existence d'un effet significatif de la variété sur certains paramètres du modèle, le test F a été utilisé (Borel et al., 1997) :

$$F = \frac{\text{abs}(\text{SSc} - \sum \text{SSi}) / ((n - 1) \times k)}{\sum \text{SSi} / (\text{Ndata} - k)}$$

suivant une loi de Fisher à (n - 1) x k et (Ndata - k) degrés de liberté, avec SSc, la somme des carrés des écarts de l'ajustement global de l'ensemble des variétés, $\sum \text{SSi}$, la somme des carrés des écarts de l'ajustement individuel de chaque variété au modèle général, n, le nombre de régressions individuels, k, le nombre de paramètres ajustés dans chaque régression et Ndata, le nombre total de données.

2.2.2. Précision d'estimation

La qualité prédictive du modèle a été estimée par la RMSEP (Root Mean Square Error of Prediction, Wallach et Gofinet, 1987), la RRMSEP (Relative Root Mean Square Error of Prediction) et le biais (Mean deviation : MD) :

$$\text{RMSEP} = \sqrt{(\sum (Y_{\text{sim}_i} - Y_{\text{obs}_i})^2 / n)}$$

avec Y_{sim_i} la valeur simulée par le modèle pour la situation i, Y_{obs_i} la valeur observée pour la situation i et n le nombre total d'observations,

$$\text{RRMSEP} = \text{RMSEP} / \text{MOYENNE}(Y_{\text{obs}_i})$$

Le biais correspond à la moyenne des différences entre valeurs simulées et observées :

$$\text{MD} = \sum (Y_{\text{sim}_i} - Y_{\text{obs}_i})$$

La qualité prédictive d'AFILA et d'AFISOL a été comparée sur les traitements non tassés.

2.2.3. Aptitude à classer les différents effets

a) Effet de l'état structural

Chaque année, trois traitements (D2 Cheyenne et Dove, D3 Baccara) ont été semés en sol tassé et non tassé. Pour chaque variable de sortie étudiée et pour chaque traitement, les valeurs observées des traitements tassé et non tassé ont été comparées.

b) Effet combiné date de semis, variété et conditions climatiques

Dans la partie 3, le modèle sera utilisé pour comparer différentes stratégies techniques (date de semis et type variétal) selon les régions et les caractéristiques des exploitations agricoles pour lesquelles le pois sera cultivé. Dans ce but, il est important que le modèle permette de classer correctement les différentes stratégies techniques simulées, ce qui n'est pas toujours relié à sa qualité prédictive et ne peut donc être jugé à travers ce seul critère (Barbottin, 2004 ; Zhang, 2005). Nous avons donc réalisé, dans cette partie, une évaluation de l'aptitude du modèle à classer correctement les traitements en fonction de la période de semis (et donc de la variété, en comparant les couples *a priori* les mieux adaptés) et des conditions climatiques, en comparant le classement observé avec le classement simulé par le modèle, au moyen d'un test de corrélation de rang (Charlot, 1978).

Pour la variable Y étudiée, les résultats observés sont classés par ordre croissant et on affecte chaque traitement d'un rang observé. Puis les valeurs de Y simulées sont, à leur tour, classées et on affecte, comme précédemment, chaque traitement d'un rang simulé. Enfin, les classements des traitements simulés et observés sont comparés par le calcul d'une variable synthétique L dont le calcul est présenté Tableau II.2.

L'hypothèse d'indépendance entre les deux variables est testée. Cette hypothèse est rejetée quand L dépasse une valeur seuil $L_{1-\alpha}$, telle qu'il existe une liaison entre les deux variables avec un risque d'erreur α . Une table donne les valeurs seuil de $L_{1-\alpha}$ telle que la $\text{Prob}[L < L_{1-\alpha}] = 1-\alpha$, avec $\alpha = 0.1\%$, 1% et 5% .

Tableau II.2. Exemple de test de rang sur le rendement.

1^{ère} étape :								
Classer les traitements observés par valeur croissante de rendement	Valeur observée	30	35	37	40	41		80
	Traitement	Exp.3 D	Exp.4 B	Exp.3 C	Exp.3 B	Exp.4 H		Exp.4 C
	Rang associé (ligne a)	1	2	3	4	5	p
2^{ème} étape :								
Classer les traitements simulés par valeur croissante de rendement	Valeurs simulée	25	28	30	35	50		85
	Rang précédent associé (ligne b)	3	2	5	8	P	...	1
	Traitement	Exp.3 C	Exp.4 B	Exp.4 H	Exp.4 D	Exp.4 C		Exp.3 D
3^{ème} étape :								
Calculer la variable synthétique L	Somme des rangs de la 1 ^{ère} et 2 ^{ème} étapes (a+b)	=1+3	=2+2	=3+5			=p+1
	(a+b) x a	=4 x 1	= 4 x 2				= (p+1) x p

La variable synthétique L est calculée par la somme des valeurs de la ligne grisée du tableau ci-dessus.

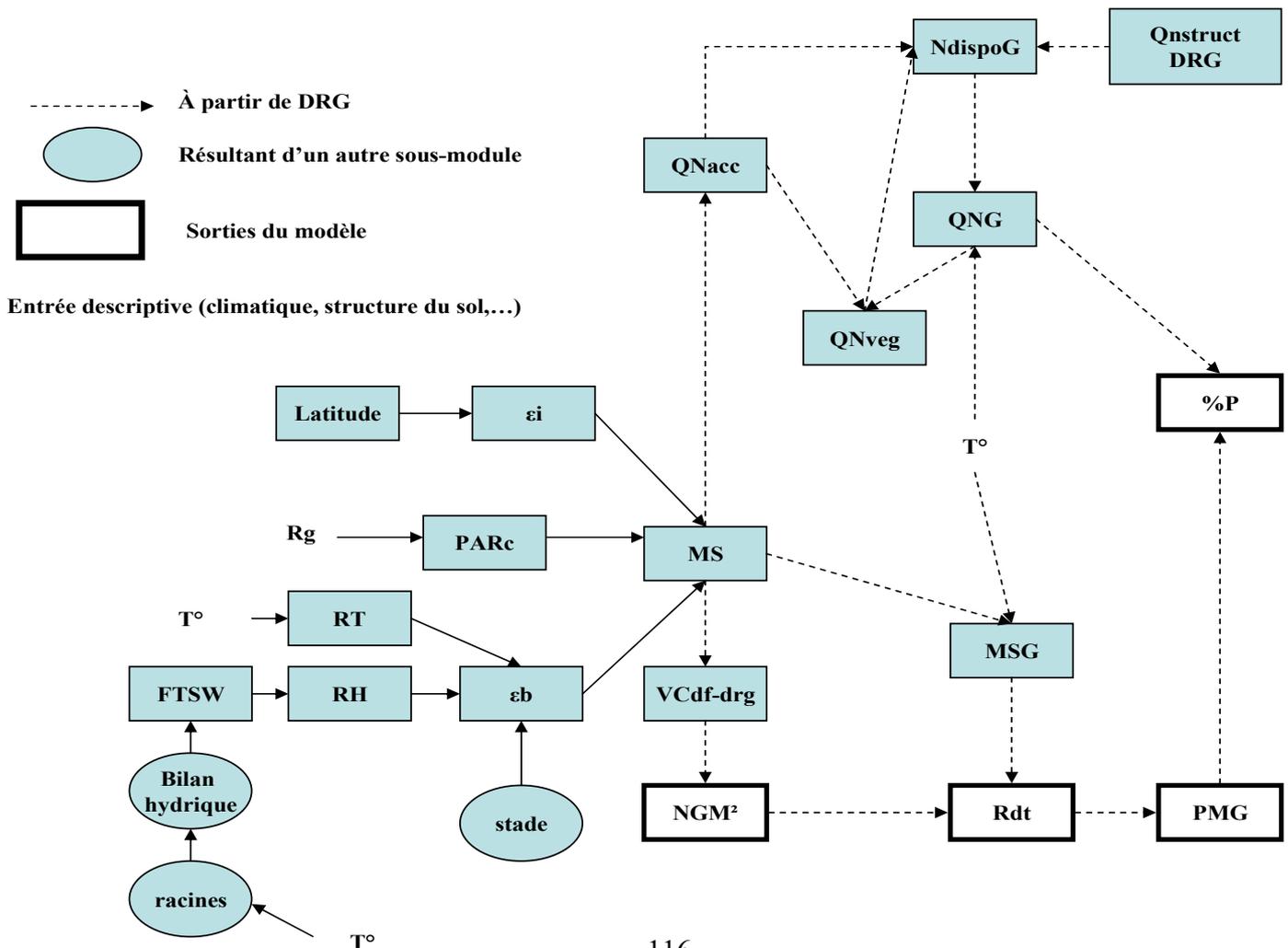
3. Description, adaptations et paramétrage du modèle

3.1. Caractéristiques générales et évolutions du modèle initial

AFILA (Figure II.1) est un modèle dynamique de culture simulant le fonctionnement d'une culture de pois, depuis la levée jusqu'à maturité, en fonction des conditions climatiques (J. Lecoeur, com. pers.). Le modèle AFILA possède un module sol permettant de simuler la disponibilité en eau pour la culture. Le module plante permet, quant à lui, de simuler uniquement les étapes de développement de la culture, la croissance aérienne (affectée par d'éventuels stress hydriques et thermiques), l'accumulation d'azote dans les parties aériennes de la culture (avec l'hypothèse que la nutrition azotée de la culture est toujours optimale, du fait de la capacité de la culture à fixer de l'azote atmosphérique de manière à couvrir ses besoins, donc la disponibilité en azote dans le sol n'est pas simulée), la formation des graines et l'accumulation de biomasse et d'azote dans ces dernières, sur la base d'une confrontation quotidienne entre offre et demande. Les sources et les puits d'azote et d'eau sont fonction du stade de développement de la culture (annexe 5).

Le travail que nous avons réalisé a eu pour objectif de modifier AFILA, afin d'intégrer les effets d'états de nutrition azotée, de périodes de semis (automne et printemps), d'états structuraux du sol et de types variétaux (pois de printemps, d'hiver hr et Hr) variés. Ce nouveau modèle a été appelé AFISOL. Pour alléger la présentation, nous avons renvoyé en annexes et dans des encadrés la description des formalismes des modules existant initialement dans le modèle AFILA pour détailler, dans le texte, essentiellement les modules ayant été modifiés.

Figure II.1. Schéma récapitulatif de fonctionnement des sous-modules croissance, accumulation d'azote et élaboration du rendement d'AFILA.



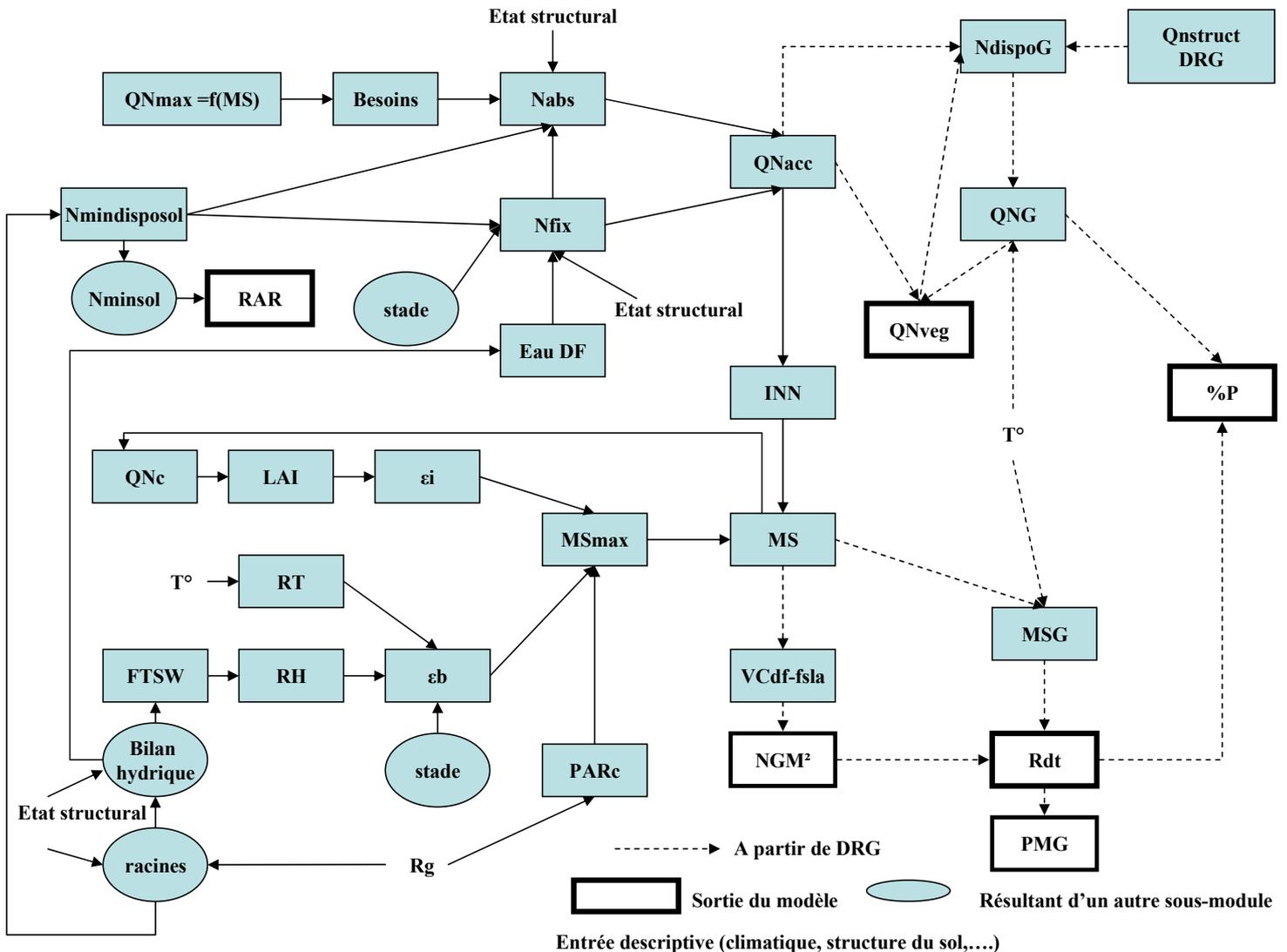
AFISOL (Figure II.2) est divisé en un module plante et un module sol.

Le module sol est divisé en deux sous-modules. Le sous-module hydrique est directement repris d'AFILA (Annexe 6). Un sous-module azote-sol a été ajouté pour simuler la disponibilité d'azote minéral du sol (Annexe 7). Il provient du module sol d'AZODYN (Jeuffroy et Recous, 1999) : chaque jour, en fonction des données climatiques et techniques (date de semis, dates et doses d'irrigation), le module sol quantifie les quantités d'eau et d'azote minéral disponibles pour la culture, ce qui détermine l'offre.

Le module plante est divisé en cinq sous-modules. Le sous-module développement simule l'évolution des stades de la culture. Le sous-module croissance aérienne quantifie l'augmentation quotidienne de biomasse en fonction du rayonnement intercepté et de la température, en tenant compte des stress hydriques, thermiques et azotés. Le sous-module azote-plante simule les besoins en azote de la culture, la quantité d'azote accumulé dans la culture et la part provenant de la fixation symbiotique en fonction de son stade, de la disponibilité en eau et de la quantité d'azote minéral du sol. Le sous-module enracinement quantifie l'évolution de la profondeur d'enracinement afin de déterminer la zone de sol explorée par les racines, nécessaire pour déterminer la disponibilité d'eau et d'azote dans le sol. A partir du stade fin du seuil limite d'avortement (FSLA), le sous-module rendement et qualité simule les flux de carbone et d'azote des parties végétatives vers les graines.

Les modifications apportées à AFILA ont été faites de façon à ce que les variables d'entrée et les paramètres supplémentaires restent en nombre limité et facilement accessibles pour des futurs utilisateurs.

Figure II.2. Schéma récapitulatif de fonctionnement des sous-modules croissance, accumulation d'azote et élaboration du rendement d'AFISOL.



3.2. Module plante

Le Tableau II.3 présente les principaux paramètres variétaux. L'annexe 8 résume les effets pris en compte par le modèle dans les différents modules.

3.2.1. Sous-module développement

a) Levée

La levée a lieu lorsque la somme des températures depuis semis (base 0°C, Etévé and Derieux, 1982) est de 150 degrés-jours (dj) pour les variétés de printemps (initialement dans AFILA) et 200 dj pour les variétés d'hiver (V. Biarnès, com. pers.).

b) Initiation florale

La simulation de l'initiation florale (IF) a été ajoutée dans le but de déterminer les risques de gel en fonction des dates de semis. D'après Lejeune-Hénaut et al. (1999), la durée entre levée et IF est de 150 dj pour pois de printemps et 250 dj pour pois d'hiver hr. Pour les variétés Hr actuelles, l'initiation florale a lieu pour une durée du jour de 13h30 (Lejeune-Hénaut et al., 2004). La durée du jour est calculée par le modèle (annexe 9).

Tableau II.3. Valeurs des principaux paramètres variétaux utilisés dans AFISOL.

Paramètres	Pois de printemps	Pois d'hiver
<i>Sous-module développement</i>		
Durée de la phase semis-levée (dj)	150	200
Durée de la phase levée-IF (dj)	150	200
Durée de la phase DF-DRG (dj)	265	300
<i>Sous-module croissance</i>		
ϵ_{imax}	0.931	0.983
k	0.57	
β (relation LAI = f(QNc))	0.0028	
ϵ_{bv}	2.63	
ϵ_{br}	4.34	
<i>Sous-module accumulation d'azote</i>		
Nstruct (%)	0.72	
<i>Sous-module rendement et qualité</i>		
NIGfsla (%)	4.2	

c) Début floraison

Un modèle précis de prévision de la date de début floraison (DF), pour le pois de printemps, a été proposé par Roche et al. (1999). Ce modèle, ainsi que d'autres proposés dans la littérature, ont été testés par Maltas (2002) pour une gamme de variétés de pois de printemps et d'hiver. Les résultats ont montré que le meilleur modèle testé prédisait DF avec une précision de 16 jours, ce qui est supérieur à la gamme de variation observée pour une région, une date de semis et une variété données (maximum 10 jours, V. Biarnès, com. pers.) et n'est donc pas suffisamment précis pour notre modèle. Par ailleurs, Roche et al. (1999) a montré que la date de DF était peu variable entre années pour une variété et une même date de semis dans une région donnée. En conséquence, pour utiliser le modèle, la date de DF est soit une donnée d'entrée (cette donnée étant souvent observée), soit simulé dans un tableau de contingence, en fonction de la région, de la date de semis et de la variété (ce qui sera le cas dans la partie 3). Ce choix a été conforté par le fait que les nouvelles variétés de pois d'hiver, actuellement en cours de sélection, sont réactives à la photopériode et ont donc une initiation florale et un début de floraison très stables quelle que soit la date de semis.

d) Début de remplissage des graines

Ce stade début de remplissage des graines (DRG) est atteint lorsque la somme des températures (base 0°C) après DF est de 265 dj pour les variétés de pois de printemps (Dumoulin et al., 1994) (initialement dans AFILA) et de 300 dj pour les pois d'hiver (V. Biarnès, com. pers.).

e) Fin du seuil limite d'avortement des graines

La fin du seuil limite d'avortement (FSLA) est fonction du type variétal et peut être calculé comme suit :

$$\text{stfsla} = \text{stdrg} + (\text{NETpot} - 1) \times \text{vdrg}$$

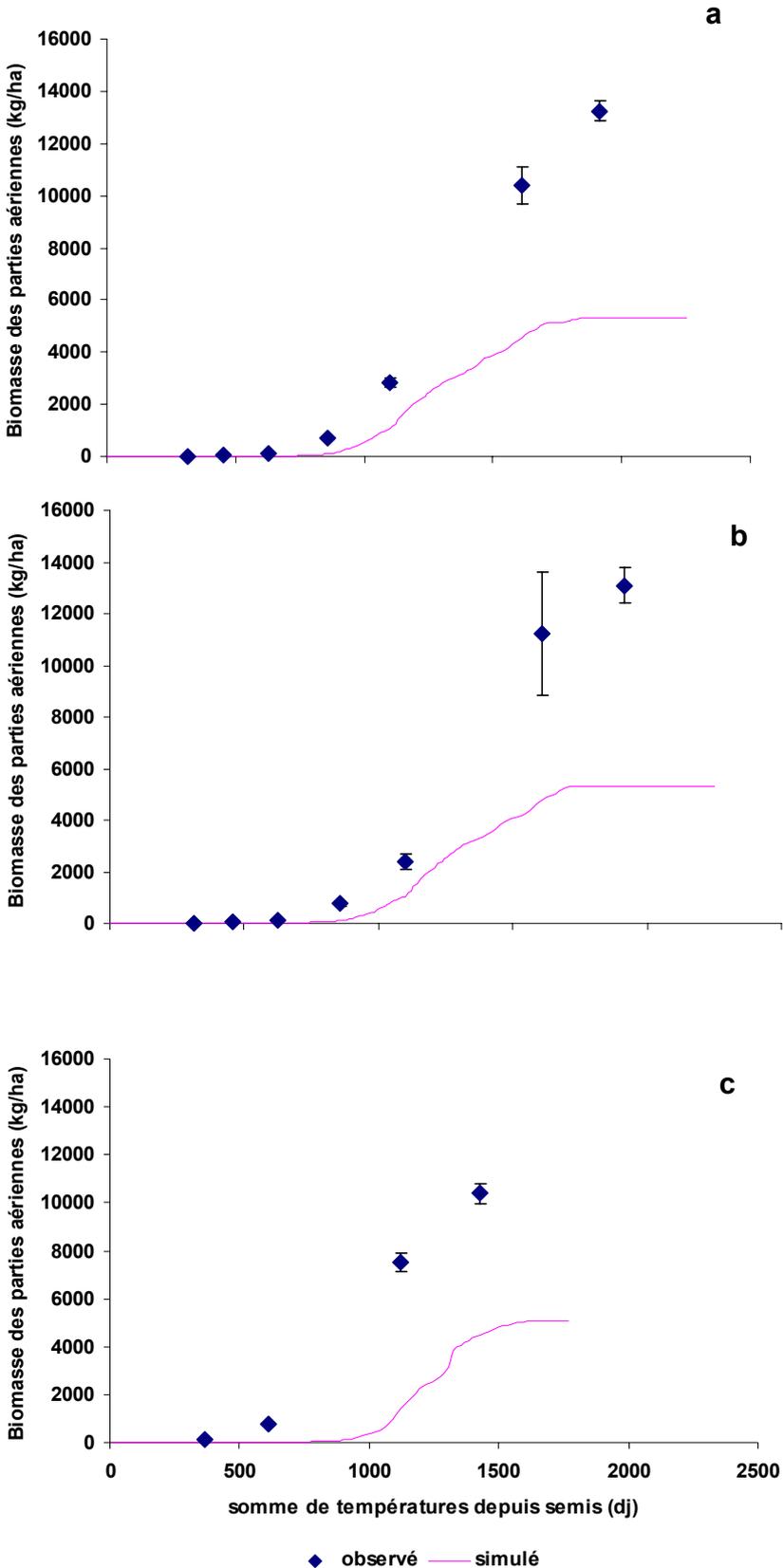
stdrg et stfsla correspondent à la somme des températures (base 0°C) entre respectivement levée et DRG et levée et FSLA, NETpot est le nombre d'étages reproducteurs potentiel (donnée d'entrée, fonction de la variété) et vdrg est la durée entre l'occurrence du stade DRG sur deux étages successifs de la tige (valeur de 30 dj, Biarnès et al., 2004b, initialement dans AFILA). La date de FSLA obtenue est une date potentielle, ne prenant pas en compte la variabilité éventuelle du nombre d'étages reproducteurs du fait d'éventuels stress en cours de culture.

f) Maturité physiologique

Dans AFILA, le stade maturité physiologique (MP) est atteint :

- (1) si la teneur en azote des parties végétatives de la culture devient inférieure à une valeur de référence de 0,72% (Lhuillier-Soundélé et al., 1999a), qui représente le pourcentage d'azote structural de la culture et donc non remobilisable pour les graines. D'après Na. Munier-Jolain (com. pers.), cette valeur est très instable et dépend principalement du type d'organe (feuille, tige, cosse) et du niveau de nutrition azotée. Toutefois, en absence d'autres références, cette valeur a été utilisée,
- (2) si le poids moyen d'une graine potentiel (P1Gpot, donnée d'entrée fonction de la variété) est atteint.

Figure II.3. Comparaison de cinétiques d'accumulation de biomasse observées et simulées par AFILA en état structural non tassé à Mons pour Cheyenne (a) et Dove (b) pour un semis du 20/11/03 et pour Baccara (c) pour un semis du 04/03/04. Les barres verticales sont les écart-types des valeurs observées.



Par rapport à AFILA, deux conditions supplémentaires ont été prises en compte pour déterminer ce stade :

- (1) lorsque l'accumulation de biomasse dans les graines s'arrête, par exemple du fait de contraintes hydriques et/ou thermiques (Munier-Jolain, 2004),
- (2) lorsque la durée maximum de la phase FSLA-MP est atteinte (valeur moyenne de 400 dj, base 0°C, Chaillet et Biarnès, 2004).

3.2.2. *Sous-module croissance*

a) *Formalisme général*

Dans AFILA, la quantité de biomasse accumulée chaque jour dans la culture ($\Delta MS(j)$) est estimée d'après l'approche énergétique de Monteith (1977):

$$\Delta MS(j) = \epsilon_c \times \epsilon_i(j) \times \epsilon_b(j) \times R_g(j)$$

avec ϵ_c , la part du rayonnement global photosynthétiquement active, appelée efficacité climatique. d'après Varlet-Grancher et al. (1989), sa valeur est de 0,48 dans les régions de climat tempéré,

$\epsilon_i(j)$, la part du rayonnement interceptée par le couvert végétal, appelée efficacité d'interception, qui est fonction de la surface foliaire,

$\epsilon_b(j)$, la part de l'énergie absorbée effectivement fixée sous forme organique par la culture, appelée efficacité biologique,

$R_g(j)$, le rayonnement incident (donnée climatique).

Les premières évaluations d'AFILA ont mis en évidence une incapacité de ce modèle à rendre compte correctement de l'accumulation de biomasse dans la culture en semis d'automne (Figure II.3), ce qui nous a conduit à modifier ce module.

b) *Modélisation de $\epsilon_i(j)$*

Dans AFILA, $\epsilon_i(j)$ est une fonction logistique dépendant de la somme de degrés-jours depuis la levée et de la durée du jour le jour de la levée. Coque et Willaume (2002) ont mis en évidence que cet ajustement n'était valable qu'en fortes densités et pour des semis de printemps, justifiant une adaptation de ce module pour prendre en compte des périodes variées de semis. Nous avons alors proposé de simuler l'évolution de l'indice foliaire et, en fonction de celui-ci, l'efficacité d'interception.

Chez la luzerne (Lemaire et Gastal, 1997), le blé (Justes et al., 1994), le colza (Vogrincic, 2000), pendant la phase végétative, une relation stable a été mise en évidence entre l'indice foliaire de la culture et la quantité d'azote dans les parties aériennes, à l'optimum de nutrition azotée. Nous avons testé et adapté ce formalisme sur pois. Ainsi, l'indice foliaire est estimé en fonction de la quantité d'azote critique, calculée à partir de la biomasse aérienne (MS , t ha⁻¹) de la culture et de la courbe critique établie pour une culture de pois (Ney et al., 1997) :

$$\%Nc(j) = 5.08 \times MS(j)^{-0.32}$$

$$QNc(j) = 5.08 \times MS(j)^{0.68} \times 1000$$

et

$$LAI(j) = \beta \times QNc(j)$$

Puis, l'efficacité d'interception, $\epsilon_i(j)$, est calculée à partir de la relation établie par Varlet-Grancher et al. (1989) :

$$\epsilon_i(j) = \epsilon_{\max} \times (1 - \exp(-k \times \text{LAI}(j)))$$

avec ϵ_{\max} , l'efficacité d'interception maximale, fonction du type de variété (printemps : valeur de 0.931, Ney, 1994 ; hiver : valeur de 0.983, Brun, 2002),

k, le coefficient d'extinction de la culture (valeur de 0,57, Ney, 1994).

β a été paramétré sur des expérimentations de Grignon et sur un jeu de données fourni par l'UNIP (Tableau II.1), pour des variétés de type printemps et hiver. La valeur de β estimée est de 0.028 (Figure II.4, $r^2=0.91$).

Le test proposé par Borel et al. (1997) n'a pas mis en évidence d'effet significatif du type de pois sur la valeur du coefficient de régression (Tableau II.4).

Figure II.4. Relation entre quantité d'azote critique dans la culture (QNc, kgN ha⁻¹) et indice foliaire (LAI, m²/m²sol) en fonction du type variétale de pois : printemps ou hiver) entre les stades levée et début floraison.

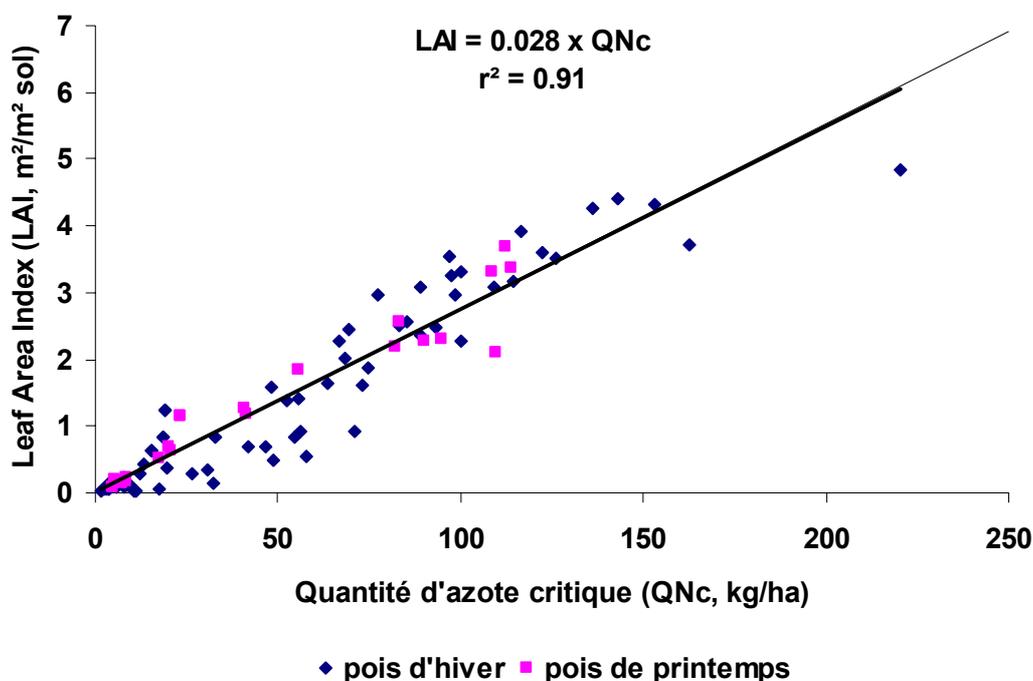


Tableau II.4. Résultats du test F sur l'effet du type de pois (printemps : pp ou hiver : ph) sur le coefficient de régression (β) entre la quantité d'azote critique (QNc, kg/ha) et l'indice foliaire (LAI) d'une culture de pois.

Type de pois	Nombre de données	Valeurs	R ² partiels	Test F
Pois de printemps	74	0.030	0.91	0.09
Pois d'hiver hr	22	0.026	0.92	

A partir de DRG ou d'une teneur en azote des parties végétatives inférieure à 3%, on considère, dans AFILA, que la remobilisation de l'azote des parties végétatives vers les graines contribue à réduire $\epsilon_i(j)$:

$$\epsilon_i(j) = \epsilon_{\text{imax}} \times (1 - \exp(-k \times \text{LAI}(j)) \times (\text{Nveg}(j) - \text{Nstruct}) / (3 - \text{Nstruct}))$$

avec $\text{Nveg}(j)$, la teneur en azote des parties végétatives (%) et Nstruct , la teneur en azote minimale des parties végétatives (valeur de 0.72%, comme vu précédemment).

c) Modélisation de $\epsilon_{\text{pot}}(j)$

Dans AFILA, $\epsilon_{\text{pot}}(j)$ évolue au cours du temps en fonction des stades de développement de la culture :

$$\text{avant DF : } \epsilon_{\text{pot}}(j) = \epsilon_{\text{bv}},$$

$$\text{entre DF et DRG : } \epsilon_{\text{pot}}(j) = \epsilon_{\text{bv}} + (\epsilon_{\text{bv}} - \epsilon_{\text{br}}) \times \text{stapdf} / \text{stdf-drg},$$

$$\text{après DRG : } \epsilon_{\text{pot}}(j) = \max(0 ; \min(\epsilon_{\text{br}} ; \epsilon_{\text{br}} \times (\text{Nveg}(j) - \text{Nstruct}) / (3 - \text{Nstruct}))$$

avec $\text{Nveg}(j)$, la teneur en azote des parties végétatives (%) et Nstruct , la teneur en azote minimale des parties végétatives,

stapdf , la somme des températures (base 0°C) à partir de DF (dj),

stdf-drg , la somme des températures entre DF et DRG (dj).

Les deux valeurs considérées initialement dans AFILA pour ϵ_{bv} (= 2) et pour ϵ_{br} (= 3.5) étaient faibles par rapport à d'autres valeurs disponibles dans la littérature (Jeuffroy et Ney, 1997; Lecoeur et Ney, 2003) ; Na. Munier-Jolain, com. pers.). Nous avons donc choisi d'utiliser les valeurs maximales observées en phases végétative et reproductive par Lecoeur et Ney (2003) : ϵ_{bv} égal à 2.63 et ϵ_{br} à 4.34.

d) Prise en compte de l'effet des stress

➤ Hydrique et thermique (initialement dans AFILA)

Dans le but de simuler une réduction de la croissance aérienne en cas de stress hydriques ou thermiques, deux fonctions, respectivement $\text{RH}(j)$ pour le stress hydrique et $\text{RT}(j)$ pour les fortes températures, modifient, dans AFILA, la valeur de ϵ_{pot} calculée auparavant :

$$\epsilon_{\text{b}}(j) = \epsilon_{\text{pot}}(j) \times \text{RH}(j) \times \text{RT}(j)$$

Le facteur $\text{RH}(j)$ est celui proposé dans AFILA par Lecoeur et Sinclair (1996) et reparamétré par Béraud (com. pers.):

$$\text{RH}(j) = 1.05 / (1 + 4.5 \times \exp(-9 \times \text{FTSW}(j) - 0.0085))$$

avec $\text{FTSW}(j)$, la fraction d'eau du sol transpirable par la culture le jour j , variable calculée dans le module hydrique (voir description du module hydrique, annexe 6).

Pour $\text{RT}(j)$, seule une fonction réduisant ϵ_{b} en cas de températures supérieures à 18°C avait été incluse dans AFILA (Guilioni, 1997). Cependant, l'effet de températures faibles sur ϵ_{b} , mis en évidence par Stanfield et al. (1966), est indispensable à prendre en compte pour rendre compte de la croissance en hiver. La relation proposée par Guilioni (1997) a été ajustée sur les données de Stanfield et al. (1966) présentant des températures allant jusqu'à 5°C. L'équation proposée initialement a donc été complétée dans la gamme 0-18°C, en ajoutant l'hypothèse que ϵ_{b} était nul pour des températures inférieures à 0°C (Maltas, 2002). Le formalisme retenu est donc :

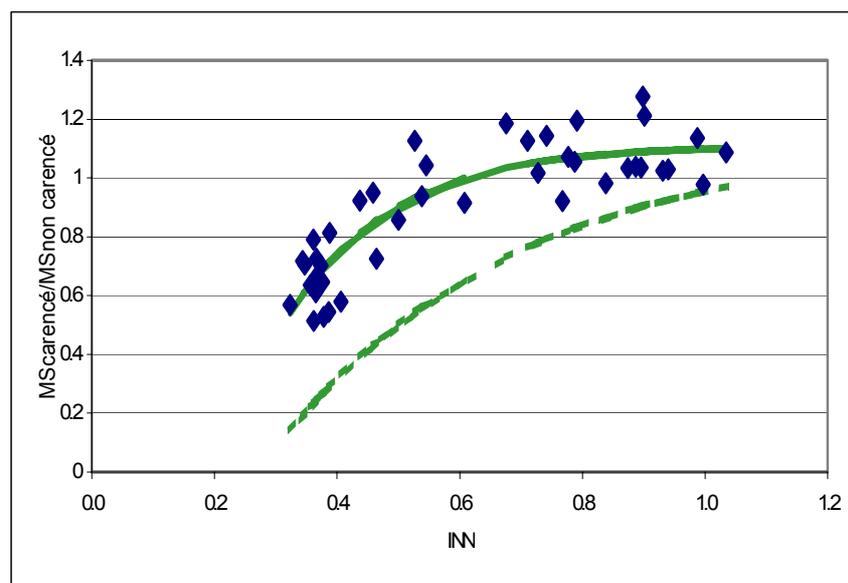
$$\begin{aligned}
 &\text{si } T_{\text{moy}}(j) \leq 0^\circ\text{C, alors } RT(j) = 0, \\
 &\text{si } T_{\text{moy}}(j) > 0^\circ\text{C, alors} \\
 RT(j) &= 0.443 + (0.765 / (1 + \exp(-(T_{\text{moy}}(j) - 16.762 + 8.81/2) / 4.712))) \times (1 - 1 / (1 + \exp(-(T_{\text{moy}} - 16.762 - 8.81/2) / 1.596)))
 \end{aligned}$$

➤ Azoté

Malgré la capacité d'une culture de pois à fixer de l'azote, les situations de carence azotée ne sont pas rares au champ (Doré, 1992). Or, sur de nombreuses espèces, une carence azotée réduit le fonctionnement carboné de la culture et donc la croissance aérienne (Colnenne et al., 1998 sur colza, Plénet et Cruz, 1997 sur maïs, Sinclair et De Witt, 1976 sur soja). La relation proposée par Bélanger et al. (1992) sur fêtuque entre l'état de nutrition azotée de la culture (caractérisé par l'indice de nutrition azoté : INN) et l'accroissement de biomasse a été paramétrée pour une culture de pois, à partir d'un jeu de données de l'INRA de Dijon (Tableau II.1). Ces données correspondent à des mesures de biomasse et de quantité d'azote dans les parties aériennes, réalisées une fois par semaine de levée à maturité, sur des essais variant par la variété, l'application d'azote et l'année. Pour chacune des trois variétés (P2, mutant non fixateur, Frisson et Baccara), le traitement ayant reçu le plus grand apport d'azote au semis (respectivement 500N, 250N et 400N) a été considéré comme non carencé et a été utilisé comme référence (MS traitement non carencé, MSmax). Pour les traitements « carencés », l'INN a été calculé à partir des mesures de teneur en azote et de biomasse des parties aériennes (MS), en utilisant la courbe critique du pois (Ney et al., 1997). La réduction de croissance liée à une carence azotée a été quantifiée par l'équation (Figure II.5, Vocanson et al., 2004a) :

$$MS/MS_{\text{max}} = 1.11 \times (1 - 3.35 \times \exp(-5.80 \times \text{INN})) \quad (r^2=0.88)$$

Figure II.5. Relation entre la perte de matière sèche aérienne (MS du traitement carencé en azote/MS du traitement non carencé) à une date t et l'Indice de nutrition azotée (INN) du traitement à cette même date. Les losanges représentent les points expérimentaux utilisés pour le paramétrage de la relation. Le trait continu correspond à la relation pour le pois (MS/MSmax = 1.11 x (1 - 3.35 x (exp(-5.80 x INN))), r²=0.88, par Vocanson et al., 2004), le trait pointillé à la relation établie pour la fêtuque (MS/MSmax = 1.13 x (1 - 2.01 x (exp(-2.57 x INN))) par Bélanger et al., 1992).



3.2.3. Sous-module accumulation d'azote

Dans AFILA, la nutrition azotée de la culture était considérée comme optimale, et donc l'accumulation d'azote dans la culture (sans différenciation entre les sources d'azote) était égale aux besoins en azote de la culture, définis à partir de la courbe critique. Les modifications apportées dans AFISOL ont d'une part consisté à séparer la part d'azote accumulé dans la plante issue de la fixation et celle issue de l'assimilation d'azote minéral du sol. De plus, nous avons pris en compte le fait que l'état structural et la date de semis étaient susceptibles d'avoir un effet sur ces deux modes d'accumulation d'azote.

a) Besoins en azote de la culture

Les besoins quotidiens en azote de la culture ($DN(j)$, $kgN\ ha^{-1}$) sont calculés en fonction de sa capacité maximale à accumuler de l'azote ($\Delta QN_{max}(j)$) et d'une vitesse maximale d'accumulation d'azote (V_{max}). Dans le modèle, pour des températures supérieures à $0^{\circ}C$, les besoins sont calculés comme suit :

$$\text{entre semis et DRG : } DN(j) = \text{MAX}(T^{\circ}(j) \times V_{max} ; \Delta QN_{max}(j))$$

$$\text{à partir de DRG : } DN(j) = T(j) \times V_{max}$$

avec $T(j)$, la température moyenne aérienne journalière (donnée climatique),

V_{max} , la vitesse maximale d'accumulation d'azote, paramètre estimé à $0.77\ kgN\ ha^{-1}\ dj^{-1}$ par Maltas (2002),

$\Delta QN_{max}(j)$, la quantité maximale d'azote accumulable le jour j , calculée à partir de la courbe maximale de dilution de l'azote mise au point pour le pois (Figure II.6, Vocanson et al., 2004b). Cette relation a été paramétrée sur une base de données de Dijon et Grignon, et selon la méthode décrite par Justes et al. (1994). Cette courbe est valable pour une biomasse supérieure à $1\ t\ ha^{-1}$ et jusqu'à DRG :

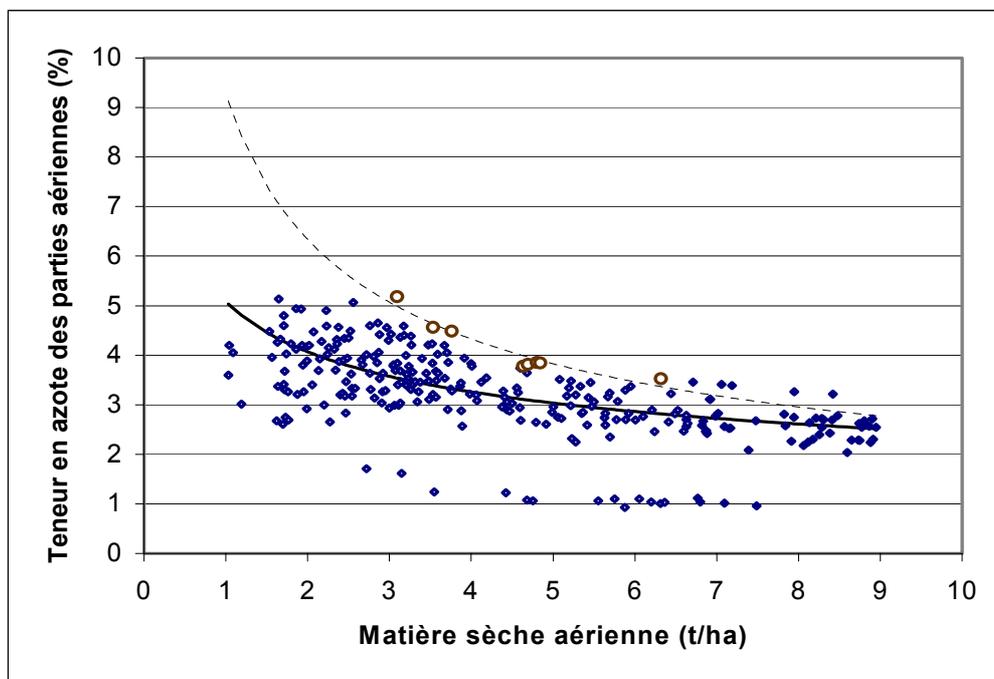
$$\%N_{max} = 9.28 \times MS^{-0.55} \quad (r^2=0.93)$$

avec $\%N_{max}$, la teneur en azote maximale des parties aériennes et MS la matière sèche aérienne de la culture ($t\ ha^{-1}$).

$$\text{Donc } \Delta QN_{max}(j) = [MS(j+1) \times \%N_{max}(j+1)] - [MS(j) \times \%N_{max}(j)]$$

Figure II.6. Courbe critique (trait plein) et courbe maximale (courbe pointillée) d'évolution de la teneur en azote d'une culture de pois : les losanges vides correspondent à des cultures en phase végétative (avant début floraison), les losanges pleins à des cultures en début de phase reproductive (entre début floraison et début de remplissage des graines), les ronds vides aux points expérimentaux ayant servi au paramétrage de la courbe maximale, selon la méthode proposée par Juste et al. (1994) :

$$\%N_{\max} = 9.28 \times MS^{-0.55} \quad (r^2=0.93)$$



b) Fixation

Dans AFISOL, le pourcentage d'azote fixé quotidiennement ($\%N_{\text{fixésol}}(j)$) varie en fonction de la disponibilité en azote dans la couche labourée ($N_{\text{min}}(j)$), estimée par le sous-module azote-sol, d'après les relations mises en évidence par Voisin (et al. 2002, 2002) :

$$\text{avant DF} : \%N_{\text{fixésol}}(j) = -2.96 \times N_{\text{min}}(j) + 142.77$$

$$\text{après DF} : \%N_{\text{fixésol}}(j) = -3.27 \times N_{\text{min}}(j) + 110.19$$

La quantité maximum d'azote fixé évolue également en fonction du stade de la culture :

$$\text{si } stl < 235 \text{ dj, alors } N_{\text{fixémax}}(j) = 0 \text{ (Voisin et al., 2002)}$$

$$\text{si } stl > 235 \text{ dj et stade} > \text{DRG, alors } N_{\text{fixémax}}(j) = (-0.0000357 \times stl + 0.05) \times \Delta MS(j) \text{ (Voisin et al., 2002)}$$

$$\text{si } \text{DRG} \leq \text{stade} < \text{FSLA, alors } N_{\text{fixémax}}(j) = 0.0119 \times \Delta MS(j) \text{ (Voisin et al., 2002)}$$

$$\text{si } \text{stade} \geq \text{FSLA, alors } N_{\text{fixémax}}(j) = 0 \text{ (Voisin et al., 2002)}$$

avec stl , la somme des températures (base 0°C) depuis la levée (dj),

$N_{\text{fixémax}}(j)$, la quantité d'azote fixé lorsque la fixation n'est pas limitée par l'azote minéral du sol (kg ha^{-1}),

et $\Delta MS(j)$, la quantité de matière sèche aérienne accumulée le jour j .

La fixation est aussi fonction de l'humidité du sol dans la couche où se situent les nodules (Croizat et al., 1991b). Jusqu'à DF, un stress hydrique réduit temporairement l'activité des nodules et son effet peut être négligé dans la mesure où la capacité de la plante à fabriquer de nouveaux nodules est élevée. En revanche, après ce stade, la concurrence avec les organes reproducteurs est telle qu'au delà de 7 jours de stress hydrique, le phénomène n'est plus réversible (C. Salon, com. pers.). Cet effet a donc été introduit dans le modèle de la façon suivante : si l'humidité dans la couche de sol contenant les nodules est, pendant plus de 7 jours, inférieure à la valeur de la réserve facilement utilisable, estimée dans le modèle au tiers de la réserve utile maximale, alors la part d'azote fixée par la culture est définitivement nulle.

Enfin, la quantité d'azote fixée est limitée par les besoins de la culture en azote.

Au final, la fixation ($N_{\text{fixé}}(j)$, kgN ha^{-1}) est la valeur minimale permise par les besoins de la culture, le stade de développement, la quantité d'azote minéral du sol et l'humidité du sol dans l'horizon avec nodules (uniquement à partir de DF).

c) Absorption

L'hypothèse est faite que la quantité d'azote absorbée quotidiennement par la culture ($N_{\text{abs}}(j)$, kgN ha^{-1}) est la différence entre les besoins de la culture ($DN(j)$, kg ha^{-1}) et la quantité d'azote fixée ($N_{\text{fixé}}(j)$, kgN ha^{-1}), si l'offre en azote du sol ($N_{\text{min}}(j)$, kgN ha^{-1}) le permet :

$$N_{\text{abs}}(j) = \min(N_{\text{min}}(j) ; DN(j) - N_{\text{fixé}}(j))$$

En conditions contrôlées et sous apport continu de nitrates, Imsande et Edwards (1988) ont mis en évidence que les légumineuses avaient une faible capacité à prélever les nitrates au cours des stades reproducteurs. Ce processus a donc été intégré en considérant que l'absorption d'azote était nulle à partir de FSLA.

d) Etat de nutrition azotée

L'état de nutrition azotée est caractérisé par l'Indice de Nutrition Azoté (INN) : rapport entre la teneur en azote réelle de la culture et sa teneur critique (Lemaire et Gastal, 1997). L'INN est utilisé, comme vu ci-dessus, pour quantifier l'effet d'une carence azotée sur l'élaboration de biomasse de la culture jusqu'au stade DRG.

3.2.4. Sous-module élaboration du rendement et de la qualité

Ce module est initialisé à FSLA, stade à partir duquel le nombre de graines par m^2 (NGM^2) est définitivement fixé (Pigeaire et al., 1986).

a) Détermination du nombre de graines par m^2 : NGM^2

Dans AFILA, comme dans AFISOL, le NGM^2 est fonction de la vitesse de croissance entre DF et FSLA et de la capacité de la culture à transformer cette dernière en nombre de graines (paramètre $Ngunit$) (Guilioni et al., 2003), selon la relation suivante :

$$NGM^2 = Ngunit \times (MSFSLA - MSDF) / (stdf - fsla)$$

avec MSFSLA et MSDF, respectivement les quantités totales de biomasse sèche aérienne aux stades FSLA et DF (kg ha^{-1}),

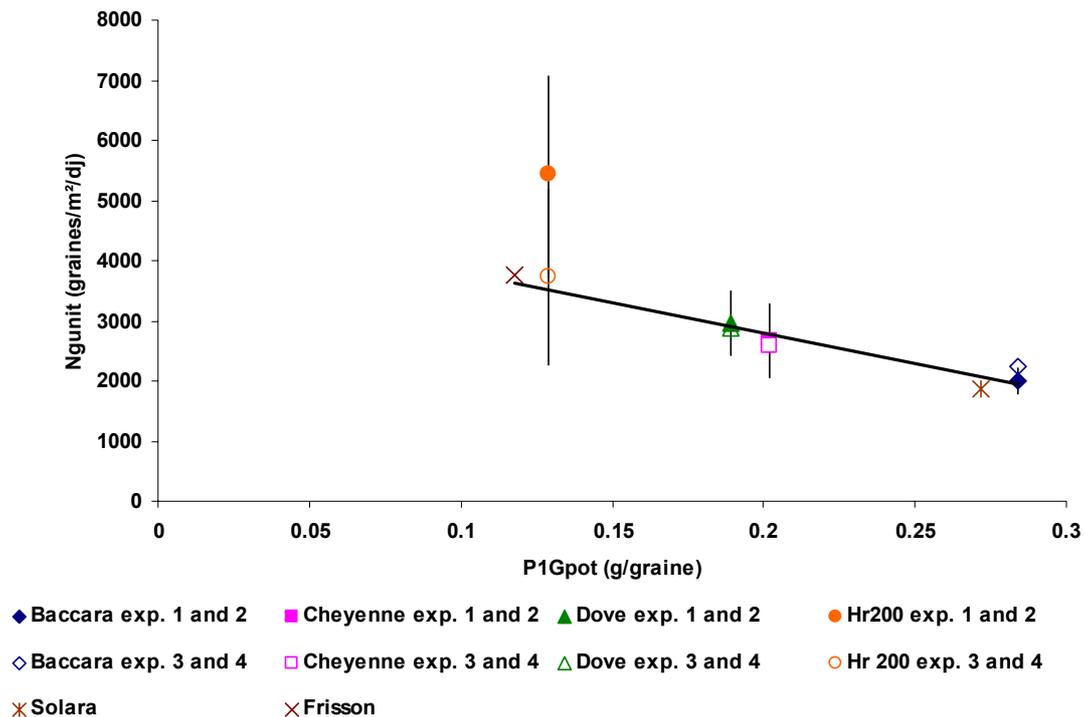
stdf-fsla, la somme des températures (base 0°C) entre DF et FSLA (dj),

Ngunit, le facteur de conversion de la vitesse de croissance en nombre de graines ($\text{graines m}^{-2} \text{dj}^{-1}$), fonction du poids des graines. La relation, mise en évidence dans la partie 1, a été reparamétrée sur les données de Grignon et validée sur celles de Mons (Figure II.7) :

$$\text{Ngunit} = -10012 \times \text{P1Gpot} + 4798 \quad (r^2 = 0.92, \text{RRMSEP} = 7\%)$$

avec P1Gpot, le poids d'une graine potentiel à 0% d'humidité (g graine^{-1} , donnée d'entrée).

Figure II.7. Relation entre le facteur de conversion de la vitesse de croissance en nombre de graines (Ngunit, $\text{graines m}^{-2} \text{dj}^{-1}$) et le poids potentiel d'une graine (P1Gpot, g graine^{-1}).



b) Accumulation de carbone dans les graines

L'accumulation de carbone dans les graines est simulée, à partir du moment où le NGM^2 est connu (i.e. au stade FSLA), en 3 étapes :

(1) au stade FSLA, l'accumulation de matière sèche dans les graines ($\text{DGC}(\text{FSLA})$) est calculée d'après le formalisme proposé dans AFILA, en considérant que le nombre de graines à remplir pendant la période DRG-FSLA est égal à la moitié du nombre de graines final (moyenne entre le nombre de graines en remplissage à DRG et celui à FSLA) par :

$$\text{DGC}(\text{FSLA}) = \text{NGM}^2 / 2 \times \text{stdrg-fsla} \times \text{vcrogr}$$

avec vcrogr , la vitesse de croissance d'une graine (g dj^{-1}), fonction du poids de mille graines de la variété (relation établie par Na. Munier-Jolain, com. pers),

stdrg-fsla , la somme des températures (base 0°C) entre DRG et FSLA (dj).

(2) de $\text{FSLA} + 1$ jour à $\text{FSLA} + 20$ jours, on considère que l'accumulation de carbone dans les graines ($\text{DGC}(\text{j})$) n'est limitée ni par la remobilisation, ni par la croissance quotidienne de la culture, et est donc simulée, comme dans AFILA, par :

$$\text{DGC}(\text{j}) = \text{NGM}^2 \times \text{T}^\circ(\text{j}) \times \text{vcrogr}$$

(3) de FSLA + 21 jours à MP, on considère que l'accumulation de carbone dans les graines peut être limitée par la remobilisation de l'azote des feuilles et donc la croissance quotidienne de la culture (Lhuillier-Soundélé, 1999) :

$$DGC(j) = \text{MIN}(NGM^2 \times T_{\text{moy}}(j) \times v_{\text{crogr}} ; \Delta MS(j))$$

En cumulant les accumulations quotidiennes de biomasse dans les graines depuis FSLA et en divisant par le NGM^2 , le modèle simule quotidiennement l'évolution du poids d'une graine. Le rendement (calculé à 0%) est la quantité totale de biomasse des graines à la date de MP.

c) Accumulation d'azote dans les graines

Les équations choisies pour AFISOL sont une simplification du modèle AZOGRaine (Lhuillier-Soundélé, 1999 ; Lhuillier-Soundélé et al., 1999b).

La quantité d'azote accumulé dans les graines (QNG) est initialisée à FSLA par :

$$QNG(\text{FSLA}) = NGM^2 \times N1G_{\text{fsla}}$$

avec $N1G_{\text{fsla}}$, la quantité d'azote moyenne d'une graine au stade FFSLA, estimée à partir des résultats de Lhuillier-Soundélé (1999) sur Solara et Frisson (valeur moyenne de 4%).

A partir de ce stade, la quantité d'azote accumulé chaque jour dans les graines ($QNG(j)$) est estimée par :

$$QNG(j) = QNG(j-1) + NGM^2 \times T(j) \times V_n(j)$$

avec $V_n(j)$, la vitesse d'accumulation en azote d'une graine le jour j ($gN \text{ gr}^{-1}$). Cette vitesse est étroitement reliée à la quantité d'azote disponible pour une graine ($QND_{\text{dispo}}(j)$) (Lhuillier-Soundélé et al., 1999b):

$$V_n(j) = V_{\text{crogrN}} \times (1 - \exp(-194 \times QND_{\text{dispo}}(j) / NGM^2))$$

avec V_{crogrN} , la vitesse maximale d'accumulation d'azote dans une graine. Ce paramètre a été déterminé pour des variétés de type printemps à grosses graines (Lhuillier-Soundélé et al., 1999b). D'après Larmure et Munier-Jolain (2004), pour des variétés de type hiver à plus petites graines, sa valeur pourrait être différente. Na. Munier-Jolain (com. pers.) a d'ailleurs mis en évidence une relation entre le poids d'une graine et v_{crogrN} , introduite dans le modèle.

Chaque jour, tout l'azote végétatif n'est pas disponible pour les graines. En effet, l'azote dit structural (parois cellulaires,...) est non mobilisable pour les graines. Pour estimer cette quantité d'azote non remobilisable, nous avons dans un premier temps proposé de l'estimer par le produit de la biomasse aérienne à DRG (MS_{drg}) et de la teneur en azote structural (paramètre N_{struct}). Or, une partie de la biomasse contenue dans les parties aériennes à DRG peut être remobilisée vers les graines, entraînant une diminution de la biomasse végétative entre DRG et maturité (Jeuffroy, 1991). Cette quantité a été estimée à 15% de la MS_{drg} (Jeuffroy, 1991). La quantité d'azote disponible pour les graines le jour j ($QND_{\text{dispo}}(j)$, $kgN \text{ ha}^{-1}$) est la différence entre la quantité d'azote végétatif disponible pour les graines le jour j et celle accumulée par les graines le jour $j-1$ ($QNG(j-1)$, $kgN \text{ ha}^{-1}$). Cette quantité représente la part d'azote mobilisable par les graines le jour suivant :

$$QND_{\text{dispo}}(j) = QN_{\text{tot}}(j) - MS_{\text{drg}} \times N_{\text{struct}} \times 0.85 - QNG(j-1)$$

La teneur en protéines des graines (TP) est calculée à MP par :

$$TP = QNG (MP) / Rdt0\% \times 6.25$$

avec QNG(MP) , la quantité d'azote des graines à maturité physiologique (kgN ha⁻¹),
Rdt0%, le rendement à 0% d'humidité en graines (kg ha⁻¹).

3.2.5. *Sous-module enracinement*

Ce sous-module a pour objectif de déterminer la profondeur de sol explorée par les racines chaque jour. Le module est initialisé au semis par l'épaisseur du lit de semence (entrée du modèle).

a) *Enracinement en condition structurale non tassée*

Trois caractéristiques du système racinaire sont considérées dans le modèle : la vitesse d'élongation, la profondeur maximale et la répartition des racines en fonction de la profondeur.

Dans AFILA, la progression de l'enracinement est une fonction linéaire de la somme des températures (encadré 1). Nous avons vu dans la partie 1 que ce formalisme n'était pas adapté pour rendre compte de différentes périodes de semis. Les résultats expérimentaux ont mis en évidence que la dynamique d'enracinement était beaucoup plus stable lorsqu'elle était exprimée en fonction de la somme des rayonnements incidents depuis semis plutôt que de la somme des températures (base 0°C) depuis semis. Ce formalisme a donc été introduit dans AFISOL.

ENCADRE 1 : Modélisation de la dynamique d'enracinement dans AFILA

La profondeur des racines le jour j (profrac(j), mm) est calculée de la façon suivante :

Si date(j)<levée, alors profrac(j)=0,

Si date(j)= levée, alors profrac(j)=proflevée,

Si profrac(j-1)<profmax, alors profrac(j)= T(j) x Vélong + profrac(j-1),

sinon profrac(j)=profrac(j-1)

avec proflevée, la longueur des racines le jour de la levée, paramètre estimée à 150 mm,

T(j), la température moyenne aérienne le jour j (°C),

Profmax, la profondeur maximale atteinte par les racines, donnée d'entrée (mm),

Vélong, la vitesse d'élongation racinaire, paramètre estimé à 0.7 mm dj⁻¹.

Conformément aux résultats de la partie 1, la progression de l'enracinement a été modélisée par une dynamique en deux phases. Une troisième phase, en tout début de cycle, a nettement été observée sur les données de Grignon 2002-2003 en D2. Toutefois, l'insuffisance de résultats expérimentaux ne nous a pas permis de la caractériser de façon suffisamment précise. Nous avons considéré que les vitesses d'élongation racinaire dans et sous la couche labourée étaient identiques. Compte tenu de l'absence d'effet significatif et systématique de la date de semis et de la variété sur ce paramètre (partie 1), la vitesse moyenne d'élongation des racines a été déterminée en calculant la moyenne des valeurs observées dans les essais de Grignon (partie 1), les données de Mons étant réservées à la validation du modèle. Ce paramètre est donc égal à $9.9 \times 10^{-4} \text{ m MJ}^{-1} \text{ m}^{-2}$. De plus, la progression racinaire est considérée comme nulle lorsque la température aérienne du jour est inférieure à 0°C , conformément aux résultats de Tricot (1993).

Dans la majorité des situations expérimentales, la profondeur maximale d'enracinement a été atteinte au plus tard au stade début floraison (partie 1). Dans AFISOL, nous avons donc considéré ce stade comme la date d'arrêt de l'élongation des racines.

La date de semis et la variété ont eu un effet significatif sur la profondeur maximale d'enracinement (partie 1). Toutefois, compte tenu de la variabilité interannuelle, il a été décidé de ne pas introduire ces effets dans le modèle et de prendre comme profondeur maximale d'enracinement, celle permise soit par le sol, soit par la culture (valeur estimée à 1 m, partie 1).

b) Prise en compte de l'effet du tassement

Les résultats expérimentaux de Grignon 2002-2003 ont mis en évidence un effet du tassement sur la progression des racines plus spécifiquement dans la couche labourée (Vocanson et al., 2004c). Toutefois, par manque de points d'observation dans cet horizon en 2003-2004, ce phénomène n'a pas été observé (partie 1). De plus, aucun effet systématique de l'état structural sur la vitesse d'élongation racinaire sous la couche labourée n'a été observé. La vitesse d'élongation racinaire a donc été considérée comme indépendante de l'état structural.

En revanche, dans la partie 1, une relation linéaire entre la proportion de zone tassée (% Δ) dans la couche labourée et la profondeur finale d'enracinement (D_{max} , m) avait été mise en évidence sur les données de Grignon et de Mons. Après reparamétrage uniquement sur les données de Grignon (sans prise en compte des résultats expérimentaux des traitements tassés de Grignon 2003-2004 pour les raisons évoquées dans la partie 1) et validation sur les données de Mons, cette dernière a été introduite dans le modèle AFISOL :

$$D_{\text{max}} = 0.0033 \times \% \Delta - 1.0 \quad (r^2 = 0.69, \text{RRMSEP} = 31\%)$$

Sur plusieurs espèces, il a été montré que le tassement réduisait la quantité disponible d'eau (Tardieu, 1984) et d'azote minéral du sol (Croizat et al., 1991b) pour la culture. Nos résultats expérimentaux ont mis en évidence une réduction de la zone de sol exploré par les racines en état structural tassé liée à une réduction de la densité racinaire (SWR en %, partie 1). Nous avons donc également reparamétré cette relation uniquement sur les données de Grignon (sans prise en compte des résultats expérimentaux des traitements tassés de Grignon 2003-2004 pour les raisons évoquées dans la partie 1) et validé sur les données de Mons, la relation linéaire entre la part de zone tassée de la couche labourée et la densité racinaire mise en évidence dans la partie 1 :

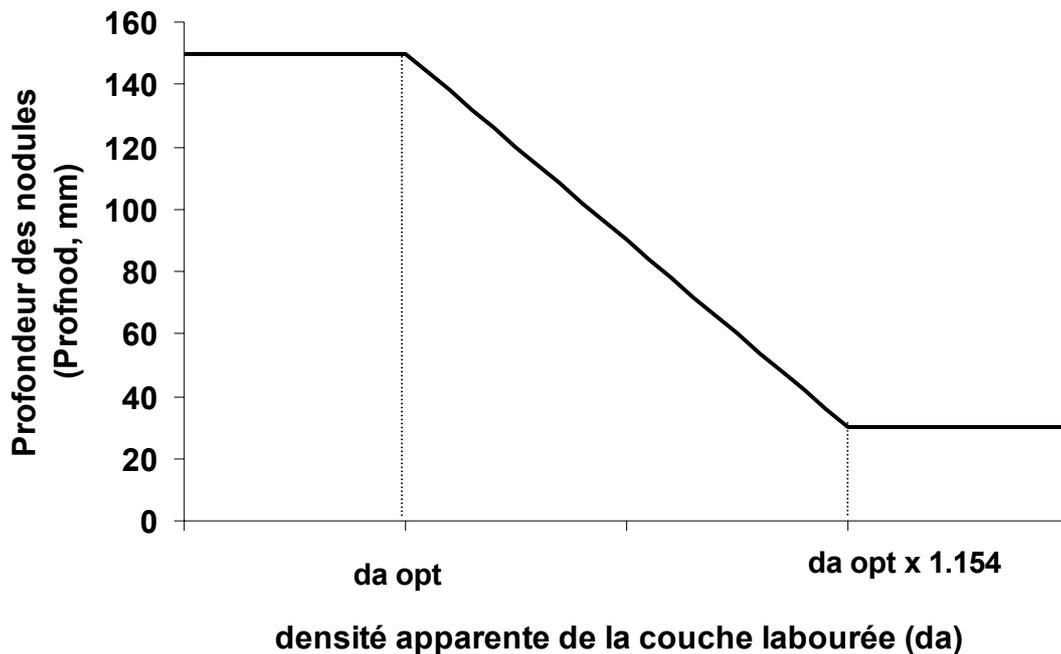
$$\text{SWR} = -0.53 \times \% \Delta + 73 \quad (r^2 = 0.71, \text{RRMSEP} = 30\%)$$

Nous avons considéré que la réduction de disponibilité en eau et en azote était proportionnelle à la réduction de la densité racinaire.

c) Localisation des nodosités

En absence de tassement, 90% des nodosités se situent dans les 15 premiers centimètres de sol (Crozat et al., 1991b ; Tricot, 1993). Cette profondeur permet donc de déterminer la zone de sol contenant les nodules. En situation d'état structural tassé, cette profondeur est modifiée (Figure II.8).

Figure II.8. Profondeur maximale des nodules (Profnod, mm) en fonction de la densité apparente de la couche labourée (da).



La modélisation proposée par Maltas (2002) a été retenue dans le modèle AFISOL :

$$\begin{aligned} &\text{si } da \leq da_{opt} \text{ alors } profnod = 150 \text{ mm,} \\ &\text{si } 1.3 < da < da_{opt} \times 1.154 \text{ alors } profnod = (1124 - 6.5 \times els) + (da \times ((150 - els) / (-0.154 \times da_{opt}))) \\ &\text{sinon } profnod = els \end{aligned}$$

avec da, la densité apparente de la couche labourée,
 profnod, la profondeur où sont localisées les nodosités (mm),
 da_{opt}, la densité apparente de la couche labourée en sol non tassé,
 els, l'épaisseur du lit de semence (mm).

ENCADRE 2 : Données d'entrée et de sortie d'AFISOL

Les variables signalées en gras sont celles ajoutées au modèle initial AFILA.

Les variables d'entrée du modèle sont :

- climat :

- les températures moyennes et maximales quotidiennes ($^{\circ}\text{C}$) : $T_{\text{moy}}(j)$, $T_{\text{max}}(j)$,
- le rayonnement global quotidien (MJ m^{-2}) : $R_g(j)$,
- l'évapotranspiration potentielle Penman quotidienne (mm) : $ETP(j)$,
- les précipitations quotidiennes (mm) : $P(j)$, et les éventuelles irrigations (mm) : $I(j)$,

- sol :

- **le pourcentage de mottes Δ de la couche labourée : % Δ ,**
- **la densité apparente de la couche labourée : d_a ,**

- **la teneur en argile de la couche labourée (pour mille),**
- **la teneur en CaCO_3 de la couche labourée (pour mille),**
- **la teneur en azote inorganique de la couche labourée (pour mille),**
- **l'épaisseur du lit de semence (mm) : e_{ls} ,**
- **l'épaisseur de la couche labourée (dm) : CL ,**
- la profondeur maximale du sol explorée par les racines (m) : profmax ,
- la réserve utile maximale (mm) : RU_{max} et **si la donnée est disponible au moment du semis (si la valeur n'est pas disponible, elle est calculée par bilan hydrique depuis le 1^{er} septembre précédent en faisant l'hypothèse que la RU est vide à cette date),**
- **trois facteurs qui prennent en compte l'effet du système de culture (devenir des pailles du précédent, sa nature, éventuels apports d'amendements organiques dans les années précédentes) issus de références (JMMachet dans « maîtrise de l'N dans les agrosystèmes » ? à vérifier),**
- **la quantité d'azote minéral dans le sol au moment du semis (kg/ha) : QN_{semis} ,**

- date de semis et de début floraison (DF)

- variété :

- **type : printemps (pp) ou hiver (ph),**
- Nombre d'étages fructifères potentiel : NET_{pot} (source : valeur maximale observée sur les essais de Grignon 2002-2003 et 2003-2004),
- le poids d'une graine potentiel à 14% d'humidité : $PIG_{\text{pot}} 14\%$ (source : Pois protéagineux de printemps et d'hiver, Guide de culture 2003 pour Baccara, Cheyenne et Dove ; valeur maximale observée sur les essais de Grignon 2002-2003 et 2003-2004 pour Hr200).

Les paramètres utilisés pour les simulations sont présentés dans le Tableau 1.

- **densité de semis.**

Les variables de sortie à maturité sont :

pour la culture

- le rendement à 0 % et 14% d'humidité : respectivement $\text{rdt}0\%$ et $\text{rdt}14\%$ (q ha^{-1}),
- le nombre de graines par m^2 : NGM^2 ,
- le poids d'une graine à 0% et 14% d'humidité (g graine ha^{-1}),
- la matière sèche totale : $MStot$ (kg ha^{-1}),
- **le nombre d'étages fructifères : NET ,**
- l'indice de récolte : IR ,
- **la teneur en protéines des graines : %P (%),**
- **la quantité d'azote des graines : QNG (kg ha^{-1}),**
- **la quantité d'azote dans les parties végétatives : QN_{veg} (kg ha^{-1}),**
- **la quantité d'azote totale : QN_{tot} (kg ha^{-1}).**

pour le sol

- **le reliquat d'azote minéral dans le sol après récolte (kg ha^{-1}),**
- **la quantité d'azote lessivée pendant le cycle (kg ha^{-1}).**

Variables caractérisant les stress subis par la culture au cours de son cycle

- **somme de P-ETP et RU moyenne avant DF (mm),**
- **somme de P-ETP et RU moyenne entre DF et FSLA (mm),**
- **somme de P-ETP et RU moyenne entre DRG et MP (mm),**
- **somme des températures maximales supérieures à 25°C entre DF et FSLA ($^{\circ}\text{C}$),**
- **somme des températures maximales supérieures à 25°C entre FSLA et MP ($^{\circ}\text{C}$),**
- **indice de nutrition azotée (INN) à DF,**
- **nombre de jours où la culture est sensible au gel entre semis et levée,**
- **nombre de jours où la culture est sensible au gel entre levée et initiation florale (IF),**
- **nombre de jours où la culture est sensible au gel entre IF et maturité physiologique (MP).**

La sensibilité de la culture au gel dépend de son stade et du type de pois. Pour les périodes : semis-levée et IF-MP, la température moyenne journalière seuil est de -3°C pour les deux types de pois. Pour la période levée-IF, pour un pois de printemps, cette dernière est de -10°C contre -15°C pour un pois d'hiver (Lejeune-Hénaut et al., 2004). Pendant cette période, les dégâts de gel peuvent aussi être importants en cas de saturation des sols en eau. Une température moyenne inférieure à 0°C avec un sol à saturation est aussi potentiellement risquée pour la culture.

3.3. Données d'entrée et de sortie du modèle

L'encadré 2 récapitule les données d'entrée et de sortie du modèle. Nous avons, de plus, proposé des relations permettant d'estimer certaines données d'entrée en cas d'absence de mesure, ce qui est fréquemment le cas dans les bases de données des professionnels utilisateurs potentiels de ce modèle.

3.3.1. Caractéristiques du sol

Si la densité apparente de la couche labourée (d_a) ou la teneur en mottes Δ de la couche labourée ($\% \Delta$) n'est pas disponible, une relation, paramétrée sur les données de Grignon et évaluée sur celles de Mons, permet d'estimer la valeur d'une variable à partir de l'autre (Figure II.9). Pour une densité apparente inférieure à 1.33, l'hypothèse a été faite que le pourcentage de mottes Δ de la couche labourée était minimal et égal à 5%. Cette relation a été établie pour des sols profonds de type limon-argileux (Figure II.9) et semble peu différente en sol argilo-calcaire (données de La Jaillière, Tableau II.1).

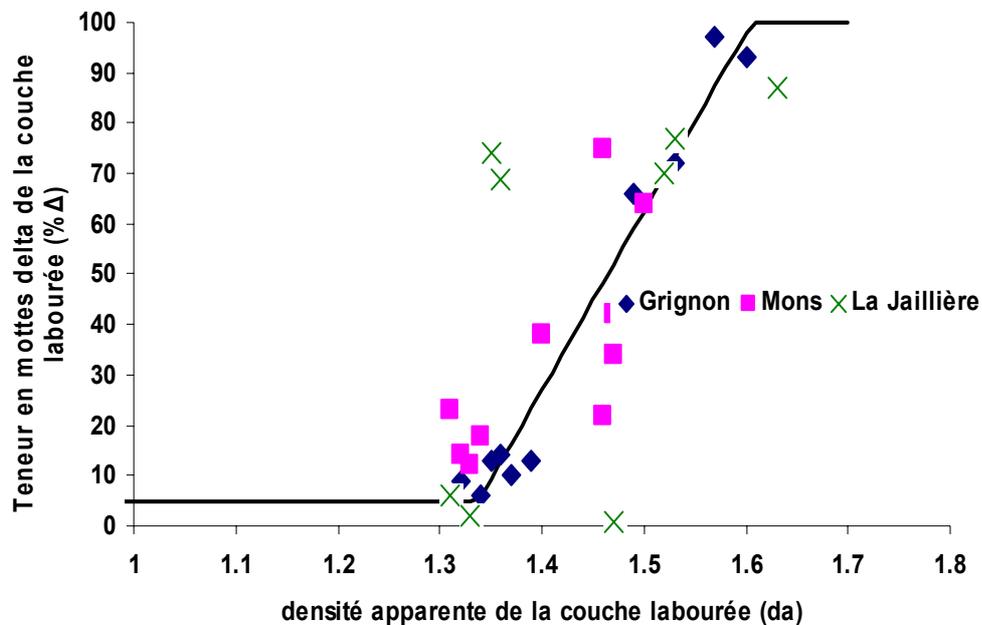
La relation établie est :

$$\% \Delta = 355 \times d_a - 470, \text{ avec } 5 \leq \% \Delta \leq 100 \text{ (} r^2 = 0.82, \text{ RRMSEP} = 17\%)$$

Figure II.9. Relation entre densité apparente de la couche labourée (d_a) et teneur en mottes Δ de la couche labourée (Δ %, %) établie sur les essais de Grignon et évaluée sur ceux de Mons :

$$\% \Delta = 355 \times d_a - 470, \text{ avec } 5 \leq \% \Delta \leq 100 \text{ (} r^2 = 0.82, \text{ RRMSEP} = 17\%)$$

Les points expérimentaux de La Jaillière ont également été positionnés sur ce graphique à titre de comparaison.



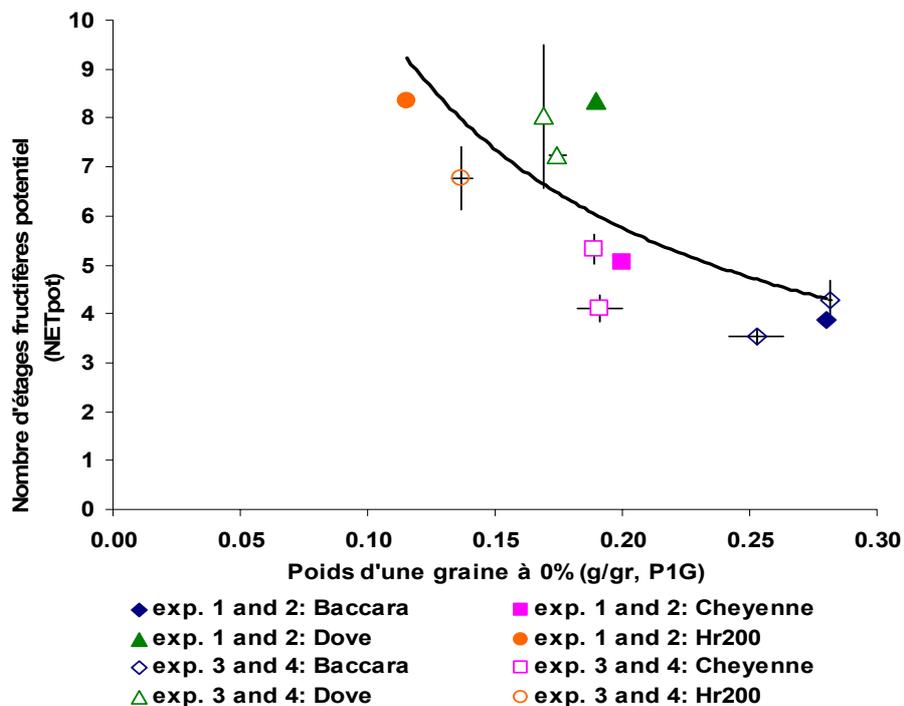
3.3.2. Caractéristiques variétales

Dans le modèle AFISOL, le nombre d'étages reproducteurs potentiel (NETpot) est une caractéristique variétale fournie en entrée du modèle. Si cette donnée d'entrée n'est pas disponible, elle peut être estimée à partir du poids moyen d'une graine à 0%, cette variable étant renseignée dans les documents techniques (mémento des semences, guide de culture). En effet, pour les résultats expérimentaux de Grignon sur les traitements cohérents avec la pratique agricole (traitements considérés : D1 Hr200, D2 Cheyenne et Dove et D3 Baccara), ces deux variables sont fortement corrélées, le NETpot utilisé pour établir cette relation étant la valeur maximale observée sur les deux campagnes expérimentales (Figure II.10) :

$$\text{NETpot} = 1.44 \times \text{P1Gpot}^{-0.86} \quad (r^2 = 0.67, \text{RRMSEP} = 20\%)$$

Figure II.10. Relation entre poids moyen d'une graine à 0% (P1G, g gr⁻¹) et nombre d'étages fructifères potentiel (NETpot), établie sur les données de Grignon (2002-2003 : exp.1 et 2003-2004 : exp.2) et évaluée sur les données de Mons (exp.3 et 4) :

$$\text{NETpot} = 1.44 \times \text{P1Gpot}^{-0.86} \quad (r^2 = 0.67, \text{RRMSEP} = 20\%)$$



4. Evaluation

Les conditions de culture correspondant aux essais (climat, caractérisation des stress subis par les différentes cultures, états structuraux) ont été décrites dans les articles de la partie 1.

L'évaluation du modèle a été réalisée sur les résultats expérimentaux de Mons 2002-2003 (exp.3) et 2003-2004 (exp.4) pour les traitements UC D1 Hr200 (non suivi en 2002-2003 du fait de dégâts de gel trop importants), UC D2 Cheyenne, UC D2 Dove, C D2 Cheyenne, C D2 Dove, UC D3 Cheyenne, UC D3 Dove, C D3 Cheyenne, C D3 Dove. L'aptitude du modèle à correctement classer les différents traitements a été testée uniquement en sol non tassé. Le modèle AFILA a été évalué sur les mêmes traitements (non tassé) qu'AFISOL afin de mettre en évidence le gain apporté par les différentes modifications réalisées.

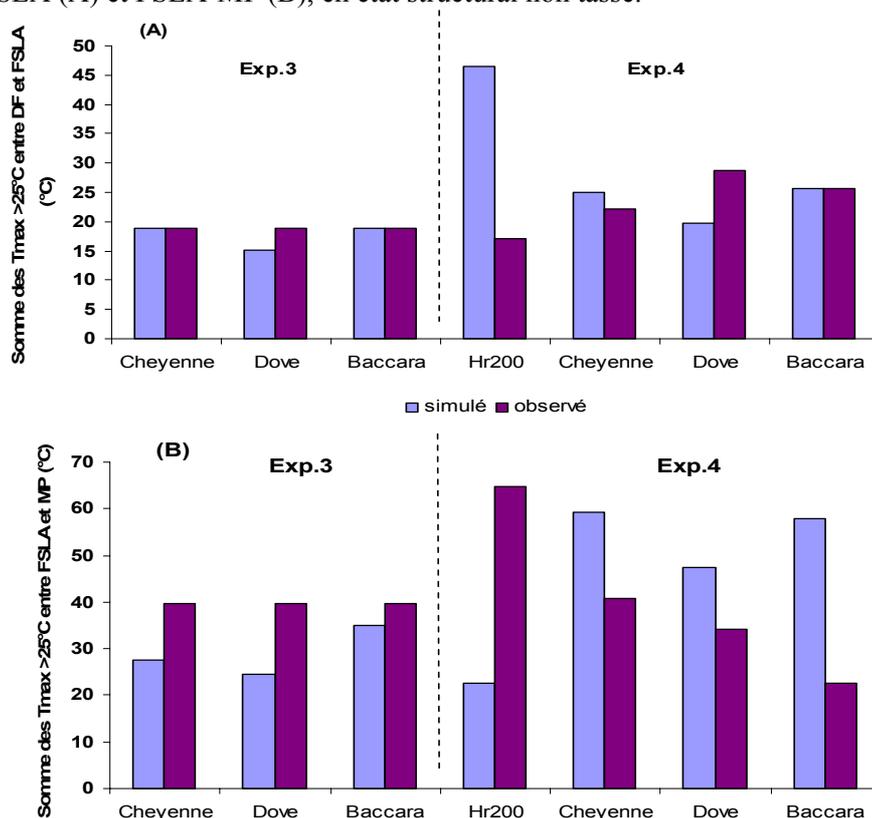
4.1. Risques de stress thermique et azoté

4.1.1. Stress thermique de fin de cycle

Entre début floraison (DF) et la fin du seuil limite d'avortement (FSLA), le modèle simule de façon correcte la somme des températures maximales supérieures à 25°C, excepté pour le traitement Hr200, traitement pour lequel cette variable est surestimée de 29°C (Figure II.11) à cause d'une surestimation du nombre d'étages reproducteurs. Sans ce traitement, sur les variétés inscrites, la précision d'estimation (RRMSEP) est de 18%.

Entre FSLA et MP, deux tendances ont été observées : d'une part, une sous-estimation des stress thermiques pour les traitements exp.3 Cheyenne et Dove et exp.4 Hr200 et, d'autre part, une surestimation de ces stress pour les traitements exp.4 Cheyenne, Dove et Baccara.

Figure II.11. Stress thermiques simulés et observés pour les exp.3 et 4 en fonction du traitement entre DF et FSLA (A) et FSLA-MP (B), en état structural non tassé.



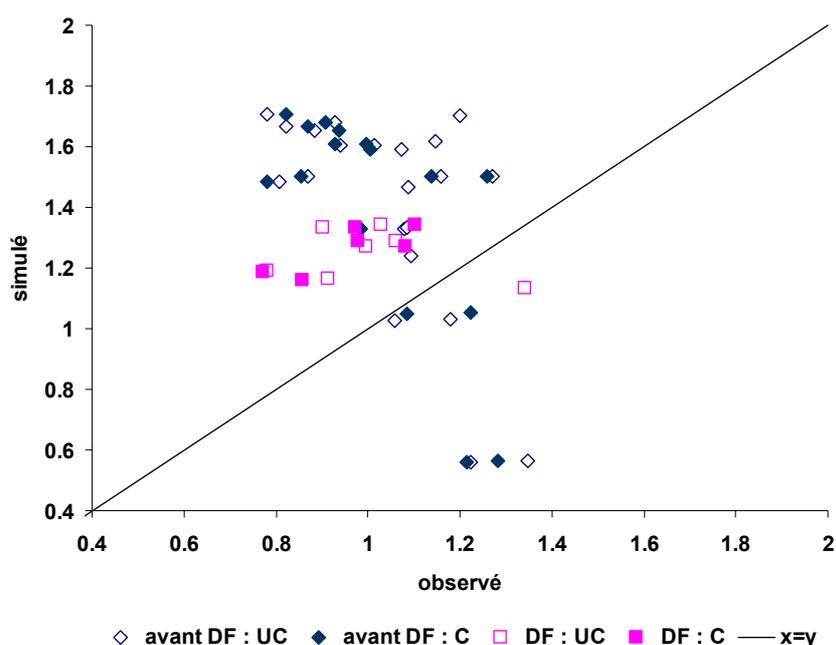
4.1.2. Risque de stress azoté

Dans l'ensemble, l'indice de nutrition azoté (INN) a été surestimé par AFISOL (Figure II.12, en situation non tassée, biais de 0.34 et de 0.24, RRMSEP de 53% et 31% avant et à DF, respectivement). Avant début floraison, AFISOL a simulé des INN entre 0.5 et 1.7 alors que les valeurs observées étaient comprises entre 0.8 et 1.4. Les situations sous-estimées et proches de la première bissectrice correspondent à des prélèvements réalisés en février.

A DF, seul le traitement exp.4 Hr200 a été sous-estimé. Le modèle a simulé, pour l'ensemble des traitements, un INN moyen d'environ 1.2. Les valeurs observées ont mis en évidence une plus grande variabilité (l'INN a varié entre 0.77 et 1.34) et un effet année (les valeurs obtenues en exp.3 étaient inférieures à celles de l'exp.4), non pris en compte par le modèle.

Aucun effet systématique de l'état structural sur l'état de nutrition azoté n'a été simulé, ce qui est cohérent avec les observations (Figure II.12).

Figure II.12. Indice de nutrition azotée (INN) avant et au moment du stade début floraison (DF) observé et simulé pour tous les traitements des exp.3 et 4, en fonction de l'état structural : non tassé (UC) et tassé (C).



4.2. Développement

4.2.1. Levée

Le modèle AFISOL a prédit la date de levée à 8 jours près. Aucun effet de la structure du sol dans la couche labourée n'a été observé, ni simulé. La date de levée a été simulée de façon plus tardive (entre 5 et 13 jours, Tableau II.5) que la date observée pour les variétés de type hiver hr et Hr. Au contraire, les variétés de printemps ont été simulées avec une date de levée environ 5 jours plus tôt que la date observée.

Tableau II.5. Comparaison des dates observées et simulées pour les stades : levée, fin de seuil limite d'avortement (FSLA) et maturité physiologique (MP).

Traitements	Levée		FSLA**		MP	
	observé	simulé	observé	simulé	observé	simulé
Exp.3						
UC et C D2 Cheyenne	08/11/02	21/11/02	02/06/03	09/06/03	01/07/03*	27/06/03
UC et C D2 Dove	08/11/02	21/11/02	01/06/03	05/06/03	01/07/03*	23/06/03
UC et C D3 Baccara	23/03/03	19/03/03	14/06/03	10/06/03	01/07/03*	30/06/03
Exp.4						
UC D1 Hr200	07/10/03	17/10/03	23/06/04	26/06/04	16/07/04*	15/07/04
UC et C D2 Cheyenne	19/12/03	26/12/03	11/06/04	15/06/04	07/07/04*	13/07/04
UC et C D2 Dove	19/12/03	26/12/03	16/06/04	11/06/04	07/07/04*	08/07/04
UC et C D3 Baccara	31/03/04	26/03/04	22/06/04	23/06/04	07/07/04*	19/07/04

* date du prélèvement MP, donc MP potentiellement quelques jours plus tôt

** calculé à partir du nombre d'étages reproducteurs observé.

4.2.2. Fin de seuil limite d'avortement

Le modèle a estimé FSLA avec une précision moyenne de 4 jours (Tableau II.5). Aucun biais spécifique lié soit à l'année, soit à la variété n'a été mis en évidence.

4.2.3. Maturité physiologique

Le modèle a prédit la date de maturité physiologique (MP) avec une précision moyenne de 5 jours (Tableau II.5). Dans 5 situations (exp.3 UC et C D3 Baccara, exp.4 UC D1 Hr200 ; exp.4 UC et C D2 Dove), MP a été prédite à 1 jour près. Dans 4 situations (exp.3 UC et C D2 Cheyenne et Dove), le modèle a prédit MP entre 4 et 7 jours plus tôt que la valeur « observée ». Pour les 4 dernières situations, la date de MP a été simulée plus tardive de 5 (exp.4 UC et C D2 Cheyenne) à 12 jours (exp.4 UC et C D3 Baccara) que la date « observée ».

4.3. Dynamique d'accumulation

4.3.1. Biomasse

Quelle que soit la date de semis (annexe 10), le modèle a globalement bien simulé l'allure générale de la dynamique d'accumulation de biomasse aérienne en trois phases :

- (1) une phase à très faible accumulation de biomasse,
- (2) une phase linéaire et rapide d'accumulation de biomasse,
- (3) une phase de diminution de l'accumulation de biomasse.

La dynamique d'accumulation a été particulièrement surestimée pour l'exp.3 (RMSEP de 2068 kg ha⁻¹, Tableau II.6) par rapport à l'exp.4 (biais de 427 kg ha⁻¹), ce qui a eu pour conséquence une moins bonne précision d'estimation (RRMSEP de 54% pour l'exp.3 contre 29% pour l'exp.4, Tableau II.6). Le tassement a eu pour effet une réduction de la dynamique d'accumulation fonction de son intensité (annexe 10), ce qui est, dans l'ensemble, conforme aux observations. D'ailleurs, la précision d'estimation a été comparable pour les deux états structuraux (RRMSEP de 42% et 40% en sol non tassé et tassé, respectivement, Tableau II.6). AFISOL a mieux prédit D3 que les deux autres dates de semis (RRMSEP de 59%, 43% et 25% pour D1, D2 et D3, respectivement). Les deux variétés, Cheyenne et Dove, ont présenté une précision d'estimation de leur dynamique d'accumulation de biomasse comparable (RRMSEP de 46% et 41% pour Cheyenne et Dove, respectivement). La prédiction du modèle semble meilleure en exp.4 qu'en exp.3, mettant en évidence un effet année important.

Tableau II.6. Valeurs de RMSEP (kg ha⁻¹), RRMSEP (valeurs entre parenthèses) et biais pour la biomasse et la quantité d'azote totale accumulée dans les parties aériennes sur l'ensemble du cycle en fonction de l'année expérimentale, de l'état structural, de la période de semis et de la variété.

		Biomasse aérienne		Quantité d'azote accumulé	
		RMSEP (RRMSEP)	Biais	RMSEP (RRMSEP)	Biais
Année	Exp.3	2068 (54%)	1527	70 (71%)	55
	Exp.4	1178 (29%)	427	37 (32%)	24
Etat structural	Non tassé	1685 (42%)	1035	55 (50%)	38
	Tassé	1597 (40%)	857	54 (51%)	39
Date de semis	Octobre	2257 (59%)	1382	49 (39%)	37
	Novembre	1637 (43%)	1140	59 (60%)	40
	Février-mars	1243 (25%)	880	47 (33%)	36
Variété	Cheyenne	1715 (46%)	1040	59 (60%)	41
	Dove	1555 (41%)	888	58 (59%)	38

A la récolte, le modèle a prédit la biomasse totale accumulée avec une précision de 12% (Tableau II.7, annexe 13), ce qui est meilleur qu'AFILA (RRMSEP de 46%). L'écart simulé de biomasse entre traitement tassé et non tassé (en moyenne de 7%) est proche de l'écart observé (moyenne observée de 6%). Au final, le modèle a simulé un effet du tassement conforme aux observations dans 83% des cas (Tableau II.8). La qualité prédictive du modèle a également été identique pour les deux états structuraux (RRMSEP de 11%, annexe 10). La précision d'estimation de la biomasse totale à maturité a été meilleure pour D3 (RRMSEP de 4%, annexe 11) que pour D2 (RRMSEP de 13%) et D3 (RRMSEP de 18%). Le modèle a également correctement simulé le classement des traitements pour cette variable (Tableau II.9). L'augmentation de biomasse par un semis d'automne a donc été correctement prise en compte par le modèle. Cheyenne et Dove, ont, quant à elles, été prédites avec la même précision (RRMSEP de 13%, annexe 11).

Tableau II.7. Valeurs de RMSEP, RRMSEP (valeurs entre parenthèses, en %) et biais (pour AFISOL) totaux des principales variables de sortie pour AFILA (seulement traitements non tassés) et pour AFISOL (traitements uniquement non tassés : a et tous les traitements : b).

Variable et unité	Abréviation	RMSEP		Biais	
		AFILA	AFISOL	a	b
Rendement à 0% (q ha ⁻¹)	Rdt	26 (37%)	9 (12%)	8 (12%)	-5.3
Poids d'une graine 0% (g graine ⁻¹)	PIG	0.022 (11%)	0.014 (7%)	0.020 (10%)	0.0069
Nombre de graines par m ²	NGM²	1340 (37%)	550 (15%)	652 (18%)	-483
Nombre d'étages reproducteurs total	NET		1.31 (23%)	1.33 (25%)	0.06
Harvest Index	HI	0.39 (65%)	0.10 (17%)	0.10 (17%)	0.003
Biomasse totale à maturité (kg ha ⁻¹)	MStot	5339 (46%)	1413 (12%)	1332 (12%)	-215
Teneur en protéines des graines (%)	TP	6.3 (29%)	2.8 (13%)	2.9 (12%)	-0.48
Quantité d'azote des graines à maturité (kg ha ⁻¹)	QNG	121 (51%)	35 (15%)	32 (14%)	-27.7
Quantité d'azote contenue dans les pailles à maturité (kg ha ⁻¹)	QNveg	46 (56%)	38 (46%)	32 (41%)	15.9
Quantité d'azote totale à maturité (kg ha ⁻¹)	QNtot	130 (41%)	36 (13%)	36 (13%)	13.8
Reliquat après récolte (kg ha ⁻¹)	RAR		27 (46%)	35 (52%)	-31

Tableau II.8. Nombre de fois où le classement relatif du traitement tassé et non tassé pour chaque traitement (D2 Cheyenne et Dove, D3 Baccara en exp.3 et 4) est identique en observé et en simulé par AFISOL.

Variable	Rdt	PIG	NGM ²	NET	HI	MStot	TP	QNG	QNveg	QNTot	RAR
Nombre	6	2	5	3	4	5	2	6	4	6	3
%	100	33	83	50	66	83	33	100	66	100	50

4.3.2. Azote

Pour l'ensemble des traitements, comme pour la biomasse aérienne, le modèle a simulé une dynamique d'accumulation d'azote en trois phases (annexe 12).

Dans l'ensemble des situations, mais surtout pour l'exp.4, le modèle a surestimé la quantité d'azote accumulée au cours du cycle de la culture (biais de 55 kgN ha⁻¹ et 24 kgN ha⁻¹ pour exp.3 et 4, respectivement, Tableau II.6) avec une précision d'estimation meilleure pour l'exp.4 (RRMSEP de 32%, Tableau II.5) que pour l'exp.3 (RRMSEP de 71%). Comme pour l'accumulation de biomasse, le modèle a simulé une accumulation d'azote dans les traitements tassés inférieure à celle des traitements non tassés, à partir d'une date variable selon le traitement (comprise entre 900 et 1200 dj depuis semis, annexe 12). Les observations ont, quant à elles, mis en évidence que l'effet du tassement n'était pas systématique et dépendait largement du traitement. Sur l'ensemble du cycle, la précision d'estimation du modèle a été identique en sol tassé (RRMSEP de 50%, Tableau II.7) et non tassé (RRMSEP de 51%). D1 et D3 ont été mieux simulées que D2 (RRMSEP de 39%, 60% et 33% respectivement pour D1, D2 et D3). Aucune différence de précision d'estimation n'a été observée entre Cheyenne et Dove (RRMSEP de 59%).

A la récolte, la quantité d'azote accumulée (QNTot) a été simulée plus précisément avec AFISOL (RRMSEP de 13%) qu'avec AFILA (RRMSEP de 41% ; Tableau II.7, annexe 13), sans meilleure prédiction d'un état structural (RRMSEP de respectivement 13% et 10% en sol non tassé et tassé). AFISOL a correctement simulé une réduction de QNTot du fait du tassement pour toutes les situations (Tableau II.8). Toutefois, ce dernier n'a pas réussi à classer correctement les différentes situations en non tassé (Tableau II.9) et ce malgré une précision du modèle satisfaisante (RRMSEP de 2%, 15% et 4%, respectivement pour D1, D2 et D3, annexe 11). La qualité prédictive du modèle a été identique pour les deux variétés Cheyenne et Dove et ce pour les deux années expérimentales (annexe 11).

Tableau II.9. Classement par valeurs croissantes observées des traitements D1 Hr200, D2 Cheyenne, D2 Dove et D3 Baccara sur les exp.3 et 4 en sol non tassé simulé et observé. Les variables soulignées sont celles pour lesquelles le classement des valeurs simulées et observées était comparable d’après le test de rang de Charlot (1978).

Variable	Classement	Classement						
<u>Rendement</u>	observé	Exp.4 H	Exp.4 B	Exp.3 B	Exp.4 C	Exp.3 C	Exp.4 D	Exp.3 D
	simulé	Exp.4 H	Exp.4 B	Exp.4 C	Exp.3 C	Exp.4 D	Exp.3 D	Exp.3 B
<u>PIG</u>	observé	Exp.4 H	Exp.4 D	Exp.3 D	Exp.3 C	Exp.4 C	Exp.4 B	Exp.3 B
	simulé	Exp.4 H	Exp.4 D	Exp.3 D	Exp.3 C	Exp.4 C	Exp.4 B	Exp.3 B
<u>NGM²</u>	observé	Exp.3 B	Exp.4 B	Exp.4 H	Exp.4 C	Exp.3 D	Exp.3 C	Exp.4 D
	simulé	Exp.4 B	Exp.4 H	Exp.3 B	Exp.3 C	Exp.4 C	Exp.3 D	Exp.4 D
<u>NET</u>	observé	Exp.4 C	Exp.3 B	Exp.4 B	Exp.3 C	Exp.4 D	Exp.4 H	Exp.3 D
	simulé	Exp.3 B	Exp.4 B	Exp.4 C	Exp.3 C	Exp.3 D	Exp.4 D	Exp.4 H
<u>HI</u>	observé	Exp.4 H	Exp.4 C	Exp.3 D	Exp.4 B	Exp.3 B	Exp.3 C	Exp.4 D
	simulé	Exp.4 H	Exp.4 B	Exp.3 C	Exp.4 C	Exp.3 D	Exp.4 D	Exp.3 B
<u>MStot</u>	observé	Exp.4 H	Exp.4 B	Exp.3 D	Exp.3 C	Exp.4 C	Exp.4 D	Exp.3 B
	simulé	Exp.4 B	Exp.4 H	Exp.4 C	Exp.4 D	Exp.3 B	Exp.3 C	Exp.3 D
<u>TP</u>	observé	Exp.4 C	Exp.4 D	Exp.4 B	Exp.3 D	Exp.3 B	Exp.3 C	Exp.1 H
	simulé	Exp.3 B	Exp.4 B	Exp.3 C	Exp.4 C	Exp.3 D	Exp.4 D	Exp.1 H
<u>QNG</u>	observé	Exp.4 H	Exp.4 C	Exp.4 D	Exp.3 B	Exp.3 C	Exp.4 B	Exp.3 D
	simulé	Exp.4 H	Exp.4 B	Exp.3 D	Exp.3 B	Exp.3 C	Exp.4 D	Exp.4 C
<u>QNveg</u>	observé	Exp.4 B	Exp.3 B	Exp.4 C	Exp.3 D	Exp.3 C	Exp.4 D	Exp.1 H
	simulé	Exp.4 B	Exp.3 B	Exp.4 C	Exp.3 C	Exp.4 D	Exp.3 D	Exp.1 H
<u>QNTot</u>	observé	Exp.4 H	Exp.4 B	Exp.3 D	Exp.3 B	Exp.3 C	Exp.4 D	Exp.4 C
	simulé	Exp.3 D	Exp.4 B	Exp.4 H	Exp.3 C	Exp.3 B	Exp.4 D	Exp.4 C
<u>RAR</u>	observé	Exp.4 D	Exp.4 C	Exp.3 B	Exp.4 B	Exp.4 H	Exp.3 D	Exp.3 C
	simulé	Exp.3 C	Exp.3 D	Exp.3 B	Exp.4 B	Exp.4 C	Exp.4 D	Exp.4 H

4.4. Elaboration du rendement et de ses composantes

4.4.1. Rendement

AFISOL a prédit le rendement avec une précision de 12% (Tableau II.7, annexe 13), ce qui est meilleur qu’AFILA (RRMSEP de 37%), dans nos conditions d’essais, avec une tendance à le sous-estimer (biais de -5.3 q ha^{-1} , Tableau II.7). Toutefois, la comparaison des écarts entre traitements tassé et non tassé simulés et observés a mis en évidence une surestimation de l’effet du tassement par le modèle pour l’exp.3 de 6 q ha^{-1} . De plus, le modèle simule une réduction systématique du rendement en condition d’état structural tassé, ce qui n’est pas forcément pas observé dans la réalité (annexe 13). Pour les traitements non tassés, excepté le traitement exp.3 Baccara surestimé par le modèle, le classement des rendements en fonction du traitement (combinaison des facteurs dates de semis,

variétés et année) a été correctement restitué par le modèle au seuil de 1% (Tableau II.9). Le modèle a donc correctement simulé une augmentation de rendement liée à des semis de novembre, en interaction avec les conditions d'expérimentation (annexe 13). De même, les effets de conditions climatiques différentes, notamment pendant la phase d'élaboration du rendement, ont été correctement simulés : les rendements ont été supérieurs en exp.3 par rapport à l'exp.4 (partie 1). La qualité prédictive du modèle a été quasiment identique en sol tassé et non tassé (RRMSEP de 16% et 13%, respectivement, annexe 11). Le modèle a estimé avec la même précision D2 et D3 (RRMSEP de 13% et 14%, respectivement, annexe 11), tandis que D1 a été largement sous-estimée (RRMSEP de 48%). Dove a été prédite de façon plus précise que Cheyenne (RRMSEP respective de 6% et 17%), systématiquement sous-estimé par AFISOL.

4.4.2. Poids d'une graine

Le modèle a présenté une très bonne aptitude à classer les différents traitements non tassés au seuil de 1% (Tableau II.9). Sur l'ensemble des situations testées, le modèle a prédit le poids moyen d'une graine à 0% (P1G) à 7% près, ce qui est proche de la précision d'AFILA (RRMSEP de 11%, Tableau II.7, annexe 13). D'après la partie 1, les écarts de PMG entre traitements tassés et non tassés n'étaient pas significativement différents, ce qui explique la qualité prédictive comparable du modèle en sol non tassé (RRMSEP de 9%, annexe 11) et tassé (RRMSEP de 12%) et conforte la non prise en compte de cet effet par le modèle. Le modèle a donc été capable de prendre en compte la variabilité du poids d'une graine (P1G) en fonction de la période de semis, de la variété et des conditions climatiques. Le modèle a simulé des P1G inférieurs pour l'exp.4 par rapport à l'exp.3, conformément aux observations (partie 1). Le modèle a, toutefois, prédit avec plus de précision D2 et D3 (RRMSEP de 6% et 11%, respectivement, annexe 11) par rapport à D1 (RRMSEP de 28%). Cheyenne et Dove ont eu des P1G simulés de façon comparable (RRMSEP de 7% et 6%, respectivement, annexe 11).

4.4.3. Nombre de graines par m²

Le modèle a bien simulé une variabilité du nombre de graines par m² (NGM²) entre situations en fonction des conditions d'expérimentation et du traitement (Tableau II.7, annexe 13).

Le NGM² a été prédit avec une précision de 18% sur l'ensemble des situations (Tableau II.7), ce qui est satisfaisant compte tenu de sa grande variabilité (Dumoulin et al., 1994). Cette composante a été globalement sous-estimée par le modèle (biais de -483 graines m⁻², Tableau II.7), ce qui peut contribuer à expliquer la tendance du modèle à sous-estimer le rendement pour les différents traitements. Dans 83% des situations, le modèle a correctement simulé les effets du tassement sur le NGM² (Tableau II.8). AFISOL a toutefois surestimé les pertes de NGM² liées au tassement (11% contre 4% pour les valeurs observées), et ce, plus spécifiquement pour l'exp.3. La qualité prédictive du modèle a cependant été identique en sol tassé (RRMSEP de 13%, annexe 10) et en sol non tassé (RRMSEP de 14%). Les traitements tassés ont été simulés avec des NGM² plus faibles que les traitements non tassés, conformément aux observations (partie 1). La précision d'estimation du NGM² a été inférieure en D1 (RRMSEP de 28%, annexe 6) qu'en D2 (13%) et D3 (15%). Cheyenne et Dove ont présenté des NGM² supérieurs à Baccara, ce qui est correctement simulé par le modèle (partie 1, annexe 12). Les effets des conditions d'expérimentation, de la période de semis et de la variété ont correctement été pris en compte par le modèle (annexe 11). AFISOL a davantage sous-estimé les NGM² de Cheyenne (RRMSEP de 18%, annexes 11 et 13) que ceux de Dove (RRMSEP de 8%).

4.4.4. Nombre d'étages reproducteurs

Le modèle a prédit le nombre d'étages reproducteurs (NET) avec une précision de 25% (Tableau II.7).

Le modèle n'ayant simulé aucun effet de l'état structural sur PIG, aucun effet sur NET n'a été simulé. Dans la réalité, le tassement a eu des effets contradictoires : augmentation jusqu'à 20% (exp.3 D2 Dove) ou diminution jusqu'à 15% (exp.4 D2 Cheyenne). De ce fait, seulement 50% des situations ont été correctement classées en fonction de l'état structural (Tableau II.8). Le NET est très dépendant des conditions hydriques (Lecoeur, 1994), celles-ci pouvant varier en fonction de la structure du sol. Pourtant, la qualité prédictive du modèle a été identique en état structural tassé et non tassé (32 et 35% respectivement, annexe 11). Les résultats expérimentaux ont confirmé que le NET était dépendant du génotype (bonne distinction entre les variétés) et des conditions environnementales (variabilités entre les deux années et valeurs des écarts types, partie 1, annexe 10). D1 (RRMSEP de 4%, annexe 11) a été prédit plus précisément que D2 (33%) et D3 (23%). La moins bonne qualité prédictive pour D2 est liée à la moins bonne capacité du modèle à prédire le NET pour Dove (RRMSEP de 37%, annexe 11) que pour Cheyenne (RRMSEP de 18%). Malgré ces erreurs importantes, les traitements ont été correctement classés au seuil de 1% (Tableau II.9).

4.4.5. Indice de récolte

Le modèle a simulé des indices de récolte (HI) avec une précision de 17% (Tableau II.7), contre 65% pour le modèle AFILA initial. Malgré la sous-estimation générale du rendement par le modèle, aucun biais systématique n'a été observé sur l'indice de récolte (annexe 13).

D'après les observations, l'effet du tassement sur l'indice de récolte n'a pas été systématique, tantôt augmentant l'HI de 5%, tantôt en le réduisant de 10%, pour une réduction moyenne de 1%. Le modèle a, quant à lui, simulé une réduction systématique de l'HI par compaction en moyenne de 4% (annexe 11), ce qui correspond à 66% des situations observées (Tableau II.9). Le modèle a montré une très bonne capacité à classer les différents traitements au seuil de 1% (Tableau II.9). Il a donc bien pris en compte les interactions entre date de semis, variété et conditions d'expérimentation observées dans la réalité. D1 (RRMSEP de 56%, annexe 11) a tout de même été moins bien prédit que D2 (12%) et D3 (15%). Cheyenne (RRMSEP de 15%, annexe 11) a également eu un HI moins bien estimé que Dove (8%). Ce résultat a été la conséquence d'une sous-estimation plus importante du rendement pour ces deux situations.

4.5. Azote dans les différents organes et dans le sol

4.5.1. Teneur en protéines de graines

Le modèle a prédit la teneur en protéines des graines (TP) à 12% près (Tableau II.7, annexe 13), contre 29% pour AFILA, ce qui est satisfaisant compte tenu de sa forte amplitude de variation: par exemple de 17 à 28% pour la variété Solara (Carrouée et Duchêne, 1993). La sous-estimation du rendement dans 8 situations sur 13 n'a entraîné une surestimation de TP que dans 3 situations (exp.4 D1 Hr200 et UC et C D3 Baccara).

Le modèle a systématiquement simulé une TP supérieure (en relatif) de 2% à 10% en état structural tassé par rapport au non tassé (moyenne de 4%), ce qui n'a été observé que dans 33% des situations observées (Tableau II.8). Les observations ont mis en évidence un effet plus contrasté et

plus faible de la structure du sol, augmentation de 2% et diminution de 4% selon les cas, ce qui est conforme aux observations de Crozat et al. (1991b). La teneur en protéines des graines est fonction de la quantité d'azote accumulé dans les graines et du rendement. Cet effet systématique est donc lié au mode de prise en compte de l'effet de ce facteur sur la croissance de la culture. La qualité prédictive a tout de même été identique pour les deux types d'état structural (12% en non tassé et 10% en tassé, annexe 11). Le modèle a montré une très bonne aptitude à classer les différentes dates de semis (Tableau II.9). Le modèle a donc reflété correctement les effets à la fois du génotype et de l'environnement, principaux facteurs responsables de la grande variabilité de TP d'une année sur l'autre (Larmure et Munier-Jolain, 2004). L'augmentation de TP liée à un cycle plus long en D2 qu'en D3 (partie 1) a été correctement simulée par le modèle. Compte tenu de la très forte sous-estimation du rendement pour D1, TP a été nettement surestimée pour cette date de semis. Le modèle a aussi bien prédit la teneur en protéines des graines pour Dove que pour Cheyenne (RRMSEP respectives de 6 et 10 %, annexe 11) et ce, malgré la sous-estimation du rendement pour cette dernière.

4.5.2. Quantité d'azote des graines

AFISOL a prédit la quantité d'azote des graines (QNG) avec une précision de 15% (Tableau II.7), contre 51% pour AFILA. La QNG a été sous-estimée à plus de 10% dans 8 situations sur 13 (annexe 13, biais de $-27.7 \text{ kgN ha}^{-1}$, Tableau II.7).

Le modèle a simulé une perte systématique d'azote dans les graines liée au tassement, conformément à ce qui a été observé (Tableau II.8). En moyenne, cette perte a été simulée à 6% contre 9% en observé. Le modèle a sous-estimé les effets du tassement sur QNG plus spécifiquement dans 3 situations (exp.3 et exp.4 D3 Baccara et exp.4 D2 Dove). Le modèle n'a pas été capable de classer correctement les dates de semis (Tableau II.9). Le modèle a notamment été incapable de simuler les situations à QNG élevée peut-être du fait d'une sous-estimation de la disponibilité en azote quotidienne pour les graines par surestimation de la quantité d'azote non remobilisable pour les graines (fonction de la biomasse à DRG la plupart du temps surestimée par AFISOL). Cheyenne (RRMSEP de 23%, annexe 11) a été un peu moins bien estimée que Dove (RRMSEP de 17%).

L'initialisation est faite à FSLA à partir de la quantité d'azote des graines moyenne à FSLA (Ngrfsla), paramétrée sur une base de données comportant uniquement les variétés Frisson et Solara. Une rapide analyse de sensibilité a mis en évidence l'influence de la variation de ce paramètre sur les quantités d'azote des graines et végétatif à MP (Tableau II.10). La variation de ce paramètre de plus ou moins 30% n'a eu quasiment aucun effet sur le rendement. La teneur en protéines des graines a, quant à elle, été diminuée de plus ou moins 5%. La répartition de l'azote entre les graines et les parties végétatives a également été influencée. Une augmentation de 30% de la valeur de ce paramètre a augmenté QNG de 3% et diminué la quantité d'azote contenue dans les pailles (QNveg) de 10%. Inversement, une diminution de 30% de la valeur Ngrfsla a diminué QNG de 10% et augmenté QNveg de 10%. L'effet sur TP est également important : chaque augmentation de 0.0010 de la valeur du paramètre augmente TP d'environ 1% (en absolu).

Tableau II.10. Sensibilité du modèle à la valeur du paramètre Ngrfsla pour le traitement 2003-2004 UC D2 Cheyenne. La ligne grisée représente les valeurs de référence (valeur de paramètre utilisée pour l'évaluation).

Ngrfsla	QN des graines (kg/ha)	QN végétatif (kg/ha)	Rendement à 0% (q/ha)	Teneur en protéines des graines (%)
0.0025	192	94	63.37	18.95
0.0035	202	85	62.76	20.08
0.0045	209	76	62.18	21.09

4.5.3. Quantité d'azote végétatif

Le modèle a estimé la quantité d'azote végétative (QNveg) avec une très faible précision de 46% (Tableau II.7, annexe 12), ce qui a été à peine meilleur qu'AFILA (RRMSEP de 56%), avec une nette tendance à le surestimer (biais de 15.9 kgN ha⁻¹). La RRMSEP élevée pour cette variable est en partie due au fait que l'on divise par une valeur moyenne observée faible (valeur moyenne observée pour l'ensemble des traitements de 77 kgN ha⁻¹, annexe 13). En situation de tassement, le modèle a simulé des pertes de QNveg moyenne de 3%, ce qui est cohérent avec la valeur moyenne observée de 3% (annexe 11). De plus, dans 66% des situations les traitements tassé et non tassé ont été classés de façon identique en observé et simulé (Tableau II.8). Toutefois, la gamme de variation des pertes de rendement simulée était de 0 à 8% alors que dans la réalité, QNveg a été augmentée jusqu'à 9% (exp.4 D2 Dove) et diminuée au maximum de 30% (exp.3 D2 Cheyenne). Les effets observés de l'état structural sur QNveg n'ont donc pas été systématiquement pris en compte dans le modèle.

Le modèle a présenté une bonne capacité à classer les différents traitements (Tableau II.9) et ce, malgré l'écart important de qualité prédictive entre dates de semis (RRMSEP de 75% pour D1, 30% pour D2 et 65% pour D3, annexe 11). Le modèle a eu du mal à estimer les faibles valeurs de QNveg. Cheyenne a été un peu mieux estimé que Dove (RRSMEP respectives de 25 et 32%).

4.5.4. Reliquat après récolte

Le reliquat d'azote minéral dans le sol après récolte (RAR) a été sous-estimé pour l'ensemble des traitements (RRMSEP de 52%, biais de 31 kgN ha⁻¹, Tableau II.7). Dans seulement 50% des situations, les traitements tassé et non tassé ont été classés de façon identique en observé et en simulé (Tableau II.8). La variabilité des RAR observé n'a pas été prise en compte par le modèle qui, au contraire, a simulé un RAR quasi identique pour tous les traitements et de valeur moyenne égale à 36 kgN ha⁻¹ (annexe 11). De ce fait, le modèle n'a pas réussi à classer correctement les différentes situations (Tableau II.9).

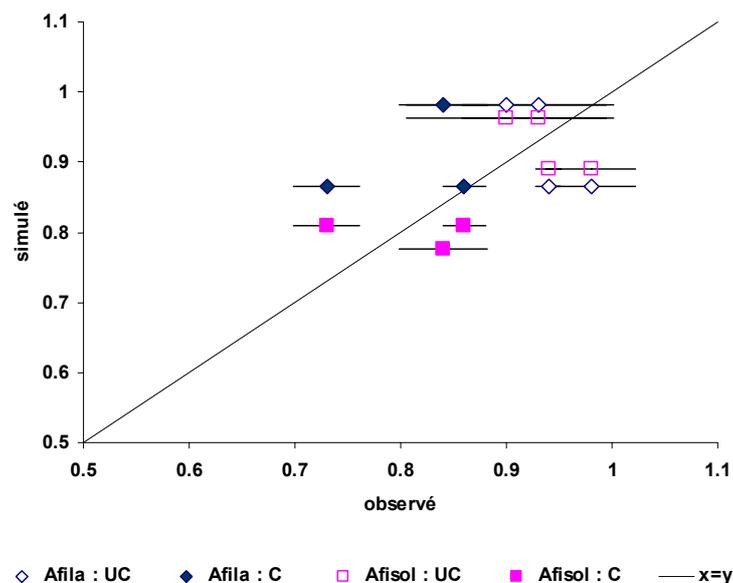
4.6. Enracinement

La modélisation proposée dans AFISOL a amélioré la précision de la simulation par rapport à AFILA : sur l'ensemble des résultats expérimentaux, la RRMSEP estimée sur les profondeurs d'enracinement simulées au cours du cycle de la culture par AFISOL était de 28% contre 49% pour AFILA et les RRMSEP calculées par traitements d'AFISOL étaient toujours inférieures à celles d'AFILA, excepté pour le traitement UC D2 Dove (annexe 14). En non tassé, le modèle a semblé toutefois mieux estimer les dynamiques d'enracinement en D3 (RRMSEP de 27%) qu'en D2 (RRMSEP de 34%). La profondeur maximale d'enracinement (Figure II.13) a été prédite de façon satisfaisante par le modèle pour les deux dates de semis (RRMSEP de 5% en D2 et 10% en D3). Le modèle proposé a permis une légère amélioration de la prédiction de la profondeur maximale d'enracinement par rapport à AFILA (RRMSEP de 7% et 11% pour AFISOL et AFILA, respectivement).

Le modèle a mieux simulé la dynamique d'enracinement en traitement tassé (RRMSEP pour tous les traitements tassés de 23%, annexe 14) que non tassé (RRMSEP pour tous les traitements non tassés de 30%), excepté pour D3 Baccara du fait d'une surestimation de la profondeur maximale d'enracinement en fin de cycle. La profondeur finale d'enracinement (Figure II.13) a été aussi bien prédite en sol non tassé (RRMSEP de 5%) que tassé (RRMSEP de 8%), excepté pour le traitement D3 Baccara, comme vu précédemment, surestimé par AFISOL.

En sol non tassé, l'erreur de prédiction sur l'ensemble des résultats relatifs à chaque variété a été supérieure pour Hr200 par rapport à Baccara et Dove: les RRMSEP ont été de 27%, 29% et 36% pour Baccara, Dove et Hr200, respectivement (annexe 14).

Figure II.13. Comparaison valeurs observées et simulées de la profondeur finale d'enracinement (m) pour AFILA et AFISOL en fonction de l'état structural. Les barres horizontales représentent les écarts-types des valeurs observées.



5. Discussion

5.1. Prise en compte de l'effet de la date de semis et de la variété

5.1.1. Le rendement

a) Qualité prédictive

Sur l'ensemble des situations, le rendement a été prédit à 12% près (RMSEP de 9 q ha⁻¹), ce qui est très satisfaisant en comparaison à d'autres modèles (15% pour CHIKPGRO, Singh and Virmani, 1996 ; 15% pour CERES-Rape, Gabrielle et al., 1998 ; 26% pour OILSUNGRO, Villalobos et al., 1996 ; 16% pour STICS-blé, Brisson et al., 2002 et 22% pour STICS-maïs, Houles et al., 2004). De plus, AFISOL a classé correctement les traitements, variant par période de semis, variété et année, ce qui suggère une bonne prise en compte des différents facteurs considérés (notamment stress climatiques).

Dans le modèle, la simulation de l'effet de la date de semis est très liée à celle de l'effet de la variété, car les variétés de pois de printemps et d'hiver se distinguent par certaines caractéristiques de développement (par exemple, les durées semis-levée et DF-DRG) et de phénotype (la plupart des variétés de pois d'hiver ont une croissance plus indéterminée et un poids moyen de graines plus faible que les variétés de pois de printemps). Les pois d'hiver Hr ont des caractéristiques phénotypiques différentes des pois d'hiver classiques (poids moyen de graines encore plus faibles, initiation florale très réactive à la photopériode avec pour effet une durée de résistance au froid plus longue que pour les types hiver commercialisés), induisant une interaction avec la date de semis précoce (début octobre), et donc des conséquences sur la croissance et le développement, et finalement sur le rendement.

b) Justification de l'approche utilisée

L'élaboration du rendement a été modélisée en fonction de la capacité de la culture à élaborer des graines au m² et de la dynamique d'accumulation de carbone dans ces graines. Un autre formalisme, plus couramment rencontré dans les modèles de culture, consiste à simuler directement la répartition de la biomasse totale entre organes végétatifs et reproducteurs au cours du cycle, via l'indice de récolte en biomasse (HI, Bindi et al., 1999), comme c'est le cas dans STICS (Brisson et al., 1998) et dans les modèles de Sinclair (Amir et Sinclair, 1991; Spaeth et Sinclair, 1985). Dans ces modèles, la vitesse de croissance de l'HI au cours du temps est considérée constante au cours du remplissage des graines quelles que soient les conditions du milieu (stress hydrique et/ou thermique), comme il a été montré chez le pois (Lecoeur et Sinclair, 2001a; Spaeth et al., 1987), ainsi que chez de nombreuses autres espèces (maïs, sorgho, arachide, blé orge, tournesol, Bindi et al., 1999). Toutefois, Lecoeur et Sinclair (2001a) ont mis en évidence une grande variabilité de la valeur de ce taux de croissance et de la valeur de l'HI à MP entre situations (taux de variation de plus de 22%), ce qui limite l'utilisation de ce genre d'approche pour la modélisation du rendement. Nos résultats expérimentaux ont d'ailleurs confirmé cette grande variabilité de l'HI à MP (gamme de variation de 0.49 à 0.71) en fonction des conditions d'expérimentation, ce qui a d'ailleurs bien été pris en compte par AFISOL (RRMSEP de 17% et bonne aptitude à classer les différents traitements).

5.1.2. Poids d'une graine

La prédiction à 9% près du P1G a confirmé la cohérence du formalisme utilisé et des valeurs des paramètres utilisées pour la prédiction de l'accumulation de carbone dans les graines après FSLA.

Toutefois, la relation entre vitesse d'accumulation de carbone dans les graines et P1G a été paramétrée principalement sur des variétés de printemps à grosses graines et il serait nécessaire de la confirmer pour des variétés d'hiver à petites graines.

Certains traitements ont été un peu moins bien simulés que les autres (i.e. erreur de prédiction supérieure à 10% de la valeur observée), tout en restant dans une gamme d'erreur très correcte (erreur de prédiction de 12% pour le traitement exp.3 non tassé D2 Dove, 13% et 26% pour les traitements exp.3 tassé D2 Cheyenne et Dove, respectivement). La surestimation du P1G pour l'exp.4, notamment pour Cheyenne et Dove, est probablement liée à la prise en compte insuffisante des effets de stress thermiques après FSLA sur P1G (Munier-Jolain, 2004) ou d'une mauvaise simulation du stade FSLA et donc du positionnement de ces stress. En effet, le poids d'une graine peut être influencé par les stress hydriques et thermiques entre DF et MP (Munier-Jolain, 2004). L'absence de mesures ne nous a pas permis de vérifier la prise en compte des stress hydriques par le modèle. Toutefois, la sous-estimation des stress thermiques pour l'exp.3 pour Cheyenne et Dove entre FSLA et MP pourrait expliquer la légèrement surestimation de leur P1G.

5.1.3. Nombre de graines par m²

La sous-estimation du rendement est essentiellement expliquée par une sous-estimation du NGM² et ce, plus spécifiquement pour Cheyenne, Dove et Hr200, les trois variétés de type hiver. Le NGM² a tout de même été simulé par le modèle avec une précision de 12%, ce qui est satisfaisant compte tenu de sa grande variabilité inter et intra annuelle (Dumoulin et al., 1994 ; Guilioni et al., 2003). Le NGM² est calculé en fonction de la vitesse de croissance entre DF et FSLA (période de mise en place du nombre de graines) et d'un paramètre génétique de conversion de cette vitesse de croissance en nombre de graines (Ngunit), fonction du P1G moyen variétal dans AFISOL. Sur les données de Mons, cette relation permet de simuler correctement Ngunit (RRMSEP de 7%) pour l'ensemble des variétés.

La sous-estimation du NGM² pourrait aussi être liée à une sous-estimation de la vitesse de croissance entre DF et FSLA pour des semis d'automne, comme cela semble être le cas pour Cheyenne et Dove pour l'exp.4, conséquence d'une surestimation des effets des stress hydriques et thermiques liée à des erreurs de prédiction des stades DRG et FSLA ou à une sous-estimation de la réserve utile maximale pour Mons.

Nous avons vu que les hypothèses émises pour estimer l'accumulation de biomasse et d'azote dans les graines lors de l'initialisation de ce processus pouvaient avoir des conséquences importantes sur les sorties simulées. Il serait donc nécessaire de préciser les valeurs de ces paramètres utilisés pour l'initialisation de ce sous-module pour améliorer la qualité prédictive du modèle.

5.1.4. Nombre total d'étages reproducteurs

La prédiction *a posteriori* du nombre total d'étages reproducteurs (NET) à MP (très variable entre parcelles et entre années) à partir du P1G simulé (relativement stable entre parcelles et années) ne permet pas rendre compte de la variabilité importante observée, essentiellement pour les variétés à croissance plus indéterminée comme Dove (annexe 11).

En effet, le NET est la variable la plus difficile à simuler dans la mesure où elle est très sensible à des contraintes de courte durée, dont les modèles rendent difficilement compte (Roche et al., 1998). Dans nos simulations, une estimation peu précise de cette variable est peu préjudiciable sur la qualité prédictive du rendement et de la teneur en protéines des graines. Toutefois, cette caractéristique a son importance quant à la sensibilité d'une variété aux stress abiotiques de fin de cycle et intéresse beaucoup les sélectionneurs. Comme vu précédemment, le NET a un effet direct sur la date de FSLA (donc sur la durée de la phase reproductrice et les effets de stress abiotiques sur l'élaboration des composantes du rendement), ce qui n'est pas actuellement pris en compte par le modèle car pour l'estimation de ce stade, c'est le NET potentiel qui est utilisé. Le NET dépend entre autre du rapport puits/source. Il faudrait donc que le modèle soit capable de simuler l'affectation du carbone entre puits, et donc le nombre de graines par étage, au fur et à mesure de leur formation, comme proposé par Jeuffroy (1991), ce qui compliquerait le formalisme utilisé et rajouterait plusieurs paramètres dans le modèle, source d'imprécision supplémentaire.

5.2. Croissance aérienne

5.2.1. Influence de la prédiction de la date de levée

La date de levée a été prédite 4 à 5 jours plus tôt que la date observée lors des deux années d'expérimentation pour un semis de printemps. Ceci n'a pas eu une influence identique sur la valeur prédictive du modèle dans la mesure où pour l'exp.4, le modèle a prédit sans décalage l'accumulation de biomasse tandis que l'inverse a été observé pour l'exp.3. Ce décalage peut donc venir d'autres facteurs tels que l'état hydrique et la température du sol dans le lit de semence (Dürr et Aubertot, 2000), non pris en compte par le modèle. De même, pour un semis d'automne, la surestimation systématique de 8 jours de la date de levée n'a eu aucune influence sur la dynamique d'accumulation de biomasse. De nombreux modèles simples de prédiction de la date de levée existent et avaient été testés par Maltas (2002). Certains requièrent des données d'entrée non facilement disponibles comme la température journalière du sol sur une profondeur de 5 cm (Donatelli et Marchetti, 1994). Le modèle proposé ici a pour avantage d'être simple à utiliser. Le biais de prédiction entre semis de printemps et d'automne met en évidence la nécessité de vérifier la valeur des paramètres et de les tester sur une plus large gamme de conditions agricoles.

5.2.2. Validation du formalisme et des valeurs des paramètres

Le modèle a, pour l'ensemble des situations, bien simulé les différentes phases d'accumulation de biomasse et les niveaux de biomasse produits. Les effets de stress hydriques et/ou thermiques (hors gel) sur l'accumulation de biomasse ont été correctement pris en compte par le modèle (les situations caractérisées par de tels stress ont été correctement simulées par le modèle).

Ce résultat confirme l'intérêt du nouveau formalisme proposé pour simuler l'évolution de l'efficacité d'interception du rayonnement à partir de l'évolution de l'indice foliaire (ϵ_i via LAI), notamment pour simuler l'accumulation de biomasse en hiver, sans dégradation de la qualité prédictive pour des semis de printemps. De plus, le formalisme proposé pour simuler l'évolution de la LAI à partir de l'azote critique de la culture est stable pour la gamme de variétés et de dates de semis explorée. Le domaine de validité de cette relation est identique à celui de la courbe critique (c'est-à-dire jusqu'à un stade inférieur à DRG).

Malgré le port en rosette très différent de la nouvelle variété, Hr200, non pris en compte par un formalisme spécifique dans le modèle, la qualité prédictive du modèle de croissance a été aussi bonne que pour les variétés classiques. Cette modification phénotypique a pu tout de même avoir une influence sur l'efficacité d'interception du rayonnement lumineux (Varlet-Grancher et al., 1989) et sur la dynamique d'accumulation de biomasse pendant l'hiver, non pris en compte pour le moment par le modèle. Il serait donc intéressant de vérifier ces hypothèses par de nouvelles expérimentations. La précision d'estimation de l'accumulation de biomasse a été comparable pour Cheyenne et Dove, et ce quels que soient l'année d'expérimentation et/ou l'état structural. Sur la gamme variétale explorée, ces résultats confirment l'absence d'effet de la variété sur le coefficient d'extinction k (Jeuffroy et Ney, 1997) et sur ϵ_{pot} (Lecoeur et Ney, 2003) à prendre en compte par le modèle, alors que certains résultats de la littérature montrent des différences variétales sur ce dernier paramètre (Shibles et al., 1987 ; Boerma et Ashley, 1988).

Différentes approches de l'estimation de l'indice foliaire ont été développées dans les modèles de culture. Dans les modèles de type Gro (Hoogenboom et al., 1992), le LAI est fonction de la quantité de carbohydrates alloués aux feuilles (en concurrence avec les tiges, les racines et, en période d'élaboration du rendement, les gousses et les graines). Cette approche nécessite un nombre important de paramètres, pour simuler la répartition des assimilats entre ces différents puits, puis la transformation des assimilats carbonés en surface foliaire, et confère donc au modèle une plus grande sensibilité à de petites erreurs de simulation de production de biomasse, ainsi qu'au paramètre de surface spécifique des feuilles, ce dernier n'étant pas stable dans le temps et entre situations culturales. Dans STICS (Brisson et al., 1998), le LAI est estimé par une courbe logistique fonction du temps thermique, paramétrée pour chaque espèce, mais avec des paramètres qui n'ont pas de signification physiologique. Enfin, dans CERES-Rape (Gabrielle et al., 1998), le LAI est fonction de la somme des températures en base 4.5°C . La date de semis peut certainement avoir une influence sur ces deux dernières approches de modélisation du LAI, contrairement à celle utilisée dans AFISOL. L'utilisation de la relation entre LAI et QNc , valable pour de nombreuses espèces, requiert une bonne précision de prédiction de la biomasse accumulée tout au long du cycle de la culture. En effet, chaque jour, la quantité d'azote critique est estimée à partir de la courbe critique, elle-même fonction de la biomasse totale accumulée. Toute surestimation de la biomasse a donc des conséquences sur l'estimation du LAI, comme nous avons pu l'observer pour les traitements de l'exp.3. Cependant, ce formalisme est, en règle générale, plus robuste que les précédents.

Comme dans la plupart des modèles (STICS, CERES), ϵ_{b} varie au cours du cycle de la culture. L'augmentation des valeurs de ϵ_{bv} et ϵ_{br} (identiques quelle que soit la date de semis) a permis une amélioration générale de la qualité prédictive du modèle. Pour ϵ_{b} , la prépondérance de l'effet de l'environnement sur l'effet du génotype conforte l'utilisation d'un même paramètre pour toutes les variétés.

La confrontation des biomasses aériennes accumulées observées et simulées permet de confirmer que le modèle rend bien compte de l'effet de la date de semis sur cette variable. Au final, la biomasse à MP est prédite à 11% près, ce qui est satisfaisant en comparaison à d'autres modèles (17% pour OILSUNGRO, Villalobos et al., 1996 ; 20% et 16% pour STICS, Brisson et al., 2002).

5.2.3. Limites de validité

La surestimation de l'accumulation de biomasse pour l'exp.3 pour Cheyenne et Dove a été certainement liée à des dégâts importants du gel sur les parties aériennes (Biarnès et al., 2004a), non pris en compte par le modèle. Ce risque est important à considérer dans l'exploration de nouvelles zones de culture, notamment pour des variétés d'hiver. Peu de modèles simulent les effets de dégâts de gel sur la culture, les processus écophysiologicals impliqués et les conditions de températures sensibles étant peu connus.

5.3. Accumulation d'azote et teneur en protéines des graines

5.3.1. Allocation d'azote entre les graines et les parties végétatives (cosses, tiges et feuilles)

La teneur en protéines des graines a été prédite à 12% près, ce qui est satisfaisant compte tenu de sa variabilité inter et intra annuelle pour une même variété (Lhuillier-Soundélé et al., 1999b). Les effets de la période de semis, la variété, l'environnement et la structure du sol ont été correctement pris en compte par le modèle. AFISOL a, en moyenne, sous-estimé la teneur en protéines des graines (TP) et ce, malgré une sous-estimation du rendement. La quantité d'azote des graines a eu tendance à être sous-estimée, tandis que la quantité d'azote végétatif était toujours surestimée. De plus, à la récolte, la quantité d'azote total a été correctement simulée (RRMSEP de 12%). Le modèle a donc montré des difficultés à simuler la répartition de l'azote entre les graines et les parties végétatives, et notamment à rendre compte de la remobilisation de l'azote des organes végétatifs vers les graines.

Plusieurs raisons peuvent expliquer cette erreur. D'une part, nous avons vu que l'imprécision concernant la quantité d'azote moyenne des graines au stade FSLA (Ngrfsla), valeur estimée sur une base de données comportant uniquement les variétés Frisson et Solara, avait des conséquences non négligeables sur les quantités d'azote des graines et végétatif à MP. Il pourrait donc être intéressant de préciser la valeur utilisée sur une gamme de variétés plus large (en prenant éventuellement compte d'un effet variété) et de vérifier la stabilité de ce paramètre dans différents pédo-climats.

Le NGM² est également utilisé pour calculer la quantité d'azote des graines à FSLA. Le biais observé peut donc venir également de la sous-estimation de NGM² comme vu précédemment. Cette source d'erreur ne paraît toutefois pas être dominante car l'utilisation du NGM² observée en valeur d'entrée n'a permis d'améliorer la RRMSEP que de 1% (résultats non montrés).

Enfin, la détermination du paramètre « vitesse potentielle du remplissage des graines en azote » a été mise au point essentiellement pour des variétés à grosses graines (type printemps) et quelques variétés à petites graines. Malgré la gamme variétale couverte, qui est différente de celle utilisée pour la mise au point de la relation, l'origine de l'erreur de simulation de la teneur en protéines des graines ne semble pas résider dans ce paramètre.

Par ailleurs, le modèle a surestimé dans la plupart des situations la quantité de biomasse totale accumulée, notamment à DRG, variable importante pour la détermination de la quantité d'azote non mobilisable pour les graines. La surestimation de la quantité d'azote non disponible pour les graines est donc probablement liée à ce phénomène, limitant le remplissage ultérieur des graines en azote.

De plus, les résultats expérimentaux ont mis en évidence une variabilité de l'état de nutrition azoté entre traitements notamment au stade début floraison. Or, la teneur en azote structural (paramètre fixe du modèle) est connue pour être sensible à l'état de nutrition azotée de la culture (Na. Munier-Jolain, com. pers.). Il serait donc intéressant de prendre en compte cette variabilité dans le modèle.

D'autres types de modélisation de l'accumulation d'azote dans les graines existent. Certains (par exemple CERES) modélisent la répartition de l'azote dans différents compartiments (gousses, graines, feuilles, racines) via des paramètres d'allocation d'azote. Ce type de modélisation nécessite un nombre de paramètres souvent important. STICS, quant à lui, prédit la teneur en protéines des graines par l'intermédiaire de l'indice de récolte en azote (NHI), lui-même proportionnel à la durée de la phase de remplissage des graines. Lecoœur et Sinclair (2001b) a en effet mis en évidence une relation entre NHI et somme des degrés-jours après DF. Cette relation repose sur la détermination de trois paramètres : R, la vitesse d'accumulation de l'azote de la plante entière, TrE et TrL, les vitesses de transfert de l'N des parties végétatives vers les graines en début et fin de phase de remplissage des graines, respectivement. Une faible erreur de détermination de TrL a pour effet une forte erreur de prédiction de NHI, ce qui limite l'utilisation de ce genre d'approche pour le pois. Enfin, dans le modèle AZODYN, la remobilisation d'azote est simulée comme une proportion constante du stock d'azote dans la culture au début de remplissage des graines, cette proportion étant très stable pour une large gamme de conditions pédo-climatiques et pour une large gamme de variétés (Barbottin et al., 2005).

5.3.2. Accumulation d'azote au cours du cycle

Le modèle a simulé correctement la quantité d'azote totale accumulée à MP (RRMSEP de 12%). Sur l'ensemble du cycle, l'adéquation entre offre et demande a donc été bien simulée. Toutefois, l'accumulation d'azote a été surestimée au cours du cycle pour tous les traitements, en particulier les traitements pour lesquels la biomasse aérienne a été surestimée (notamment tous les traitements de l'exp.3). Pour l'exp.3 D2 Cheyenne et Dove, ce phénomène peut être lié à une surestimation des besoins du fait de la non prise en compte des dégâts de gel sur les parties aériennes.

Le modèle a simulé une dynamique d'accumulation de l'azote en trois phases (phase lente, rapide et diminution de la quantité d'azote accumulée), comme celle de l'accumulation de biomasse. Dans la réalité, la vitesse d'accumulation d'azote ne semble pas avoir diminué vers la fin du cycle contrairement à l'hypothèse introduite dans le modèle. Dans AFISOL, la vitesse maximale d'assimilation de l'azote est supposée constante au cours du cycle de la culture. Sa valeur pourrait dépendre de la saison et du stade de la culture et donc, avoir été plus faible en hiver, période pendant laquelle les besoins de la culture en éléments nutritifs sont très faibles, et plus importante en fin de cycle, au moment du remplissage des graines en azote.

L'accumulation d'azote par la culture est également fonction des besoins de la culture, estimés à partir de la courbe maximale de dilution de l'azote et de la biomasse accumulée par la culture. Comme vu précédemment la quantité de biomasse accumulée a été surestimée pour certains traitements, ce qui peut contribuer à expliquer la surestimation de la quantité d'azote accumulée par la culture.

Enfin, la disponibilité en azote minéral du sol peut être un facteur limitant l'accumulation d'azote par la culture. Le manque de données expérimentales ne nous a pas permis de vérifier si la surestimation de la quantité d'azote accumulée était due à une surestimation de cette variable par le modèle, ce qu'il serait intéressant à faire par la suite.

L'ensemble des processus de fixation permettant de simuler la fixation est issu d'expérimentations réalisées avec des variétés de printemps semées au printemps. Les conditions hivernales, notamment les faibles températures et la saturation du sol en eau, pourraient limiter les quantités d'azote issues de la fixation en hiver, ce qu'il serait donc nécessaire à faire par la suite.

5.4. Simulation de la minéralisation de l'azote du sol et du reliquat après récolte

5.4.1. Reliquat après récolte

a) Estimation par le modèle

Jeuffroy et Recous (1999) ont montré que le modèle minéralisation de l'azote du sol d'AZODYN simulait correctement les quantités d'azote minéralisées au cours du cycle de la culture, à partir de la sortie hiver. En moyenne, la proportion d'azote fixé par la culture (Tableau II.12) a été légèrement inférieure à celle reportée par différents auteurs (Voisin et al., 2002 : 80% ; van Kessel et Hartley, 2000 entre 48 et 80% ; Jensen, 1986 : entre 69 et 85% ; Kumar et Goh, 2000 entre 70 et 74%), ce qui pourrait provenir d'une surestimation de la quantité d'azote minéralisée du sol ou d'une mauvaise simulation de la répartition entre fixation et absorption. Ceci peut être la conséquence d'une surestimation de l'effet de stress hydrique sur la nodulation après DF. En effet, l'hypothèse est faite qu'à partir de DF, de nouveaux nodules ne peuvent plus se régénérer et que tout stress hydrique supérieur à 7 jours consécutifs entraîne un arrêt définitif de la fixation. Pate (1958) et Tricot-Pellerin et al. (1994) ont mis en évidence que la biomasse des nodosités stagnait plus ou moins jusqu'à FSLA avant de chuter fortement en fin de cycle. La capacité régénératrice des nodosités pourrait donc être étendue jusqu'à FSLA.

Entre 25 et 40% de l'azote proviennent de l'assimilation après DRG (Voisin et Salon, 2004). Le modèle a eu tendance à légèrement sous-estimer cette source d'azote pour les graines (Tableau II.7). Ceci peut être lié à des différences en terme de minéralisation qui seraient plus fortes à Mons que pour les conditions d'expérimentation de Voisin et Salon (2004).

Dans le modèle AFISOL, nous avons considéré l'effet de l'humidité du sol sur les processus de minéralisation, comme dans le modèle LIXIM (Mary et al., 1999). Toutefois, il n'est pas exclu que cet effet soit trop fort dans le modèle, induisant une sous-estimation de la quantité d'azote minéralisée en fin de cycle, résultats déjà observés (Machet, com. pers. ; David, com. pers.).

Kutra et Aksomaitiene (2003) ont mis en évidence que la quantité d'azote lessivée annuellement variait entre 12 et 20 kgN ha⁻¹ pour des rotations de 5 ans comprenant une légumineuse dans des limons sableux en Lituanie. Drinkwater et al. (1998) ont également mis en évidence un lessivage moyen annuel de 20 kgN ha⁻¹ pour des systèmes conventionnels avec légumineuses, ce qui est confirmé par les observations de Nolot et Debaeke (2003) qui ont trouvé des valeurs comprises entre 10 kgN ha⁻¹ et 23 kgN ha⁻¹. La quantité d'azote lessivée, simulée par AFISOL (annexe 7) dans nos conditions d'expérimentation entre 22 et 53 kgN ha⁻¹ (Tableau II.11), a pu être légèrement surestimée en lien avec la surestimation de la quantité d'azote minéralisée à l'automne et donc potentiellement lessivable. L'un des risques majeurs d'une culture de printemps est le risque de lessivage de l'azote pendant l'hiver (Munier-Jolain et Carrouée, 2003). Nos résultats n'ont montré aucune différence significative de quantité d'azote lessivée entre dates de semis, peut être du fait d'un trop faible développement aérien et racinaire de la culture avant et pendant l'hiver. L'intérêt attendu des variétés HR vis-à-vis des risques de lessivage est donc à relativiser. D'après le formalisme utilisé, le tassement accroît la densité apparente et donc la minéralisation d'azote, phénomène inverse dans la

réalité du fait de conditions limitantes en oxygène (Stepniewski et al., 1994). Toutefois, cela n'a pas eu d'effet sur la simulation des risques de lessivage d'azote en sol tassé.

Enfin, le RAR a pu être sous-estimé par la non prise en compte de certains processus tels que la rhizodéposition importante chez le pois. D'après Bourgeais et al. (2004), la quantité d'azote issue de la rhizodéposition varie entre 6 et 40 kgN ha⁻¹. Ces résultats sont en accord avec Jensen (1996) qui a mis en évidence qu'à maturité 20 gN par plante était issu de la rhizodéposition des racines, ce qui correspond à environ 16 kgN ha⁻¹ pour une densité moyenne de 80 plantes par m². Cette quantité pourrait être d'autant plus importante que la durée du cycle est longue.

Une autre source d'azote peut avoir été la minéralisation des nodosités. L'état structural a un effet sur la biomasse des nodosités (Croizat et al., 1992). Par une durée de cycle plus longue, le nombre et la quantité de nodosités pourraient être plus importants pour des semis d'automne que de printemps. Ces deux facteurs pourraient donc avoir une influence sur la quantité d'azote minéral supplémentaire disponible dans le sol.

Tableau II.11. Part d'azote fixé sur l'ensemble du cycle, assimilé entre les stades début de remplissage des graines (DRG) et maturité physiologique (MP) et quantité d'azote lessivé au cours du cycle de la culture.

	%N fixé au cours du cycle de la culture	%N assimilé entre DRG et MP	Quantité d'azote lessivé au cours du cycle de la culture (kg ha ⁻¹)
Traitement			
2002-2003			
UC D2 Cheyenne	60	19	41
UC D2 Dove	59	22	48
UC D3 Baccara	59	20	44
C D2 Cheyenne	58	26	48
C D2 Dove	57	27	53
C D3 Baccara	58	24	48
Moyenne exp.3	59	23	
2003-2004			
UC D1 Hr200	38	15	22
UC D2 Cheyenne	40	12	24
UC D2 Dove	40	15	31
UC D3 Baccara	48	21	44
C D2 Cheyenne	39	13	26
C D2 Dove	39	15	31
C D3 Baccara	48	20	41
Moyenne exp.4	49	16	

b) Amélioration du modèle

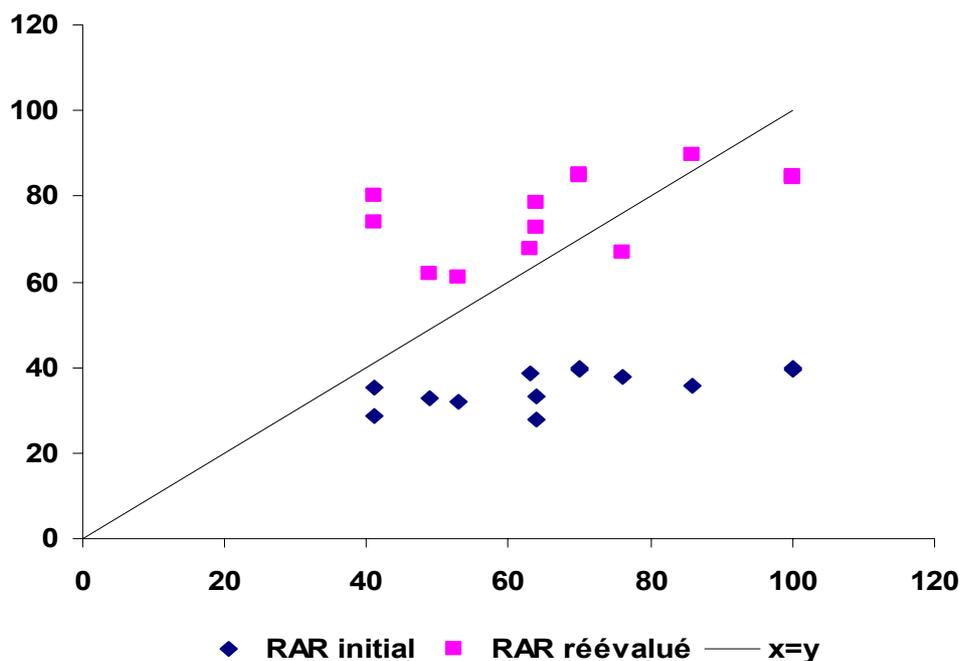
Nous avons tenté de prendre en compte ces processus, à travers des estimations disponibles dans la bibliographie, pour estimer les reliquats d'azote dans le sol à récolte. L'hypothèse est faite que la variété n'a pas d'influence sur ces derniers.

Jensen (1996) a estimé à 16 kgN ha⁻¹ la quantité d'azote issue de la rhizodéposition sur une période de 14 semaines. Nous pouvons, dans un premier temps, faire l'hypothèse que la quantité d'azote rhizodéposé est proportionnelle au nombre de semaines où la culture est au champ est faite. Les nombres moyens de semaines du cycle cultural pour un semis d'octobre, novembre et février sont de respectivement 33, 29 et 15. Les quantités d'azote issues de la rhizodéposition seraient donc respectivement de 38 kgN ha⁻¹, 33 kgN ha⁻¹ et 17 kgN ha⁻¹. Ces quantités sont certainement surestimées pendant l'hiver, période pendant laquelle l'activité de la culture est minimale.

En moyenne, la quantité de nodules par plante est de 0.22 g (Duchenne et Grimaud, 1996), soit 17.6 g m⁻² pour une densité de 80 plantes m⁻². La teneur en azote des racines peut être estimée à 2.26% (Jensen, 1996). En faisant l'hypothèse que celle des nodules est identique, nous pouvons estimer la quantité d'azote moyenne dans les nodules à 4 kgN ha⁻¹. La durée d'un nodule étant de 105 dj (en base 6°C) (Tricot, 1993) et la somme des degrés-jours (dj) en base 6°C pendant la période d'élaboration de nodules (semis + 250 dj-DF) étant d'environ 370 dj pour un semis d'octobre, 286dj pour un semis de novembre et 300 dj pour un semis de février, cela correspondrait respectivement à environ 4 et 3 « vagues » de nodulation. En considérant que l'azote des nodules est directement décomposé et mobilisable par les racines, la quantité d'azote issue de la régénération des nodules serait donc en moyenne de 16 kgN ha⁻¹ pour un semis d'octobre et 12 kgN ha⁻¹ pour des semis de novembre et février.

Au final, 54 kgN ha⁻¹ pourrait être ajoutés au RAR de D1, 45 kgN ha⁻¹ pour D2 et 29 kgN ha⁻¹ pour D3 pour tenir compte de la composition de ces nodules et de la rhizodéposition. En tenant compte de ces processus, la prédiction du reliquat après récolte est améliorée (RRMSEP de 26%, Figure II.14), ce qui tend à confirmer les hypothèses avancées.

Figure II.14 Comparaison des valeurs observées et simulées du reliquat après récolte (RAR, kg ha⁻¹) avant (RAR initial, RRMSEP de 52%) et après intégration des modifications (RAR réévalué, RRMSEP de 26%).



5.5. Enracinement et prise en compte de l'effet de l'état structural

5.5.1. Modélisation du fonctionnement du système racinaire

L'utilisation de modèles de culture pour étudier l'effet de différentes techniques culturales (irrigation et date de semis) et conditions de semis (état structural du sol) dans des environnements à risque élevé ou non de stress hydriques nécessite une simulation correcte de la croissance racinaire (Savin et al., 1994). L'état structural n'étant pas homogène au champ, il est très important de pouvoir prendre en compte cette variabilité dans la simulation de son effet sur l'accumulation de biomasse et d'azote par la culture. Une modélisation aussi précise que possible du système racinaire semble donc, dans un premier temps, importante. Tsegaye et Mullins (1995) ont mis au point un modèle tridimensionnel qui simule la cinétique de croissance et de développement, la structure et la disposition spatiale du système racinaire. L'effet de la structure est intégré par l'intermédiaire d'un facteur de résistance qui peut varier en fonction de la couche de sol. Ce genre de modèles a, la plupart du temps, été mis au point en conditions contrôlées et nécessite de nombreuses variables d'entrée et paramètres. La validation et le paramétrage au champ doivent souvent faire face à des contraintes pratiques difficiles à surmonter (Pages et Aries, 1988). Une simplification est de ce fait nécessaire en vue d'un couplage avec un modèle de fonctionnement aérien de culture.

Tout d'abord, nous avons proposé d'utiliser la proportion de zone tassée ou teneur en Δ de la couche labourée, plutôt que la densité apparente. Dans les autres modèles, l'état structural est caractérisé par l'intermédiaire soit de la densité apparente seule (Jones et al., 1991), soit de la résistance du sol, elle-même parfois fonction de la profondeur (STICS). Les intérêts de l'utilisation de la teneur en Δ étaient d'essayer de prendre en compte la forte variabilité de la structure du sol au sein d'une parcelle, non permis par la densité apparente (partie 1), et de rendre possible le couplage avec le modèle SISOL, nécessaire pour la suite de l'analyse (partie 3).

Ensuite, nous nous sommes intéressés uniquement à trois variables caractéristiques de la croissance et du développement racinaire : la vitesse d'enracinement, la densité racinaire et la profondeur finale atteinte par les racines.

La vitesse d'enracinement est modélisée en fonction de la température du sol (CERES, STICS), du nombre de jours depuis semis (modèles de type GRO) ou de la température moyenne aérienne journalière (AFILA). Dans le cas de semis d'automne et de printemps, les résultats de la partie 1 ont montré que l'on rendait mieux compte de l'ensemble des périodes de semis sur la dynamique d'enracinement si cette dernière était exprimée en fonction du rayonnement global journalier (donnée climatique), ce qui a donc été introduit dans le modèle et a notablement amélioré les prédictions par rapport à AFILA. L'amélioration de la prédiction de la dynamique d'enracinement contribue à expliquer la meilleure prédiction de la biomasse par le modèle, notamment pour des semis d'automne. Toutefois, le modèle a eu tendance à sous-estimer la profondeur d'enracinement en début de cycle tandis que la profondeur finale a été bien estimée quelle que soit la date de semis (RRMSEP de 7%). Ce phénomène est peut être lié aux observations réalisées, plus nombreuses en début de cycle en D2 (trois points) qu'en D3 (un point). Aucun effet systématique de la structure du sol sur la vitesse d'enracinement n'a été mis en évidence dans la partie 1. Le modèle a, néanmoins, été plus précis pour la prédiction de l'enracinement des traitements tassés que non tassés pour la variété Dove. En état structural non tassé, la qualité de prédiction de la dynamique d'enracinement a été identique pour les différentes variétés, ce qui confirme l'absence d'effet de la variété sur les paramètres du formalisme choisi. Savin et al. (1994) a mis en évidence que les erreurs de prédiction pouvaient être liées à la

précision des mesures et à la méthode de caractérisation du système racinaire utilisée. Le système racinaire est également très influencé par les conditions environnementales et les résultats expérimentaux présentent souvent une grande variabilité. Les écarts entre valeurs observées et simulées peuvent être la conséquence de la non prise en compte de certains facteurs comme l'humidité du sol, sa température et la diffusion de l'oxygène (Klepper et Rickman, 1990), le tout pouvant interagir avec l'état structural. L'intégration de l'effet de l'humidité du sol sur la dynamique d'enracinement (comme c'est le cas dans STICS et CHICKPEAGRO) pourrait, par la suite, être intéressante, les risques d'hydromorphie étant relativement importants en hiver (donc pour des semis d'automne). L'absence de prise en compte de l'effet de sénescence sur la croissance racinaire, comme c'est le cas dans les modèles de type CERES, peut également contribuer à une surestimation de la quantité d'eau et d'azote disponibles pour la culture en fin de cycle.

Tardieu (1990) a mis en évidence qu'au champ, l'état structural du sol affectait essentiellement la disposition spatiale des racines, facteur, de ce fait, important à modéliser. Certains modèles (CERES-colza, Gabrielle et al., 1998 ; STICS, Brisson et al., 2003) simulent une évolution de la densité racinaire en fonction du temps. Ils nécessitent l'utilisation de courbes de référence ('profils standards' dans STICS) et reposent sur des hypothèses concernant, par exemple, la vitesse relative d'extension des racines latérales (CERES-colza), paramètre d'accès difficile. L'effet de la structure du sol est alors aussi pris en compte via un paramètre de pénétrabilité pouvant être propre à chaque couche de sol (STICS). Les résultats d'évaluation de ce type de modèle (Robertson et al., 1993) mettent en évidence une difficulté à prédire l'ensemble de ces variables du fait d'une variabilité inhérente à toute mesure du système racinaire (forte interaction type de sol x climat x racine, techniques de caractérisation utilisées). De plus, une erreur de simulation peut avoir des conséquences importantes sur d'autres processus dépendants de la variable mal estimée. Par exemple, dans le modèle CROPGRO-SOYBEAN, la simulation de la quantité d'eau disponible pour les racines est très sensible à un paramètre, le facteur de croissance racinaire (root growth factor, SRGF) qui détermine la capacité des racines à croître et à proliférer dans un horizon de sol. Wang et al. (2003) a mis en évidence la difficulté et le temps trop important nécessaire dans la détermination de la valeur de ce paramètre. Afin d'utiliser un nombre limité de paramètres d'entrée facilement mesurables et représentatifs, une relation directe entre la structure du sol et le pourcentage de sol exploré par les racines a été utilisée et semble pertinente pour rendre compte de l'effet de l'état structural sur la densité racinaire. Toutefois, les faibles valeurs de teneur en Δ , même pour les traitements tassés et plus spécifiquement pour l'exp.4, nécessiteraient la confirmation de ces résultats.

Le tassement a également eu pour effet une réduction de la profondeur de sol explorée par les racines liée à la teneur en Δ dans la couche labourée (partie 1). Aucun modèle n'avait pris en compte jusqu'à présent ce phénomène (STICS, CERES, modèles de type GRO), ce qui peut être la conséquence de l'absence d'un tel effet pour certaines espèces comme l'a mis en évidence Tardieu (1984) sur le maïs. La confrontation des valeurs observées et simulées a mis en évidence une légère amélioration de la qualité prédictive de la profondeur maximale par rapport à AFILA (RRMSEP de 7% contre 11%), essentiellement due à une meilleure prédiction de la profondeur maximale en condition tassée.

5.5.2. Lien entre croissance aérienne et racinaire

Dans STICS (Brisson et al., 2003), la croissance des parties racinaires est indépendante de celle des parties aériennes : la profondeur d'enracinement et la zone de sol explorée par les racines déterminent uniquement les quantités d'eau et d'azote disponibles pour la culture. Au contraire, dans CERES-blé (Savin et al., 1994), la croissance en longueur quotidienne des racines est fonction de la quantité de biomasse aérienne produite chaque jour par l'intermédiaire d'un facteur de conversion, supposé constant au cours du cycle de la culture. Robertson et al. (1993) a mis en évidence une variabilité de ce facteur en fonction du stade et du niveau de stress de la culture. Dans les modèles de type GRO (Hoogenboom et al., 1992 ; Singh et Virmani, 1996), chaque jour, une partie de la biomasse accumulée sert à la croissance du système racinaire. Les nouvelles racines sont réparties dans les différents horizons de sol en fonction de la quantité de racines déjà existante, la quantité d'eau extractible et un facteur de préférence racinaire propre à chaque horizon. La croissance de nouveaux tissus racinaires est convertie en longueur totale de racines fonction du ratio racinaire longueur/masse pour les racines. Pour chaque horizon, la sénescence racinaire est également prédite en fonction de l'âge de la plante et de la quantité d'eau extractible. Ce genre de modélisation requiert un nombre relativement important de paramètres, souvent difficile à déterminer, et n'apporte pas toujours une amélioration de la qualité prédictive. Dans le modèle AFISOL, la profondeur d'enracinement est simulée en fonction du rayonnement incident, variable dont dépend fortement la croissance aérienne : on peut donc supposer que le lien entre les deux est indirectement, et peut-être partiellement, pris en compte.

5.5.3. Etat structural du sol et croissance de la culture

Seul l'état structural a un effet sur le système racinaire (profondeur maximale et zone de sol explorée par les racines). La réduction de l'offre en eau et en azote en cas d'état structural tassé est supposée proportionnelle à la réduction de la zone de sol explorée par les racines. Cette hypothèse peut être contestée dans la mesure où Tardieu (1984) pour du maïs a mis en évidence que l'alimentation hydrique d'un peuplement au champ était affectée par l'état structural de la couche labourée du fait de différences de concentration de racines et de contact sol-racine. Toutefois, le modèle a bien pris en compte une réduction de biomasse et d'azote accumulé en fonction de la structure du sol à partir d'une certaine date, conformément aux observations faites (partie 1). La réduction du rendement et de la teneur en protéines des graines en sol tassé a également été correctement simulée, même pour de faibles écarts entre traitements tassés et non tassés (cas pour l'exp.4). Toutefois, dans la réalité, l'effet de la compaction sur la croissance de la culture n'est pas systématique. Ceci peut être lié à des interactions complexes entre structure du sol, disponibilités en eau et en éléments minéraux (N, P, K) et conditions climatiques (Croizat et al., 1991a), non pris en compte par le modèle et difficilement modélisables de façon simple et précise. La compaction peut également avoir d'autres effets sur le système racinaire comme une augmentation du diamètre des racines, une diminution de la vitesse d'élongation racinaire et une modification de l'architecture du système racinaire (Tsegaye et Mullins, 1994), avec d'éventuelles conséquences sur l'efficacité d'absorption d'eau et d'éléments nutritifs.

6. Conclusion et perspectives

6.1. Domaine de validité

Le modèle a été mis au point pour des conditions non limitantes en P et K, en absence de gel et de maladies, ravageurs (insectes et oiseaux) et de mauvaises herbes. Or, nous savons que l'avancée importante des dates de semis induit un accroissement du risque de maladies aériennes, notamment anthracnose (Tivoli et al., 2004) et bactériose (Tivoli et Samson, 1996). L'intégration de l'effet de ces maladies devra donc être envisagée par la suite, pour utiliser le modèle en vue de raisonner l'intérêt de ces semis précoces. En l'absence de connaissances disponibles quantifiées à inclure dans AFISOL, un modèle décisionnel, basé sur des connaissances empiriques, a été mis au point pour tenir compte de ces effets (Jeuffroy et Messéan, 2004).

La nature des données sources ayant servi à paramétrer et valider le modèle détermine son domaine de validité (Passioura, 1973). AFISOL a été mis au point et validé pour des sols de type limons-argileux. Comme le suggère Stutzel (1995), la bonne adéquation entre valeurs simulées et prédites ne peut pas être considérée comme une preuve mais plutôt comme un indicateur de validité des hypothèses faites. Il est donc nécessaire d'évaluer AFISOL sur un jeu de données plus large, ce qui est actuellement en cours avec l'UNIP. Notamment, l'extrapolation à d'autres types de sol nécessitera probablement le reparamétrage de certaines équations.

6.2. Evaluations agronomique et environnementale des nouvelles variétés de pois d'hiver

Les effets de la compaction sur la croissance et le développement de la culture sont complexes et peuvent dépendre des conditions climatiques. Le modèle rend suffisamment compte de ces effets sur l'accumulation de biomasse, d'azote et l'élaboration du rendement, ce qui justifie l'utilisation du modèle pour comparer l'utilisation de variétés d'hiver, de printemps ou des nouveaux types de variétés d'hiver, en lien avec l'état structural induit par les conditions climatiques au semis. De même, le modèle a globalement bien simulé les effets d'une modification de la période de semis sur le fonctionnement de la culture. Les données d'entrée et les paramètres relatifs aux caractéristiques variétales ont été suffisants pour rendre compte, de façon satisfaisante, des effets de ce facteur sur le développement et la croissance de la culture.

Au-delà des variables de sortie classiques de type agronomique (rendement et teneur en protéines des graines), la quantité d'azote végétative est également un critère d'évaluation environnementale dans la mesure où elle représente un pool d'azote mobilisable par la culture suivante potentiellement lessivable l'hiver suivant (Soon et Arshad, 2004). Le modèle, dans son état actuel, ne prédit pas précisément cette variable, une amélioration serait nécessaire sur ce point. Toutefois, AFISOL présente une bonne aptitude à classer les différentes situations en fonction de ce critère, ce qui peut être utilisé comme critère de comparaison.

De plus, l'une des limites au développement des variétés de pois de type hiver dans certaines régions est l'insuffisance de résistance en froid. Le nombre de jours avec risque potentiel de gel de la culture est une variable de sortie du modèle. L'évaluation de l'amélioration apportée par les nouvelles variétés de pois d'hiver quant à ce risque est donc importante dans l'analyse qui suit.

PARTIE III :

Quels idéotypes pour quels usages ?

CHAPITRE 1 :

***Influence du contexte pédo-
climatique et de l'itinéraire technique
sur l'idéotype de pois***

1. Introduction

L'objectif actuel de la sélection de pois est la mise au point de nouvelles variétés d'hiver pouvant être cultivées soit dans des régions où, il existe une très faible surface cultivée en pois, soit dans des régions traditionnelles de culture de pois de printemps, dans le but d'atteindre des performances plus élevées et/ou plus stables (Figure III.1). Or, les conditions de climat et de sol ont une forte influence sur le rendement (Figure III.2) et sur le type variétal cultivé. En effet, dans le nord de la France, les variétés de type printemps présentent des rendements élevés, même sans recours à l'irrigation. Dans cette même région, les variétés de pois d'hiver commercialisées sont peu utilisées, principalement à cause de leur durée de résistance au froid insuffisante. A l'inverse, dans le sud-ouest, les risques de gel sont peu élevés mais les risques de stress hydriques et thermiques de fin de cycle (notamment entre début floraison, DF, et fin du seuil limite d'avortement, FSLA, période d'élaboration des composantes du rendement) sont importants pour les variétés de type printemps. Les variétés de type hiver sont donc les plus cultivées grâce à leur cycle reproducteur 2 à 3 semaines plus précoce (Chaillet, 2000) que les variétés de printemps cultivées dans les mêmes conditions, malgré un rendement moyen faible (29 q ha^{-1} , Figure III.2). Les sélectionneurs ont fait l'hypothèse que, par une durée de résistance au froid plus longue, l'avancement de la date de semis et un avancement important de la date de début floraison, les nouvelles variétés de pois d'hiver Hr en cours de sélection permettraient une augmentation du potentiel (par accroissement de la durée du cycle, comme observé chez différentes espèces, Ellis et Russell, 1984 pour l'orge ; Acikgöz et al., 1989 pour la vesce ; Pilbeam et al., 1990 pour le haricot ; Martin, 1992 pour le blé) et de la stabilité du rendement, en particulier dans les régions de culture du pois de printemps.

Figure III.1. Surfaces de pois semées en 2003.

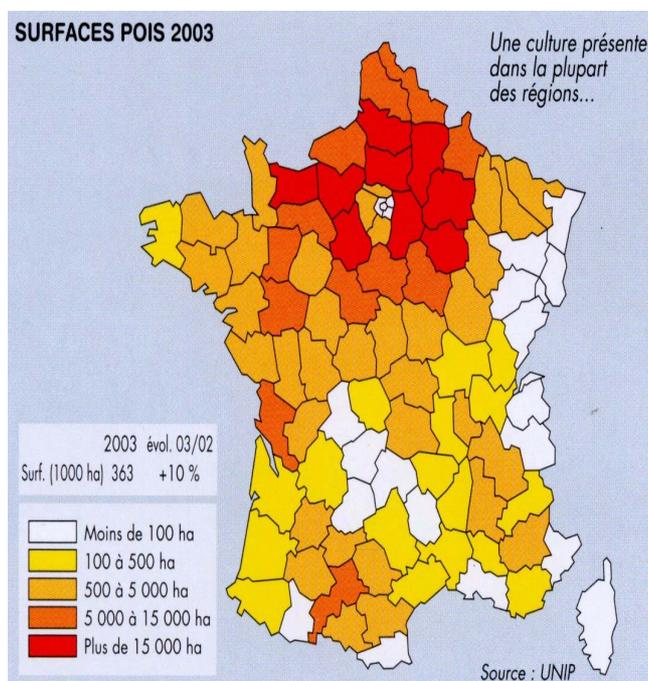
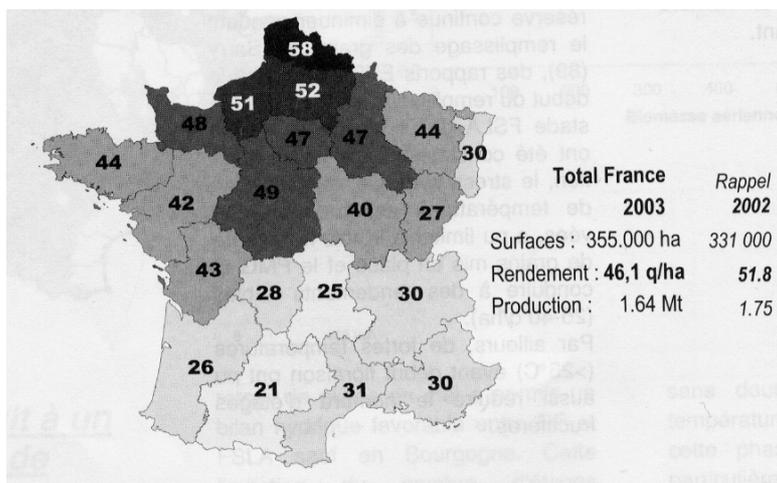


Figure III.2. Rendements moyens de pois par région en 2003 (moyenne nationale de 46.1 q ha⁻¹, source, Quoi de neuf ? 2003).



Toutefois, ces derniers s'interrogent encore sur les caractéristiques phénotypiques que devraient avoir ces nouvelles variétés pour présenter un intérêt agronomique suffisamment attractif. En particulier, les objectifs visés de poids d'une graine, de nombre d'étages reproducteurs, et de précocité à début floraison restent à définir précisément. En effet, pour un potentiel de rendement proche, les pois de printemps et d'hiver diffèrent par leur poids moyen d'une graine (entre 0.223 g gr⁻¹ et 0.308 g gr⁻¹ en variétés de printemps et entre 0.169 g gr⁻¹ et 0.210 g gr⁻¹ en variétés de type hiver, valeurs à 14% d'humidité, source : memento des semences 2005) et par leur nombre d'étages reproducteurs (les pois d'hiver ont généralement un nombre d'étages reproducteurs plus élevé que ceux de printemps), ces deux caractéristiques étant très liées (partie 1). Or, la réussite de la sélection de pois de printemps, de type plus déterminé, tend les sélectionneurs à privilégier ce type de plante pour les nouvelles variétés de pois Hr. Cependant, dans des régions où le risque de stress climatique est difficilement prévisible car il peut intervenir à différentes période de l'année (ce qui est le cas des régions du nord de la France), les variétés ayant un nombre d'étages élevé pourraient avoir un intérêt car le nombre de graines avortées sur les étages soumis à de tels stress peut alors être compensé sur les étages supérieurs (Jeuffroy, 1991). De plus, les nouvelles variétés de pois d'hiver étant très réactives à la photopériode, des interrogations existent encore quant à la période de floraison la plus favorable pour l'élaboration du rendement et à son effet sur la stabilité du rendement. Une floraison trop tardive conduirait à un risque élevé de stress hydriques et thermiques, tandis qu'une floraison trop précoce pourrait conduire à un rayonnement insuffisant, et donc une vitesse de croissance de la culture trop faible, pendant la période de formation des graines, réduisant ainsi le nombre de graines formées et le rendement. Bourion et al. (2002a) ont ainsi suggéré qu'une floraison précoce et une durée de remplissage des graines pas trop longues permettaient de limiter les risques de stress hydrique pendant la phase d'élaboration du rendement et contribuaient à sa plus grande stabilité. Toutefois, ces essais ont été menés sur deux années culturales, pour une date de semis et sur un nombre limité de variétés existantes ou hybrides de type F1 et l'extrapolation de ces résultats semble délicate.

Les modèles de culture sont des outils de plus en plus utilisés pour l'aide à la décision en sélection (Shorter et al., 1991) et permettent l'exploration rapide du comportement de différentes variétés virtuelles dans différents milieux sur des séries climatiques. Asseng et al. (2002) ont notamment utilisé APSIM-blé pour déterminer l'influence de certains caractères phénotypiques (précocité à floraison, augmentation du nombre de grains par m², taux et durée de remplissage des

graines) sur le rendement potentiel dans trois lieux contrastés et sur des séries climatiques de 1 à 90 années. Barbottin et al. (2005) ont montré, en utilisant un modèle de culture, que les différences d'efficience de remobilisation d'azote observées chez les variétés actuelles, ne permettaient pas d'expliquer les différences de rendement et de teneur en protéines observées. Toutefois, dans la plupart de ces travaux, le principal critère évalué est le rendement potentiel et sa stabilité, sans prise en compte des conséquences environnementales et des éventuelles interactions avec la conduite de culture (date de semis, irrigation) qui peuvent être associées aux variétés (White et Hoogenboom, 1996 ; Asseng et al., 2002; Banterng et al., 2004).

Le modèle AFISOL, développé dans la partie précédente, a été mis au point dans le but d'évaluer *ex ante* l'intérêt de différents critères de sélection, selon les régions, la profondeur de sol et la conduite de culture (date de semis et irrigation). Pour atteindre cet objectif, il est nécessaire que le modèle rende correctement compte des performances des différents types variétaux disponibles actuellement, et des différentes conditions de culture susceptibles de leur être appliquées. L'évaluation du modèle réalisée dans la partie précédente n'a pas permis de conclure sur ce point, car elle a porté essentiellement sur l'estimation de la qualité prédictive du modèle sur différentes variables de sortie. Nous avons donc réalisé un deuxième type d'évaluation du modèle, plus adapté à l'utilisation envisagée, dans le but de vérifier la conformité des résultats par rapport à des connaissances empiriques sur les types variétaux connus. Cette évaluation a porté sur la capacité du modèle à rendre compte de quatre constats observés :

Constat 1 :

Quel que soit le type de variété, les semis tardifs (en relatif par rapport à des semis plus précoces) réduisent le potentiel et la stabilité du rendement,

Constat 2 :

Le pois d'hiver hr (ph hr) a un rendement plus stable que le pois de printemps (pp) quelle que soit la région,

Constat 3 :

L'irrigation et les sols plus profonds permettent d'augmenter le potentiel et la stabilité du rendement,

Constat 4 :

Les pois de printemps sont adaptés au nord et les pois d'hiver hr au sud : ils présentent un meilleur rendement et un plus faible risque de gel.

Après cette phase d'évaluation, trois hypothèses concernant les effets de caractéristiques variétales potentiellement intéressantes pour augmenter et stabiliser le rendement des variétés Hr, tout en préservant l'environnement, ont été testées :

Hypothèse 1 :

Pour les nouveaux pois d'hiver Hr (ph Hr), il existe une combinaison de caractères présentant un rendement plus stable et plus élevé dans tous les milieux et quelle que soit la date de semis,

Hypothèse 2 :

Le risque de gel est plus faible pour les pois d'hiver Hr que pour les pois d'hiver hr,

Hypothèse 3 :

Les quantités d'azote contenues dans les pailles des pois d'hiver Hr sont supérieures à celles des variétés classiques.

Pour tester ces constats et ces hypothèses, une série de simulations, dont les caractéristiques sont décrites ci-dessous, a été réalisée avec le modèle AFISOL.

2. Plan de simulation

2.1. Milieux et date de semis

Trois régions climatiques contrastées ont été étudiées, sur des séries climatiques de 28 ans (du 01/09/76 au 31/08/04, Tableau III.1) :

- **Toulouse** (Haute-Garonne ; région Sud-Ouest) : zone de culture du pois d'hiver avec d'important stress hydriques et thermiques de fin de cycle,
- **Chartres** (Eure-et-Loir ; région Centre Bassin Parisien), pour deux raisons : (1) zone de culture du pois de printemps mais où potentiellement le pois d'hiver Hr pourrait être cultivé dans un objectif de diversification des rotations, (2) par continuité avec la partie 3.2 suivante,
- **Mons** (Somme ; région Nord) : zone de culture adaptée pour le pois de printemps mais résistance actuelle des pois d'hiver au froid insuffisante pour l'expression de leur potentiel.

Tableau III.1. Principales caractéristiques climatiques des trois régions d'étude. Les nombres entre parenthèses sont les écarts types.

Lieu	Toulouse 43°37'N 1°23'E	Chartres 48°28'N 1°30'E	Mons 49°70'N 3°40'E
Cumul des précipitations entre le 1 ^{er} mai et le 15 juillet (mm)	170 (91)	142 (53)	159 (39)
Nombre de jours à T _{moy} < 0°C entre le 1 ^{er} octobre et le 15 avril	5.0 (4.5)	17.4 (9.5)	20.7 (10.7)
Nombre de jours à T ^o max > 25°C entre le 1 ^{er} mai et le 15 juillet	28.0 (8.8)	12.7 (7.0)	9.2 (5.1)
Moyenne rayonnement global entre le 1 ^{er} mai et le 15 juillet (MJ m ⁻²)	19.7 (1.5)	18.7 (1.5)	17.8 (1.6)

La profondeur de sol a une forte influence sur la profondeur d'enracinement et donc sur la quantité d'eau disponible pour la culture. C'est d'ailleurs l'un des facteurs limitant la culture du pois dans certaines régions : en effet, une situation avec une faible profondeur de sol en semis de printemps entraîne un risque important de stress hydrique de fin de cycle. On peut alors se demander si, dans de telles situations, ce risque ne serait pas moins élevé pour un pois d'hiver semé à l'automne. Deux types de sol ont donc été étudiés : superficiel (0.5 m) et profond (1.0 m), correspondent à des réserves utiles (RU) de 70 mm et 140 mm, respectivement (Bouthier et Deumier, 1999).

Le pois de printemps étant irrigué dans beaucoup de situations de culture, ce facteur a été considéré. Le pois est très sensible à des stress hydriques en période d'élaboration du rendement (entre DF et FSLA) (Jeuffroy et al., 1990 ; Guilioni et al., 2003). Les besoins en eau d'une culture de printemps sont de 270 à 300 mm ha⁻¹ pour un rendement de 60 à 70 q ha⁻¹ (Gaillard et Bouthier, 1997). En Beauce, des expérimentations ont mis en évidence qu'une irrigation de 50 mm permettait un gain de rendement de 8 q ha⁻¹ (Gaillard et Bouthier, 1997). Pour considérer une disponibilité en eau non limitante pendant la période d'élaboration du rendement, en sol superficiel (RU de 80 mm), nous avons donc simulé la réalisation de quatre apports d'eau de 30 mm, le premier à DF puis les trois autres à 8 jours d'intervalle (Bouthier et Deumier, 1999). En sol profond (RU de 140 mm), nous avons simulé la réalisation de deux apports d'eau (30 mm à DF et 30 mm, 7 jours plus tard) (Bouthier et Deumier, 1999).

Une combinaison lieux x irrigation x profondeur de sol sera appelée « milieu » dans la suite de l'étude. Parmi les 12 milieux possibles (Tableau III.2), seuls 7 ont été étudiés, pour limiter le nombre de simulations et simplifier la présentation des résultats.

Tableau III.2. Présentation et codes (entre parenthèses) des milieux étudiés.

Superficiel (0.5 m)		Profond (1m)	
Irrigation DF DF+8 jours DF+16 jours DF+24 jours	Sans irrigation	Irrigation DF DF+7 jours	Sans irrigation
Chartres (1)	Chartres (2)	Toulouse (3) Chartres (4)	Toulouse (5) Chartres (6) Mons (7)

Dans l'objectif de comparer des situations existantes avec des situations exploratoires pour les types Hr, les dates de semis choisies pour les simulations ont été adaptées au type et à la région d'étude. Ainsi, pour les types classiques, les deux dates de semis sont les deux valeurs extrêmes recommandées par l'UNIP pour chaque région (Guide de culture du pois protéagineux 2005). Pour les pois d'hiver Hr, le 10/10 correspond à la date de semis que les sélectionneurs considèrent comme optimale, tandis que le 01/11 est une date de semis possible pour les deux types de pois d'hiver (hr et Hr) (Tableau III.3).

Tableau III.3. Dates de début floraison (DF) en fonction des dates de semis (DS) et des types variétaux (Biarnès, com. pers.).

Date de semis	Pois de printemps		Pois d'hiver hr		Pois d'hiver Hr					
	DS1	DS2	DS1	DS2	DS1			DS2		
<i>Toulouse</i>										
Date de semis	05/01	20/02	20/11	05/01	10/10			01/11		
Date de DF					DF1	DF2	DF3	DF1	DF2	DF3
	22/04	12/05	20/04	01/05	20/04	10/05	30/05	20/04	10/05	30/05
<i>Chartres</i>										
Date de semis	20/02	15/03	01/11	20/11	10/10			01/11		
Date de DF	22/05	27/05	02/05	10/05	20/04	10/05	30/05	20/04	10/05	30/05
<i>Mons</i>										
Date de semis	25/02	01/04	01/11	20/11	10/10			01/11		
Date de DF	25/05	7/06	12/05	17/05	20/04	10/05	30/05	20/04	10/05	30/05

2.2. Caractéristiques variétales

Plusieurs caractéristiques variétales ont été analysées, dans les simulations, définissant ainsi des variétés virtuelles.

2.2.1. Architectures de plante

Chez le pois, deux types d'architecture de plante se distinguent : les variétés avec beaucoup d'étages reproducteurs et des petites graines (dites indéterminées, souvent caractéristiques des variétés d'hiver) et les variétés avec peu d'étages reproducteurs et de grosses graines (dites déterminées, souvent caractéristiques des variétés de printemps). Le type de pois a des conséquences sur la durée de la phase début floraison (DF) – fin du seuil limite d'avortement (FSLA), et donc sur les risques d'occurrence et les effets de stress hydriques et thermiques sur l'élaboration du rendement. Le nombre d'étages reproducteurs est très corrélé au poids d'une graine (P1G) (parties 1 et 2). Nous avons donc testé ces deux types d'architecture de pois possibles, pour les nouvelles variétés de pois d'hiver, en considérant deux valeurs de P1G à 0%: 0.125 mg gr⁻¹ (P1G1) et 0.280 mg gr⁻¹ (P1G2). La valeur de 0.125 g gr⁻¹ correspond à la valeur minimale observée pour des variétés d'hiver classiques (Frisson, Roche, 1998). A l'inverse, 0.280 g gr⁻¹ correspond à la valeur maximale observée pour des variétés de printemps (Athos, Mémento des semences, 2004). Ces valeurs correspondent respectivement à 4 et 9 étages reproducteurs en moyenne, d'après la relation établie partie 2. De plus, comme il a déjà été mentionné dans la partie 1, le P1G a une influence sur la capacité de la variété à élaborer un certain nombre de graines par m². Pour ne pas introduire un biais dans l'interprétation, nous avons souhaité chercher à

quantifier les performances de différents types variétaux ayant le même potentiel de rendement, dans différentes conditions de date de semis, de sol et de climat. Afin de répondre à cet objectif, le paramètre du modèle Ngunit a été adapté. En effet, le potentiel de rendement est défini par :

$$\text{Rdtpot} = \text{PIG} \times \text{NGM}^2\text{pot} \quad \text{avec} \quad \text{NGM}^2\text{pot} = \text{Ngunit} \times \text{vitcroDF-FSLA}\text{pot}$$

vitcro DF-FSLA_{pot} est la vitesse de croissance potentielle entre les stades DF et FSLA et est fonction des conditions de croissance et de développement (dates de DF et FSLA) de la culture. Toutefois, sur un grand nombre de simulations, la vitesse de croissance maximale observée a été de 20 g m⁻² dj⁻¹. Pour un potentiel de rendement à 0% (Rdtpot) fixé à 70 q ha⁻¹ (valeur observée dans certaines régions comme la Picardie), la valeur de Ngunit calculée a donc été de 2800 gr g⁻¹ dj⁻¹ et 1250 gr g⁻¹ dj⁻¹ pour des PIG respectifs de 0.125 mg gr⁻¹ et 0.280 mg gr⁻¹.

Pour les simulations visant à évaluer le modèle sur sa capacité à rendre compte d'effets observés, les PIG utilisés ont été de 0.280 mg gr⁻¹ pour le pois de printemps (pp) et de 0.125 mg gr⁻¹ pour le pois d'hiver hr (ph hr).

2.2.2. Dates de début floraison et d'initiation florale

Pour les nouvelles variétés de pois d'hiver Hr en cours de sélection (ph Hr), en plus du type d'architecture, les sélectionneurs s'interrogent sur le positionnement de la date de début floraison (DF) par rapport aux risques de stress de fin de cycle.

L'hypothèse a été faite que, comme l'initiation florale, la date de DF apparaissait à durée du jour constante et donc à date fixe. Trois dates de DF ont ainsi été testées : le 20 avril (date précoce « exploratoire »), le 10 mai (DF moyenne actuelle des ph hr), le 30 mai (DF moyenne actuelle des pp) (base de données UNIP-Arvalis, Quoi de neuf ?, 2002). Une « variété virtuelle » a donc été définie par une combinaison PIG x DF. Pour avancer la date de DF, *a priori* trop tardive chez les ph Hr actuels, les sélectionneurs travaillent actuellement sur la réduction de la durée (en somme de degrés-jours) entre initiation florale (IF) et DF, le déterminisme génétique de cette phase étant connu. Pour les dates de DF définies ci-dessus, la durée entre les deux stades a été simulée à 350 dj pour DF1 (valeur moyenne pour les variétés actuelles de pois d'hiver hr), 430 dj pour DF2 (valeur minimale observée pour les variétés Hr) et 535 dj (valeurs observées pour la plupart des variétés actuelles de type Hr) (Lejeune-Hénaut et al., 2004). Chaque date de DF correspond donc également à une durée différente entre IF et DF.

Pour les types de pois commercialisés, la date de début floraison est fonction de la photopériode et de la température depuis semis (Summerfield et Roberts, 1988). Pour les raisons évoquées dans la partie 2, les dates de début floraison ont été supposées fixes par région, type de variété et date de semis (Tableau III.3), les valeurs nous ayant été communiquées par expertise (V. Biarnès, com. pers.).

Un total de 3920 simulations ont été réalisées, correspondant à douze combinaisons date de semis x variété virtuelle, pour chacun des milieux, sur 28 années climatiques, pour les nouvelles variétés de pois d'hiver (2352 simulations), et les simulations pour les types classiques (Tableaux III.2 et III.3).

2.3. Variables étudiées et traitement des données

Les variables étudiées sont le rendement (intérêt agronomique), le risque de gel et la quantité d'azote végétatif à la récolte (intérêt environnemental).

Les rendements simulés sur les 28 années ont été analysés par analyse de variance pour chaque milieu et tous milieux confondus (SAS, 1987). Pour chaque milieu, les effets pris en compte dans l'analyse de variance ont été l'année (total de 28), la date de semis (précoce ou tardif), la date de DF (DF1, DF2 ou DF3) et le poids de graines (P1G1 ou P1G2). Pour l'analyse de variance pour tous les milieux confondus, un effet milieu (total de 7) a été ajouté aux effets précédents.

Pour chaque milieu, les valeurs moyennes de rendement et le coefficient de variation associé ont été calculés de deux façons :

- (1) sur la base des 28 années étudiées, afin de mettre en évidence uniquement les effets de stress de fin de cycle,
- (2) en faisant l'hypothèse que chaque année où au moins un jour de gel a été observé le rendement était nul (perte totale de la culture), la moyenne et le coefficient de variation sur les 28 années ont ensuite été calculés, afin d'intégrer les risques de gel à la caractérisation de l'instabilité et du potentiel de rendement.

Dans la partie simulation, les rendements ont été exprimés en valeurs relatives, la référence utilisée étant le pois de printemps à grosses graines pour le milieu considéré en semis précoce.

3. Evaluation de l'utilisation du modèle sur les types de pois commercialisés

3.1. Semis tardif et rendement

Constat 1 :

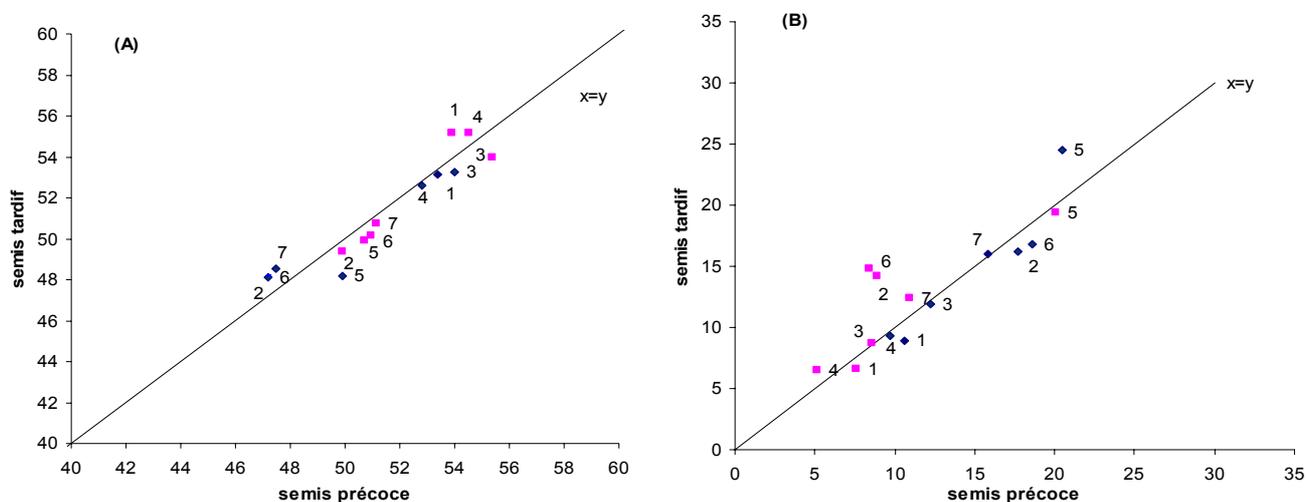
Quel que soit le type de variété, les semis tardifs (en relatif par rapport à des semis plus précoces) réduisent le potentiel et la stabilité du rendement

3.1.1. Effet de la précocité au semis sur les risques de stress hydrique et thermique de fin de cycle

La précocité au semis n'a eu qu'une faible influence sur le niveau de rendement, respectivement pour les deux types de pois (Figure III.3) : l'écart de rendement maximum simulé entre semis précoce et tardif a donc été de 1.7 q ha⁻¹. Un semis précoce n'augmente pas systématiquement (pour tous les milieux) les rendements, quel que soit le type pois, ce qui confirme les résultats obtenus par Acosta-Gallegos et al. (1996) chez le haricot et Meinke et Hammer (1995) chez l'arachide. Dans certains milieux, les rendements plus élevés en semis tardif peuvent être liés à des conditions climatiques plus favorables (notamment de rayonnement incident et de températures) au moment de l'élaboration du rendement (Egli, 1993).

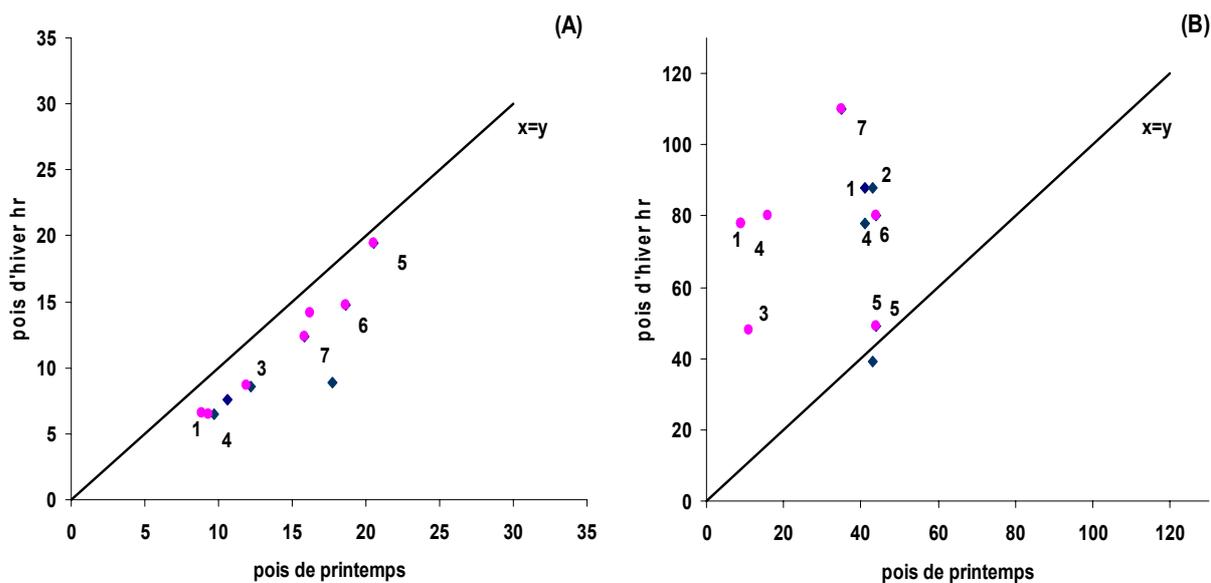
Au contraire, l'effet de la date de semis sur la variabilité du rendement est fonction du type de pois et du milieu. Pour le pois de printemps, le coefficient de variation du rendement a été supérieur en semis tardif par rapport au semis précoce uniquement à Toulouse sans irrigation en sol profond (n°5) (Figures III.3 et III.4). Pour le pois d'hiver, les rendements ont été plus variables en semis tardif que précoce dans deux milieux : Chartres sans irrigation en sol superficiel (n°2) et profond (n°6). Pour chacune de ces situations, l'effet de la date de semis peut s'expliquer par un décalage de la date de début floraison, avec pour conséquence des risques de stress hydriques plus importants (Guilioni et Jeuffroy, 2004 ; Lecoœur et Guilioni, 2004).

Figure III.3. Confrontation des valeurs simulées de rendement (en $q\ ha^{-1}$, A) et coefficient de variation (en %, B) en semis précoce et tardif pour les pois de type printemps (◆) et de type hiver (■). Les milieux correspondants (décrits dans le Tableau III.2) sont indiqués par les numéros à côté de chaque symbole.



Il est à noter que les dates de semis, et donc de début floraison, sont « optimales », ainsi que les conditions de semis et de culture (pas de ravageur, d'état structural tassé, de maladie, etc, susceptibles de venir perturber le fonctionnement de la culture), ce qui peut expliquer le faible écart entre date de semis, contrairement à ce que l'on peut observer en parcelles agricoles.

Figure III.4. Coefficients de variation (en %) du rendement de pois en fonction du milieu (indiqué par le numéro), du type de pois (pois de printemps ou pois d'hiver hr) et de la date de semis (précoce : ◆, ou tardif : ●) sans (A) ou avec (B) prise en compte du risque de gel.



3.1.2. Intégration du risque de gel

L'intégration du risque de gel a un effet significatif sur la valeur du rendement (Figure III.5). En effet, pour le pois de printemps, quel que soit le milieu, le semis tardif a présenté des rendements plus élevés (moyenne de 50 q ha⁻¹) que le semis précoce (moyenne de 44 q ha⁻¹). Pour le pois de printemps, les coefficients de variation ont été systématiquement inférieurs en semis tardif par rapport au semis précoce (Figure III.5) et relativement peu variables d'un milieu à l'autre (valeurs comprises entre 35% et 44% pour un semis précoce et 9% et 24% pour un semis tardif). Ces résultats sont cohérents dans la mesure où, pour un semis de printemps, plus le semis est tardif, plus le risque de gel est faible.

Pour le pois d'hiver, deux types de milieux se distinguent : ceux pour lesquels il n'y a eu aucun effet de la précocité au semis (milieux n°1, 2, 4, 6, 7, correspondant à Mons et Chartres) et ceux pour lesquels un semis tardif a réduit le potentiel de rendement en moyenne de 5.3 q ha⁻¹ (milieux n°3 et 5, Toulouse). En effet, à Toulouse, la période de semis conseillée par l'UNIP est plus tardive que celle des deux autres lieux : le semis le plus tardif à Toulouse est le 5 janvier, période pendant laquelle les risques de gel entre semis et levée sont élevés et ce, malgré le climat plus doux en hiver de cette région. A l'inverse du pois de printemps, pour le pois d'hiver, les coefficients ont été très variables entre milieux (plage de variation entre 39% et 117% pour les deux dates de semis) mais peu différents entre dates de semis. Ces résultats sont cohérents avec la réalité dans la mesure où le nord de la France est connu pour son climat plus froid en hiver, et des risques de gel sur ces variétés de type hiver non négligeables.

Le modèle n'a pas mis en évidence d'effet systématique d'un semis précoce sur le niveau et la stabilité du rendement dans tous les milieux, sauf si l'on intègre le risque de gel et ce, plus spécifiquement pour le pois de printemps. Ce risque est donc important à prendre en compte dans un objectif de comparaison d'intérêts agronomiques de différents types variétaux.

3.2. Type de pois et stabilité du rendement

Constat 2 :

Le pois d'hiver hr (ph hr) a un rendement plus stable que le pois de printemps (pp) quelle que soit la région

3.2.1. Effet de la précocité au semis sur les risques de stress hydrique et thermique de fin de cycle

Quelle que soit la précocité au semis, dans chaque milieu, le pois d'hiver a présenté un rendement plus stable que le pois de printemps, ce qui est conforme aux observations courantes (Figure III.4) et expliqué par les risques plus élevés de stress hydriques et thermiques liés à une date de début floraison plus tardive que pour le pois d'hiver (Chaillat, 2000). De plus, le pois de printemps ayant un profil de graines plus court que les pois d'hiver (à cause de leur nombre d'étages plus faible), tout stress pendant la phase d'élaboration du nombre de graines (entre DF et FSLA) a un effet négatif irréversible sur le nombre de graines par m² élaboré, pris en compte dans le modèle par l'effet des stress hydriques et thermiques sur l'accumulation quotidienne de biomasse (partie 2).

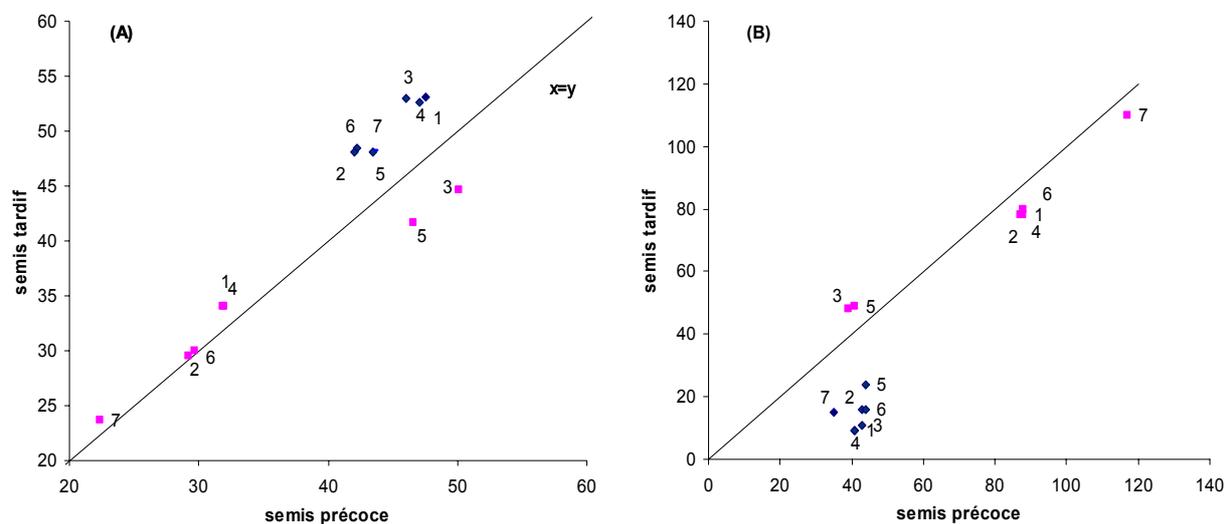
3.2.2. Intégration du risque de gel

L'intégration du risque de gel au calcul du rendement moyen a augmenté de façon très importante le coefficient de variation du pois d'hiver, le rendant systématiquement supérieur au pois de printemps dans chaque milieu et quelle que soit la date de semis (Figure III.5). Le coefficient de variation du rendement de pois d'hiver est très variable en fonction du lieu : 44%, 83% et 113% respectivement pour Toulouse, Chartres et Mons, contre 27%, 27% et 25% pour pois de printemps, respectivement pour Toulouse, Chartres et Mons.

La façon dont a été pris en compte l'effet du gel sur le rendement peut expliquer les forts coefficients de variation simulés et serait certainement à moduler en fonction du moment et des conditions dans lesquelles survient le gel (en particulier, nous n'avons pas pris en compte de phénomène d'endurcissement, pourtant connu chez cette espèce, mais non quantifié).

Le modèle a correctement simulé la plus grande instabilité de rendement pour les types printemps que les types hiver du fait de stress de fin de cycle. L'intégration de l'effet de gel sur le rendement est importante pour l'évaluation de nouvelles variétés d'hiver dans différentes régions de France. Toutefois, la prise en compte actuelle de cet effet sur le rendement peut surestimer les risques d'instabilité, notamment pour les types hiver.

Figure III.5. Confrontation des valeurs simulées de rendement (en $q\ ha^{-1}$, A) et coefficient de variation (en %, B) en semis précoce et tardif pour les pois de type printemps (◆) et pois d'hiver (■), en intégrant l'hypothèse sur le gel. Les milieux correspondant sont indiqués par les numéros à côté de chaque symbole.



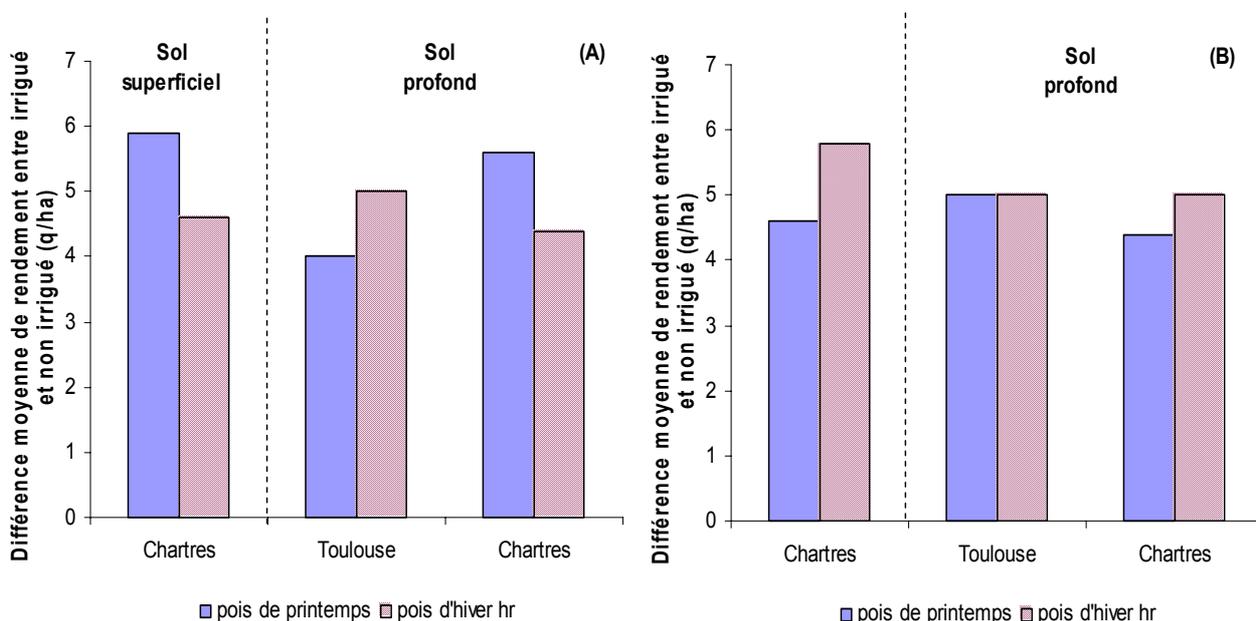
3.3. Irrigation

Constat 3 :

L'irrigation et les sols plus profonds permettent d'augmenter le potentiel et la stabilité du rendement

Pour un semis précoce, pour un pois de printemps, le gain de rendement grâce à l'irrigation, a été très légèrement supérieur (0.3 q ha^{-1}) en sol superficiel que profond à Chartres (Figure III.6). A Toulouse, le gain de rendement a été plus faible d'environ 1.7 q ha^{-1} par rapport à Chartres (les deux profondeurs de sol confondues). Pour le pois d'hiver hr, en semis précoce peu de différences entre profondeur de sol et lieux ont été mises en évidence : le gain de rendement moyen a été de 4.0 q ha^{-1} . Lorsque l'irrigation du pois est bien conduite, l'efficacité de l'eau d'irrigation est de 6 à 9 q ha^{-1} par apport de 30 mm (Guide de culture du pois protéagineux 2003), ce qui est inférieur en moyenne à ce qui a été simulé. Toutefois, il est à noter nous ne sommes pas sûrs que chaque année, le climat engendre systématiquement des stress abiotiques, alors que l'irrigation a été appliquée chaque année. L'irrigation n'a donc pas été forcément valorisée toutes les années. De plus, le raisonnement de l'irrigation (dose et date) est généralement adaptée d'une situation à l'autre en fonction de la pluviométrie reçue pendant la culture de pois et suivant la date de semis, ce que nous n'avons pas été en mesure de simuler avec le modèle et qui peut également contribuer à expliquer cette sous-estimation de la valorisation de l'eau d'irrigation.

Figure III.6. Ecart de rendement moyen sur 28 climats entre irrigué et non irrigué (q ha^{-1}) pour trois milieux : Chartres en sol superficiel et profond et Toulouse en sol profond en fonction du type de pois et de la précocité au semis (semis précoce (A) et tardif (B)).



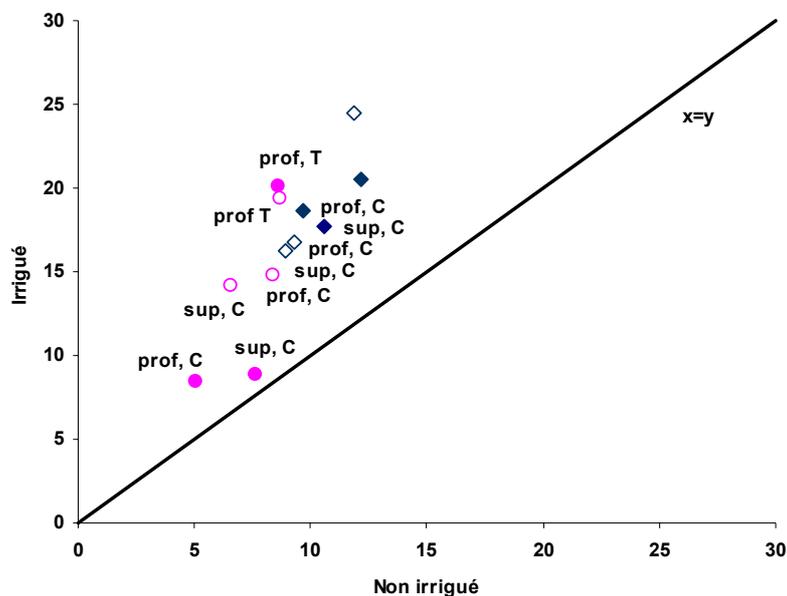
Pour un semis tardif, pour le pois de printemps, l'effet de l'irrigation sur le gain de rendement est comparable quelle que soit la profondeur de sol et le lieu (gain de rendement moyen de 4.7 q ha^{-1}). Pour le pois d'hiver, le gain de rendement a été légèrement supérieur (de 0.8 q ha^{-1}) en sol superficiel à Chartres par rapport aux deux autres milieux.

Quels que soient le type de pois, la profondeur de sol et la précocité au semis, pour tous les milieux, l'irrigation a permis de réduire la variabilité des rendements (Figure III.7). Pour le pois de

printemps, l'irrigation a diminué la variabilité du rendement entre 7.1% et 12.6%, contre 1.3% et 10.7% pour le pois d'hiver : l'avancement du cycle de la culture pour ph hr le rend potentiellement moins susceptible d'être soumis à un stress hydrique de fin de cycle, ce qui confirme les observations de Chaillot (2000). De plus, cet effet est plus marqué pour pp que pour ph hr, ce qui est conforme aux constats couramment faits.

La profondeur de sol n'a pas eu d'effet systématique sur le rendement et sa stabilité contrairement à l'irrigation. Malgré une sous-estimation de l'effet de l'irrigation sur le niveau de rendement, le modèle simule correctement son effet sur la stabilité du rendement.

Figure III.7. Coefficients de variation du rendement de pois en fonction de l'utilisation ou non d'irrigation, du type de pois et de la date de semis (pois de printemps : semis précoce ◆ ou tardif ◇ et pois d'hiver hr : semis précoce ● ou tardif ○) en fonction de la profondeur de sol (superficiel : sup ou profond : prof) et du lieu (Chartres : C ou Toulouse : T).



3.4. Adaptation du type de pois et de l'itinéraire technique à la zone de culture

Constat 4 :

Les pois de printemps sont adaptés au nord et les pois d'hiver hr au sud : ils présentent un meilleur rendement et un plus faible risque de gel

3.4.1. Effet de la région sur les risques de stress hydriques et thermiques de fin de cycle

D'après les simulations, les rendements de Toulouse et Mons diffèrent au plus de 5.7%, quels que soient le type de pois et la précocité à DF (Figure III.3), compte tenu des dates de semis et de début floraison choisies pour chaque type variétal. Les niveaux de rendement sont comparables pour les deux types de pois pour tous les lieux, sans prendre en compte les risques de gel (moyenne de 48 q ha⁻¹ et 50 q ha⁻¹ pour pois de printemps et hiver, respectivement, Figure III.8), ce qui est supérieur à la moyenne régionale observée à Toulouse mais conforme à la moyenne régionale observée à Mons

(Figure III.2). Cependant, comme déjà évoqué précédemment, le rendement simulé est potentiel du fait de dates de semis et de début floraison « optimales » et d'absence de prise en compte de ravageurs et de maladies, contrairement aux valeurs de la Figure III.2, élaborées à partir de parcelles agricoles.

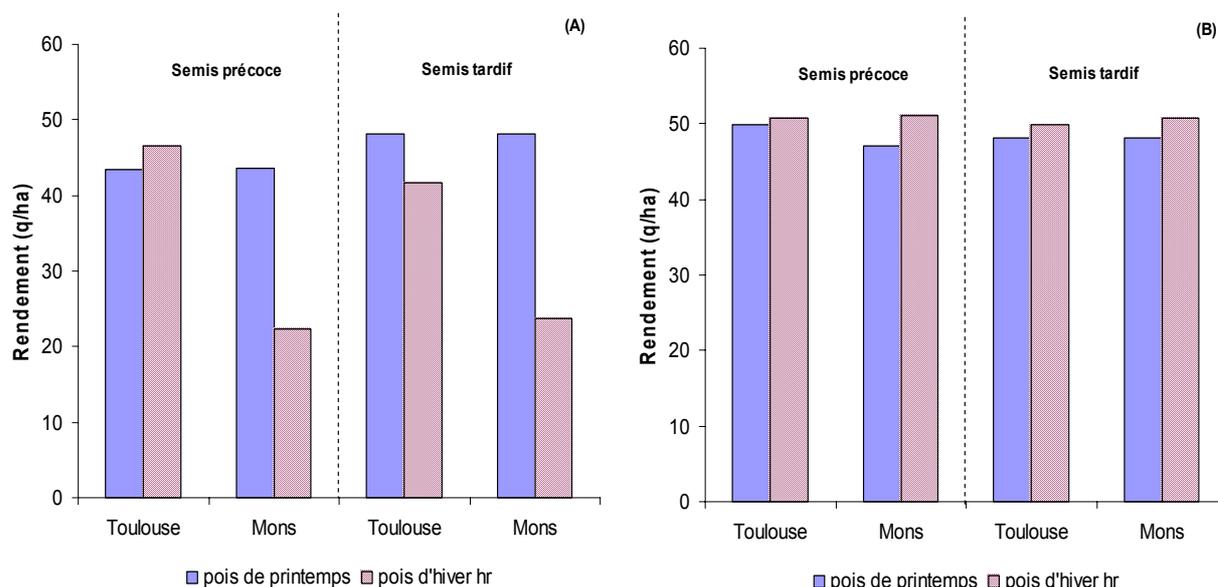
Nos résultats ont mis en évidence que les risques climatiques de fin de cycle avaient principalement un effet sur la stabilité du rendement. Dans nos simulations, à Toulouse, un pois de printemps est semé entre le 5 janvier et le 20 février pour un début floraison entre le 22 avril et le 12 mai. Les variétés de type printemps ont un nombre d'étages reproducteurs plus faible que les variétés de type hiver. La durée de la phase d'élaboration des composantes du rendement est donc plus courte. Cependant, tout stress pendant cette phase a des conséquences importantes sur le rendement (Guilioni et al., 2003; Jeuffroy, 1991), ce qui se traduit donc par une grande variabilité du rendement plus particulièrement dans cette région comme l'a mis en évidence le modèle. De plus, le modèle n'intègre pas les risques de bactériose lors de semis trop précoces qui peuvent également induire des pertes de rendements non négligeables. A Mons, le semis et donc le début floraison sont plus tardifs qu'à Toulouse.

Le pois d'hiver reste peu développé dans le nord de la France à cause de la courte durée de résistance au froid des variétés actuelles et les risques importants de gel. Ce résultat a bien été confirmé par le modèle qui a mis en évidence un risque de gel entre semis et levée de 3 années sur 10 pour un semis le 01/11 et 5 années sur 10 pour un semis le 20/11.

3.4.2. Intégration du risque de gel

A Toulouse, les niveaux de rendement pour pois d'hiver et de printemps ont été comparables pour un semis précoce, tandis que le rendement a été 3.1 q ha⁻¹ supérieur pour un pois de printemps par rapport à un pois d'hiver pour un semis tardif (Figure III.8). A Mons, quelle que soit la précocité au semis, le pois de printemps a eu un rendement en moyenne 23 q ha⁻¹ supérieur au pois d'hiver. Le coefficient de variation du rendement a été supérieur pour pois d'hiver par rapport au pois de printemps pour les deux précocités au semis, plus spécifiquement à Mons (Figure III.5).

Figure III.8. Rendement (q ha⁻¹) moyen sur 28 climats pour deux milieux en sol profond non irrigué : Toulouse et Mons en fonction du type de pois et de la précocité au semis, en intégrant (A) ou non (B) les risques de gel sur le rendement.



Malgré un potentiel de rendement équivalent pour les deux types de pois et une plus grande stabilité des rendements pour pois d'hiver que pour pois de printemps, les risques de gel élevés dans le nord expliquent pourquoi ce type de variétés y est peu développé.

Les résultats simulés par le modèle sont, dans l'ensemble et pour les techniques qui seront modifiées avec les variétés nouvelles à tester (dates de semis, irrigation, conditions pédo-climatiques), cohérents avec les observations, ce qui justifie le fait de l'utiliser par la suite pour tester le comportement de variétés « virtuelles ».

4. Simulations

Pour les types commercialisés, les caractéristiques variétales retenues pour la comparaison avec les différentes variétés virtuelles de ph Hr sont celles correspondant à la date de semis la plus précoce (DS1).

4.1. Résultats

4.1.1. Rendement et stabilité

Hypothèse 1 :

Pour les nouveaux pois d'hiver Hr (ph Hr), il existe une combinaison de caractères présentant un rendement plus stable et plus élevé dans tous les milieux et quelle que soit la date de semis

a) Effet de la précocité au semis, de la date de début floraison et de l'architecture sur les risques de stress hydriques et thermiques de fin de cycle

Le milieu (combinaison d'une profondeur de sol, d'un lieu et de l'utilisation ou non d'irrigation) et l'année, pour l'ensemble des milieux testés, ont eu un effet significatif sur le rendement sur l'ensemble des variétés virtuelles testées ($P < 0.05$, Tableau III.4).

La date de semis n'a eu aucune influence sur le niveau de rendement ($P > 0.05$, Tableau III.4), à l'inverse de DF et P1G ($P < 0.05$).

En moyenne sur l'ensemble des milieux, DF1 et DF2 ont présenté des rendements comparables mais significativement supérieurs à DF3. Toutefois, cet effet est fonction du milieu. Le même classement a été observé sur les milieux 2 et 7. Dans les milieux 3, 5 et 6, plus DF est précoce, plus le rendement est élevé. Dans le milieu 1, DF2 et DF3 ont des rendements comparables, supérieurs à DF1. Enfin, dans le milieu 4, DF2 a significativement favorisé le rendement par rapport à DF1 et DF3.

En moyenne sur l'ensemble des milieux, les variétés virtuelles à petites graines ont eu des rendements supérieurs à ceux à grosses graines. Dans seulement deux milieux (3 et 5), le P1G n'a pas eu d'effet significatif sur le rendement.

Pour certains milieux, comme Chartres en sol superficiel irrigué (n°1), les variétés virtuelles testées ont des rendements peu différents entre elles : 10 sur 12 ont des rendements non significativement différents et élevés.

L'une des variétés virtuelles testées, que l'on peut alors considérée comme idéotype⁷ adaptée à une grande diversité de milieux, obtient, quelle que soit la date de semis, les meilleurs résultats dans tous les milieux : DF1 P1G1 (DF le 20 avril et P1G de 0.125 g gr⁻¹). L'idéotype DF2 P1G1 (DF le 10 mai et P1G de 0.125 g gr⁻¹) obtient également de très bons résultats dans 5 milieux (1, 2, 3, 4 et 6) sur les 7 testés.

Tableau III.4. Comparaison des variétés virtuelles de pois d'hiver Hr : résultats d'analyse de variance, tous milieux confondus et par milieu, des effets de la date de semis (DS1 : 10/10 ; DS2 : 01/11), de la date de début floraison (DF1 : 20/04 ; DF2 : 10/05 ; DF3 : 30/05) et du poids moyen d'une graine (P1G1 : 0.125 g gr⁻¹ ; P1G2 : 0.280 g gr⁻¹) sur le rendement, sans prise en compte des risques de gel, et classement des variétés virtuelles.

			Sol superficiel		Sol profond					
			Irrigué	Non irrigué	Irrigué	Non Irrigué				
			Chartres		Toulouse	Chartres	Toulouse	Chartres	Mons	
			Tous milieux	1	2	3	4	5	6	7
		milieu	**							
		climat	**	**	**	**	**	**	**	**
		DS	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
		R ²	0.41	0.42	0.64	0.68	0.39	0.78	0.64	0.49
DS	DF	PMG								
DS1	DF1	P1G1	a	a	a	a	a	ab	a	a
		P1G2	dc	bc	ab	a	bc	abc	bc	bcde
	DF2	P1G1	bcd	a	ab	a	a	c	abc	bcde
		P1G2	d	ab	bc	a	abc	bc	dc	bcde
	DF3	P1G1	e	a	d	b	abc	d	e	de
		P1G2	e	ab	d	b	abc	d	e	d
DS2	DF1	P1G1	ab	ab	a	a	ab	a	ab	abc
		P1G2	d	c	ab	a	c	abc	bc	cde
	DF2	P1G1	abc	a	ab	a	a	bc	abc	a
		P1G2	dc	ab	ab	a	abc	abc	c	abcd
	DF3	P1G1	e	a	dc	b	abc	d	ed	cde
		P1G2	e	ab	dc	b	abc	d	ed	de

** significatif au seuil de 5%

ns : non significatif au seuil 5%

L'effet de la date de semis devient significatif dès lors que l'on prend en compte des risques de gel sur le rendement, que ce soit en moyenne sur tous les milieux ou dans chacun des milieux testés ($P < 0.05$, Tableau III.5), excepté pour Toulouse (milieux 3 et 5). Au final, seule la variété virtuelle DF1 P1G1 (DF le 20 avril et P1G de 0.125 g gr⁻¹) obtient des rendements satisfaisants pour les deux dates de

⁷ Variété « idéale » présentant une combinaison spécifique de caractéristiques favorable à la photosynthèse, la croissance et à la production de graines (Donald, 1968).

semis sur la plupart des milieux : sur les milieux n°1, 4 et 7, aucune variété virtuelle n'a obtenu, en semis tardif, de rendement du niveau de ceux obtenus en semis plus précoce (DS1). Pour un semis précoce, la variété virtuelle DF2 P1G1 (DF le 10 mai et P1G de 0.125 g gr⁻¹) a des rendements non significativement différents des meilleurs rendements observés pour cette date de semis dans tous les milieux excepté à Toulouse en non irrigué (milieu 5).

L'effet de DF est significatif (P<0.05), tous milieux confondus, et les DF sont classées comme précédemment en moyenne sur l'ensemble des milieux. Toutefois, à Chartres, en sol superficiel et profond, en conditions irriguées, aucun effet significatif de DF n'est mis en évidence (P>0.05).

Tableau III.5. Comparaison des variétés virtuelles de pois d'hiver Hr : résultats d'analyse de variance, tous milieux confondus et par milieu, des effets de la date de semis (DS1 : 10/10 ; DS2 : 01/11), de la date de début floraison (DF1 : 20/04 ; DF2 : 10/05 ; DF3 : 30/05) et du poids moyen d'une graine (P1G1 : 0.125 g gr⁻¹ ; P1G2 : 0.280 g gr⁻¹) sur le rendement, avec prise en compte des risques de gel, et classement des variétés virtuelles.

				Sol superficiel		Sol profond				
				Irrigué	Non irrigué	Irrigué		Non Irrigué		
				Chartres		Toulouse	Chartres	Toulouse	Chartres	Mons
			Tous milieux	1	2	3	4	5	6	7
		milieu	**							
		climat	**	**	**	**	**	**	**	**
		R ²	0.33	0.55	0.52	0.68	0.53	0.78	0.52	0.63
DS	DF	PMG								
DS1	DF1	P1G1	a	ab	a	a	ab	ab	a	a
		P1G2	bc	abcd	ab	a	abcde	abc	ab	ab
	DF2	P1G1	ab	a	ab	a	a	c	ab	a
		P1G2	bc	abc	ab	a	abc	bc	ab	ab
	DF3	P1G1	d	ab	bc	b	abcd	d	bc	abc
		P1G2	d	abc	bc	b	abcd	d	bc	abcd
DS2	DF1	P1G1	cd	dc	ab	a	bcde	A	ab	cde
		P1G2	d	d	bc	a	e	abc	bc	de
	DF2	P1G1	d	abcd	bc	a	abcde	bc	bc	bcde
		P1G2	d	abcd	bc	a	cde	abc	bc	cde
	DF3	P1G1	e	abcd	c	b	cde	d	c	de
		P1G2	e	dc	c	b	de	d	c	e

** significatif au seuil de 1%

ns : non significatif au seuil 5%

b) Niveau de rendement et stabilité par rapport au pois de printemps

Les figures présentées (Figures III.9 à III.12 et annexe 15) ont pour objectif de comparer le niveau et la stabilité (grâce à l'écart type relatif) du rendement d'un pois d'hiver commercialisé et des 12 variétés virtuelles avec ceux d'un pois de printemps. La moyenne et l'écart type du rendement, sur 28 ans, ont donc été calculés pour chaque variété sur chacun des milieux. L'abscisse correspond à la différence entre l'écart type du rendement du pois de printemps et celui de la variété virtuelle considéré. L'ordonnée est le rapport entre le rendement moyen de la variété virtuelle considérée et celui du pois de printemps. L'objectif est de déterminer, d'une part, par milieu et, d'autre part, sur l'ensemble des milieux, les variétés virtuelles qui présentent un intérêt en terme de stabilité et de niveau de rendement par rapport au pois de printemps (différence des écarts types supérieure à 0 et ratio supérieur à 1 : carré en haut à droite) et au pois d'hiver hr.

Figure III.9. Comparaison du rendement relatif (ratio du rendement du ph hr ou Hr / rendement du pp) et écart-type relatif (ET, différence des écarts types entre pp et ph hr ou Hr) des variétés virtuelles (combinaisons DF x P1G) et du ph hr par rapport à pp en moyenne de tous les milieux et des deux dates de semis, sans prise en compte des risques de gel. Les droites d'abscisse ET=0 et d'ordonnée rdt relatif = 1 permettent de séparer les situations selon respectivement leur variabilité et leur rendement (rdt) relatif comparativement à ceux du pp.

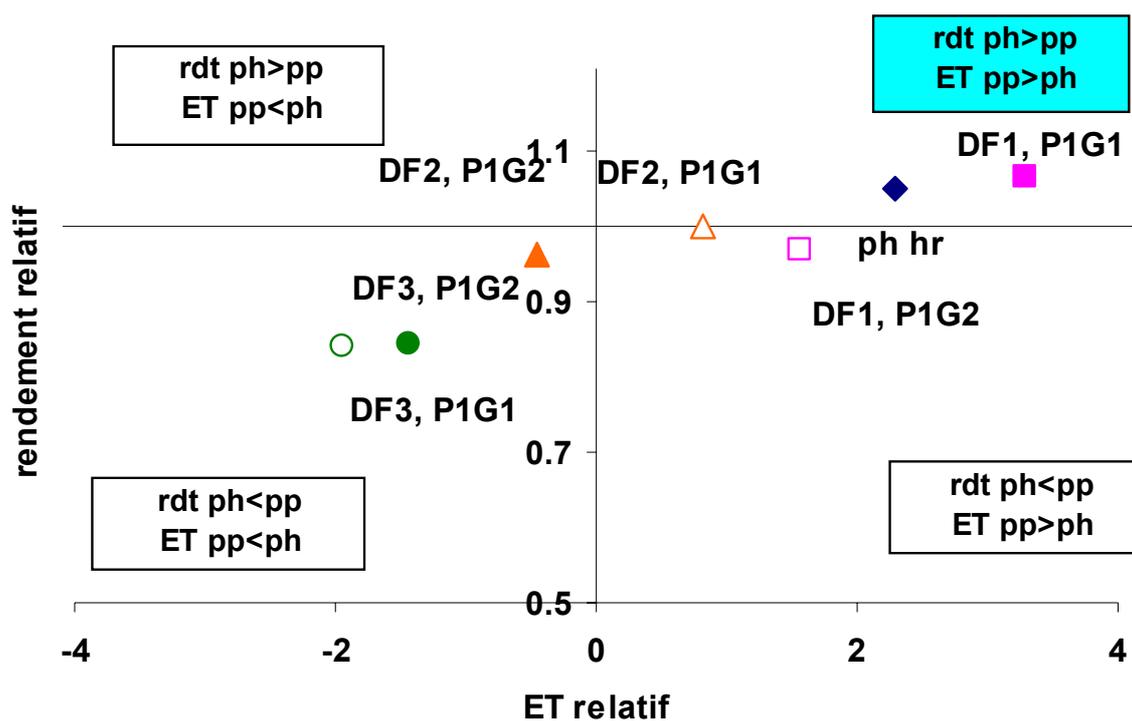
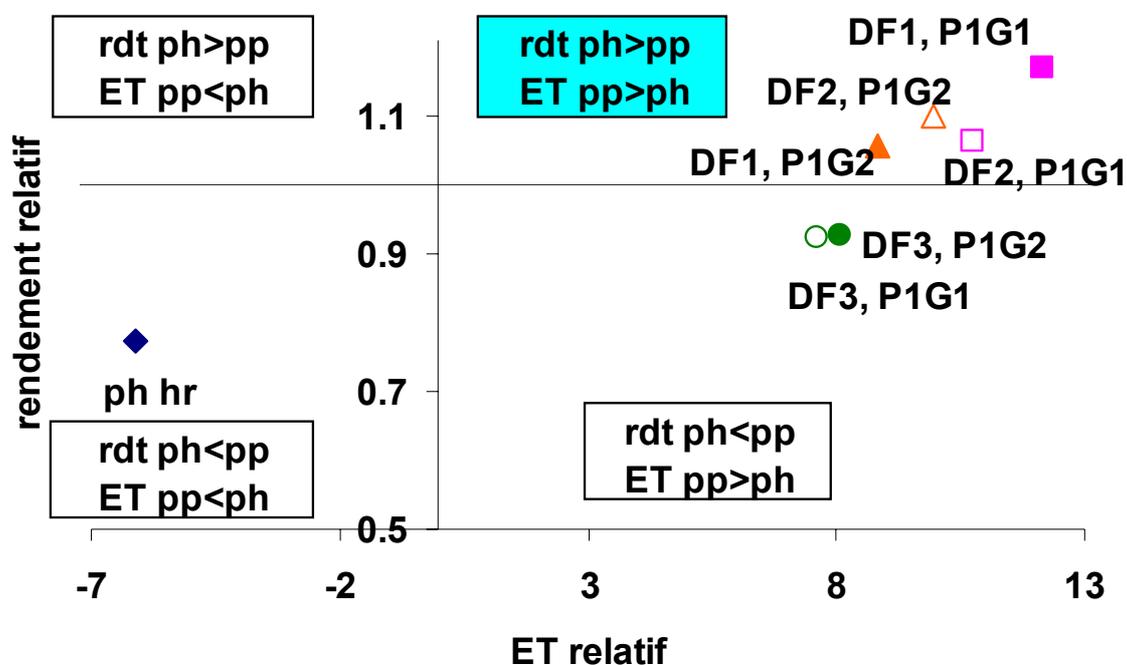


Figure III.10. Comparaison du rendement relatif (ratio du rendement du ph hr ou Hr / rendement du pp) et écart-type relatif (ET, différence des écarts types entre pp et ph hr ou Hr) des variétés virtuelles (combinaisons DF x P1G) et du ph hr par rapport à pp en moyenne de tous les milieux et des deux dates de semis, avec prise en compte des risques de gel. Les droites d'abscisse ET=0 et d'ordonnée rdt relatif = 1 permettent de séparer les situations selon respectivement leur variabilité et leur rendement (rdt) relatif comparativement à ceux du pp



En moyenne sur tous les milieux

Sans prise en compte des risques de gel (Figure III.9), en moyenne sur l'ensemble des milieux, toutes les variétés testées, aux deux dates de début floraison les plus précoces, ont un niveau de rendement comparable au pois de printemps (ratio entre 0.94 et 1.04). Toutefois, DF1 permet une plus grande stabilité du rendement par rapport au pois de printemps, phénomène non observé pour DF2. Un faible poids de graine (P1G de 0.125 g gr⁻¹) accentue le résultat pour DF1. Au final, les variétés virtuelles DF1 P1G1 et P1G2 et DF2 P1G1 présentent un niveau de rendement supérieur ou égal à celui du pois de printemps et une stabilité de rendement supérieure à celle du pois de printemps et comparable au pois d'hiver hr (à plus ou moins 2 q ha⁻¹ près).

Toutefois, la prise en compte des risques de gel sur le rendement a un effet considérable sur ce classement (Figure III.10). Tout d'abord, la gamme de variation des écarts types résiduels est plus importante : entre -3 q ha⁻¹ et 3 q ha⁻¹ sans prise en compte des risques de gel contre -5 q ha⁻¹ à 15 q ha⁻¹ avec. Le classement des variétés virtuelles sur la base du niveau de rendement par rapport au pois de printemps reste, malgré tout, proche à la situation sans prise en compte du gel : la variété virtuelle DF1 P1G1 permet toujours une plus grande stabilité du rendement et un niveau plus élevé. En revanche le pois d'hiver hr a un niveau et une stabilité de rendement plus faibles que le pois de printemps et l'ensemble des variétés virtuelles testées. De plus, toutes les variétés virtuelles ont un rendement plus stable que le pois de printemps, avec peu d'écart entre les différentes valeurs testées de DF et P1G (gamme de variation des écart types résiduels entre 6.7 q ha⁻¹ et 7.6 q ha⁻¹ pour ces 5 variétés virtuelles), excepté pour DF1 P1G1, comme vu précédemment.

Figure III.11. Comparaison du rendement relatif (ratio du rendement du ph hr ou Hr / rendement du pp) et écart-type relatif (ET, différence des écarts types entre pp et ph hr ou Hr) des variétés virtuelles (DF x P1G) et de ph hr par rapport à pp en fonction des milieux pour un semis précoce, sans prise en compte des risques de gel. Les droites d'abscisse ET=0 et d'ordonnée rdt relatif = 1 permettent de séparer les situations selon respectivement leur variabilité et leur rendement (rdt) relatif comparativement à ceux du pp.

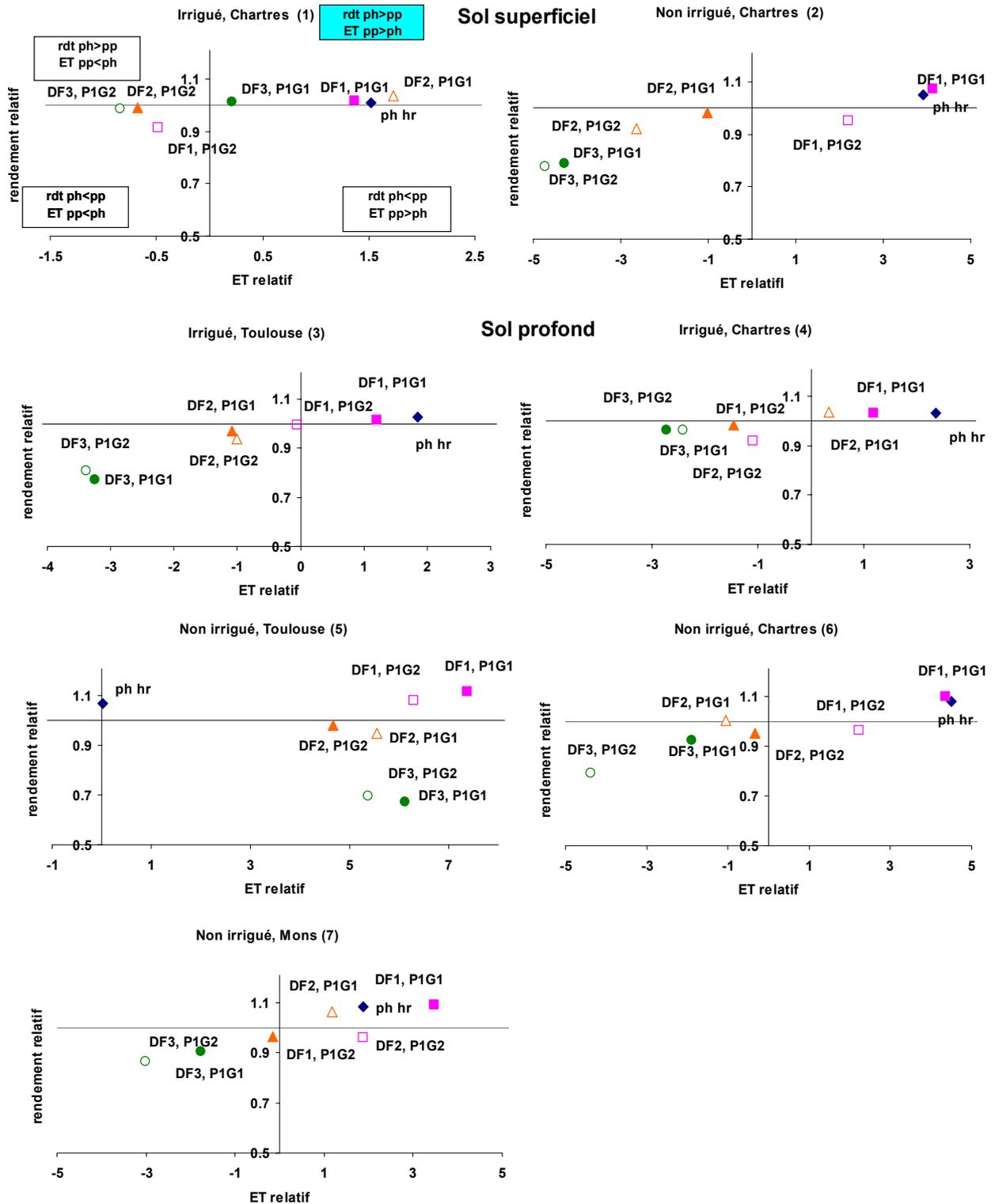
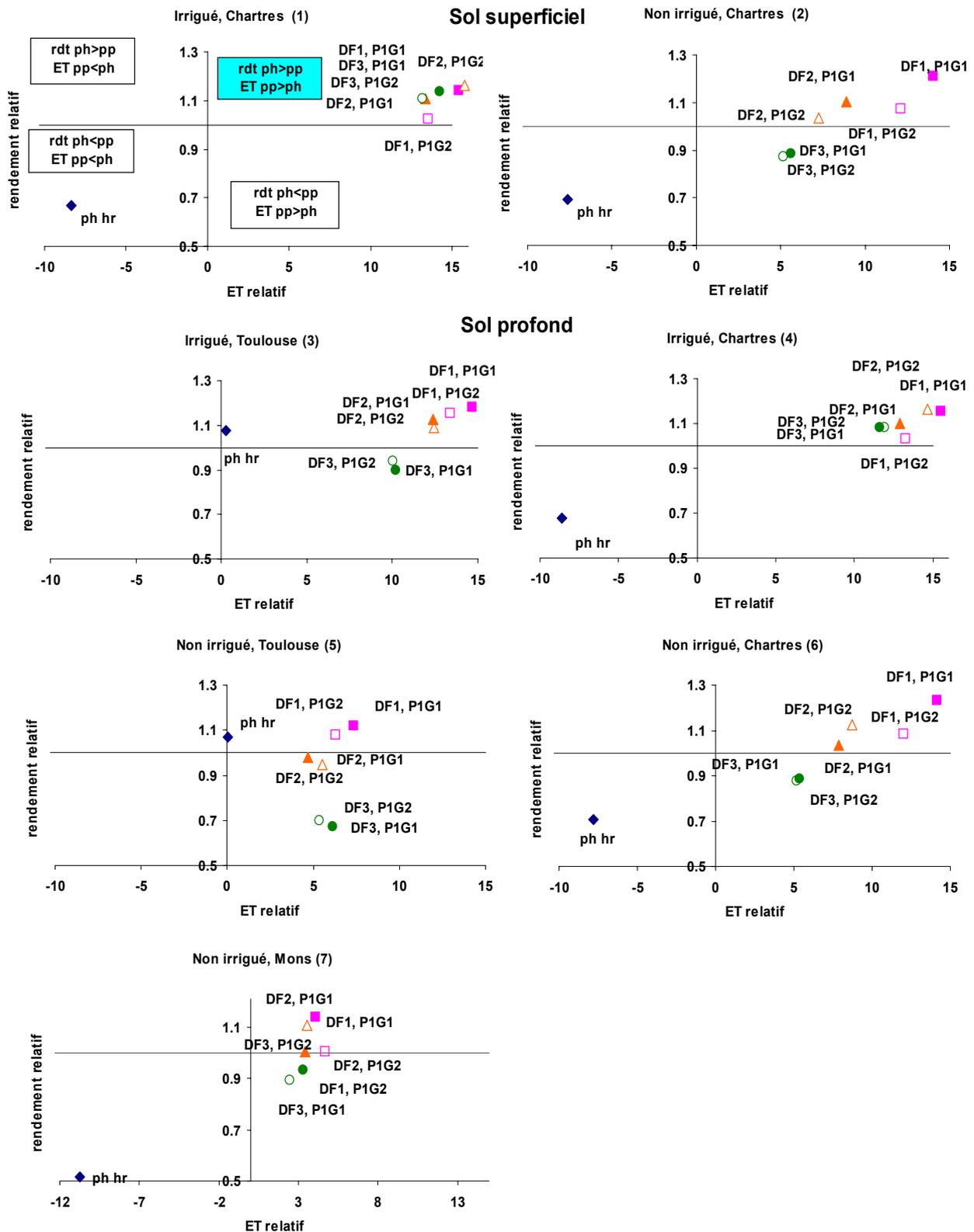


Figure III.12. Comparaison du rendement relatif (ratio du rendement du ph hr ou Hr / rendement du pp) et écart-type relatif (ET, différence des écarts types entre pp et ph hr ou Hr) des variétés virtuelles (DF x P1G) et de ph hr par rapport à pp en fonction des milieux pour un semis précoce, avec prise en compte des risques de gel. Les droites d'abscisse ET=0 et d'ordonnée rdt relatif = 1 permettent de séparer les situations selon respectivement leur variabilité et leur rendement (rdt) relatif comparativement à ceux du pp.



Semis précoce

En absence de prise en compte de l'effet du gel (Figure III.11), le P1G est le principal facteur qui influence le niveau et la stabilité de rendement par rapport au pois de printemps. Les variétés virtuelles testées ont un avantage plus marqué sur la stabilité du rendement que sur le niveau atteint par rapport au pois de printemps : sur l'ensemble des milieux, aucune variété testée n'a un rendement relatif supérieur à 1.1 fois par rapport au pois de printemps, par opposition à l'écart type résiduel pouvant être jusqu'à 5 q ha⁻¹ inférieur (sol profond non irrigué Chartres, milieu n°6). Sur chaque milieu et sur l'un des deux critères jugés ici, il existe toujours au moins une variété virtuelle plus performante que le pois de printemps.

Les nouvelles variétés apportent peu d'amélioration en terme de stabilité et de niveau de rendement par rapport au pois d'hiver hr, excepté pour Toulouse en situation non irriguée (n°5). Dans trois milieux (sol superficiel irrigué et non irrigué Chartres : n°1 et 2 ; sol profond non irrigué Chartres : n°6), le pois d'hiver présente une stabilité du rendement équivalente à celle des pois d'hiver Hr. Dans deux milieux, le pois d'hiver hr présente un rendement plus stable que les variétés virtuelles testées (sol profond irrigué Toulouse et Chartres : n°2 et 3). Pour un milieu (non irrigué Mons : n°7), une variété virtuelle est plus stable que le pois d'hiver hr. Enfin, le milieu non irrigué Toulouse (n°5) se distingue des autres milieux car toutes les variétés virtuelles ont un rendement plus stable que le pois de printemps et le pois d'hiver hr, mais seules celles à DF le 20 avril et le 10 mai ont un niveau de rendement du même ordre de grandeur que les deux types commercialisés.

En sol superficiel, en absence d'irrigation, les variétés à DF précoce (20 avril : DF1) sont avantageuses en terme de stabilité de rendement par rapport au pois de printemps, quel que soit leur poids moyen de graines. L'irrigation permet d'améliorer la stabilité des rendements des variétés à petites graines et ce, quelle que soit la date de DF. En sol profond, à Chartres, les variétés à DF précoce (20 avril) présentent un avantage par rapport au pois de printemps sans irrigation (excepté pour DF1 P1G2 en irrigué). A Toulouse, en absence d'irrigation, aucune variété n'est meilleure en rendement que le pois de printemps, excepté pour les deux variétés à DF très précoce (20 avril). Enfin, à Mons, deux dates de DF (20 avril et 10 mai) permettent l'obtention de rendements plus stables que le pois de printemps.

La prise en compte du risque de gel (Figure III.12) a un effet considérable sur les résultats. La gamme des écarts types est plus importante (entre -5 et 5 q ha⁻¹ sans prise en compte du gel contre -12 à 15 q ha⁻¹ avec). Quelques variétés virtuelles peuvent avoir un rendement 1.1 fois supérieur à celui du pois de printemps (milieux n°1, 2, 3, 4, 6). Mais l'effet principal consiste une fois encore à une stabilisation du rendement : dans tous les milieux, les nouvelles variétés présentent un rendement plus stable que le pois de printemps et le pois d'hiver hr, ce qui confirme l'intérêt de ces dernières quant à la résistance au froid. Trois situations se distinguent. Dans deux milieux (sol superficiel et profond, irrigué Chartres : n°1 et 4), quels que soient la date de DF et le P1G, les rendements sont plus stables et supérieurs au pois de printemps et au pois d'hiver hr, les écarts types résiduels de toutes les variétés sont dans une gamme de valeurs comparable : entre 13.3 et 15.7 q ha⁻¹ pour le milieu 1 et 11.6 et 15.5 q ha⁻¹ pour le milieu n°4. Dans trois milieux (sol superficiel et profond non irrigué Chartres : n°2 et 6 et sol profond irrigué Toulouse : n°3), plus la date de DF est précoce, plus les rendements sont élevés et stables par rapport au pois de printemps, avec un léger avantage des variétés à petites graines : le niveau de rendement est inférieur à celui du pois de printemps pour la DF la plus tardive (30 mai : DF3). Enfin, dans les deux derniers milieux (sol profond non irrigué Toulouse et Mons : n°5 et 7), une DF précoce apporte essentiellement un avantage en terme de niveau de rendement par rapport au pois

de printemps (niveau de rendement inférieur à celui du pois de printemps pour DF3), pour une même gamme d'écart types résiduels (comprise entre 4.6 et 7.3 q ha⁻¹ pour le milieu 5 et 2.4 et 4.0 q ha⁻¹ pour le milieu n°7).

Semis tardif

Sans prise en compte du risque de gel (annexe 15), l'effet de la date de semis est faible : on retrouve les mêmes classements des variétés virtuelles par rapport au pois de printemps et d'hiver hr qu'en semis précoce (Figure III.11).

Avec la prise en compte du risque de gel (annexe 15), l'effet de la date de semis est très important, excepté pour Toulouse. La gamme de variation des écarts types résiduels est plus faible que pour un semis précoce (entre -2 et 2 q ha⁻¹ à Chartres). Toutes les variétés virtuelles présentent toujours un niveau et une stabilité de rendement supérieurs à ceux du pois d'hiver hr, ce qui est moins systématique en comparaison au pois de printemps. A Chartres, dans les 4 milieux étudiés, la variété virtuelle DF1 P1G2 (DF le 20 avril et poids de graine de 0.280 g gr⁻¹) présente un rendement nettement plus stable mais inférieur au pois de printemps. Pour les autres variétés, deux situations se distinguent. Tout d'abord, en milieu irrigué (sol superficiel et profond : n°1 et 4), le rendement est de 0.9 à 1 fois égal à celui du pois de printemps et la stabilité du rendement est équivalente ou à peine supérieure à celle du pois de printemps, excepté pour DF3 P1G2 (DF le 30 mai et poids de graine de 0.280 g gr⁻¹) pour lequel le rendement est nettement plus instable que pour le pois de printemps. Ensuite, en situation irriguée (sol superficiel et profond : n°2 et 6), la stabilité du rendement est équivalente ou à peine supérieure à celle du pois de printemps, mais le niveau de rendement est fonction de la précocité à DF : plus DF est précoce, plus le niveau de rendement se rapproche de celui du pois de printemps. A Mons, toutes les variétés virtuelles présentent un niveau de rendement plus faible (entre 61% et 72% de celui du pois de printemps) et plus instable (écarts types résiduels compris entre -9.6 et 6.1 q ha⁻¹) que le pois de printemps.

4.1.2. Risque de gel

Hypothèse 2 :

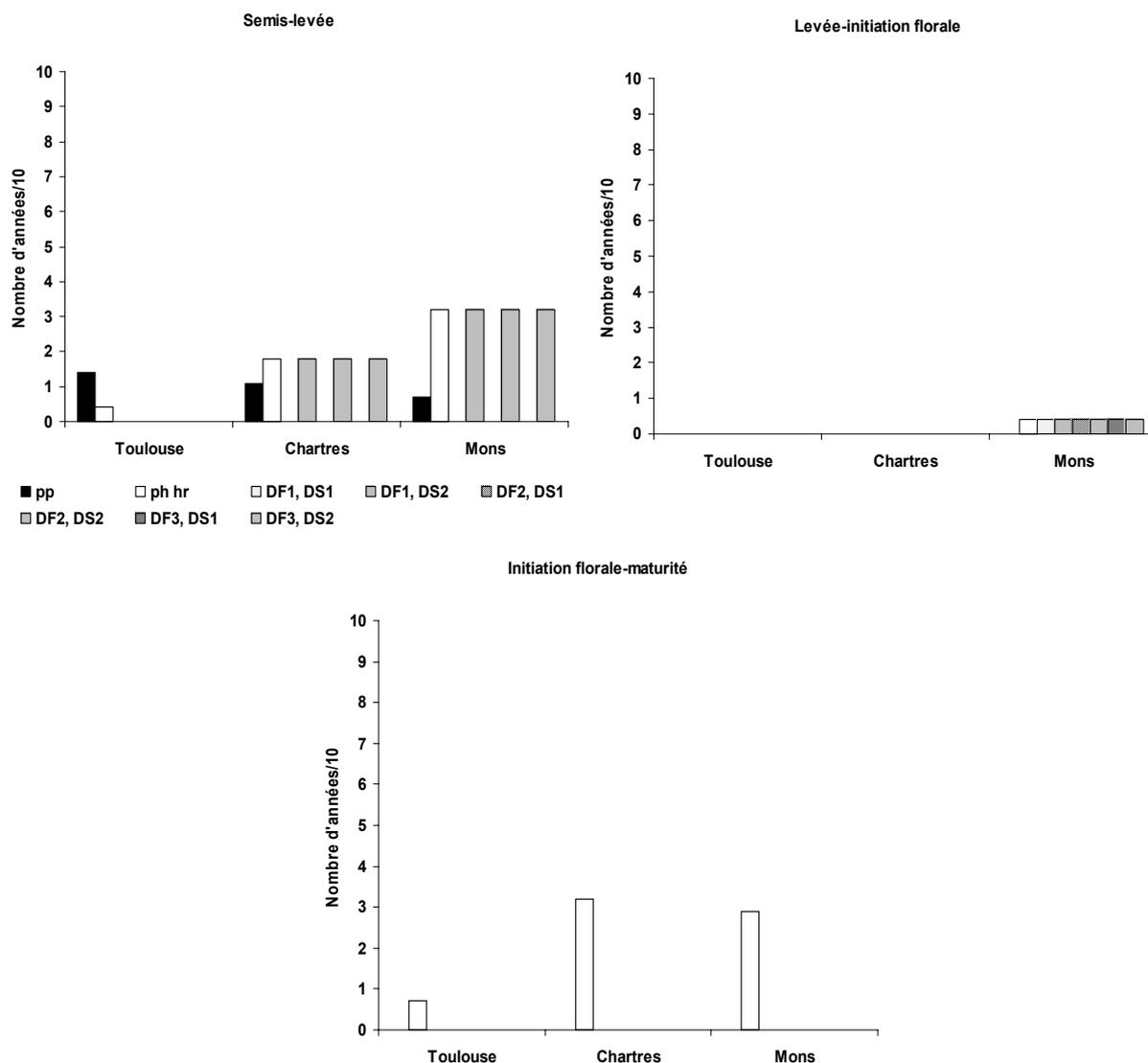
Le risque de gel est plus faible pour les pois d'hiver Hr que pour les pois d'hiver hr

Les risques de gel varient en fonction du stade de la culture au moment de l'apparition des températures gélives, et donc de la date de semis, du lieu et de la variété.

De faibles risques de gel existent pour le pois de printemps en semis précoce entre semis et levée (risque compris entre 0.7 e 1.4 années/10 pour les 3 lieux, Figure III.13). Pour le pois d'hiver hr, les risques de gel sont les plus élevés entre semis-levée et IF-DF, deux phases très sensibles de la culture (Etévé et Derieux, 1982). Ce risque est croissant entre Toulouse, Chartres et Mons et peut atteindre jusqu'à 3 années/10.

Quel que soit DF (et donc la durée entre IF et DF), les variétés virtuelles testées permettent d'éliminer tout risque de gel après IF. En revanche, excepté pour Toulouse, le risque de gel pendant la phase semis-levée, pour un semis tardif, est identique à celui du pois d'hiver hr. Pour les variétés virtuelles testées, ce risque devient nul pour la date de semis précoce, quel que soit le lieu.

Figure III.13. Fréquence de risque de gel (en nombre d'années sur 10) en fonction du type de pois et du stade de la culture pour chacun des lieux.



4.1.3. Quantité d'azote des pailles à maturité

Hypothèse 3 :

Les quantités d'azote contenues dans les pailles des pois d'hiver Hr sont supérieures à celles des variétés classiques

Le lieu a, dans l'ensemble, un faible effet sur ce classement (Tableau III.6).

Pour l'ensemble des milieux, le pois de printemps a une quantité d'azote contenue dans les pailles à maturité (ou végétatif : QNveg) inférieure à celle du pois d'hiver hr (Tableau III.6), ce qui est cohérent avec Munier-Jolain et Carrouée (2003). Les valeurs minimales de QNveg simulées sont dans la gamme des valeurs observées par de nombreux auteurs (Jensen, 1989 ; Doré, 1992 ; partie 1). Les valeurs maximales sont hors de cette gamme mais correspondent à des dates de floraison tardives (DF3, le 30 mai) pour les variétés virtuelles.

QNveg varie en fonction des caractères de la variété virtuelle et certaines ont des valeurs proches des types commercialisés. Ce sont principalement les variétés à DF précoce (DF1, le 20 avril). A l'inverse, les variétés virtuelles à DF les plus tardives présentent les valeurs les plus élevées de QNveg. La date de semis a ensuite un effet sur QNveg : plus cette dernière est précoce, plus QNveg est élevée. Au final, le poids des graines n'a qu'une très faible influence sur ce classement.

Tableau III.6. Classement (de la plus élevée à la plus faible), pour les différents milieux, des différents types de pois (identifiés selon leur numéro dans le tableau ci-dessous) en fonction de la quantité d'azote végétatif à maturité et gamme de variation (valeurs minimale et maximale simulées, kgN ha⁻¹).

	Tous milieux	Sol superficiel		Sol profond				
		Irrigué	Non Irrigué	Irrigué		Non Irrigué		
		Chartres		Toulouse	Chartres	Toulouse	Chartres	Mons
Identifiant milieu		1	2	3	4	5	6	7
	5	5	5	5	5	5	5	5
	6	11	6	6	11	6	6	6
	11	6	11	11	6	11	11	11
	12	12	12	12	12	12	12	12
	3	3	3	3	3	3	3	3
	4	4	4	4	4	4	4	Ph hr
	9	9	9	9	9	9	9	4
	10	10	10	10	10	10	10	9
	1	Ph hr	Ph hr	1	Ph hr	1	Ph hr	10
	Ph hr	Pp	1	2	Pp	2	1	Pp
	2	1	Pp	7	1	7	Pp	1
	7	2	2	Ph hr	2	8	2	2
	Pp	8	8	8	8	Ph hr8	8	7
	8	7	7	pp	7	pp	7	8
Min-max		53-167	54-178	72-277	58-170	73-293	57-171	50-153

Description des identifiants du Tableau III.6

Date de semis	Date de début floraison	Poids d'une graine	identifiant
01/10	20/04	0.125	1
		0.280	2
	10/05	0.125	3
		0.280	4
	30/05	0.125	5
		0.280	6
01/11	20/04	0.125	7
		0.280	8
	10/05	0.125	9
		0.280	10
	30/05	0.125	11
		0.280	12
Date de semis la plus précoce et DF associée, les deux étant fonction de la région		0.280	Pp
		0.25	Ph hr

4.2. Discussion

4.2.1. Critères de sélection pour les *ph Hr* et influence du milieu

a) Date de début floraison

Sans prise en compte des effets du gel, l'effet majeur d'un début floraison précoce a été une plus grande stabilité du rendement, quel que soit le milieu, ce qui est cohérent avec les résultats expérimentaux de Dumoulin et al. (1994) et confirme l'intérêt de ces nouvelles variétés dans des sols superficiels avec ou sans irrigation. Ceci suppose de sélectionner soit des variétés avec un numéro de 1^{er} étage florifère plus faible, soit avec une vitesse d'émission des feuilles plus élevées (Bourion et al., 2002b). La variabilité du rendement de ces nouvelles variétés était plus faible par rapport au pois de printemps mais comparable à ce qui est déjà possible avec le pois d'hiver *hr*. Peu de différences ont en effet été mises en évidence entre un début floraison le 20 avril et le 10 mai (date moyenne pour les pois d'hiver *hr*) sur l'ensemble des milieux. Une floraison début mai permet donc déjà d'être dans une période avec un ratio entre rayonnement et température (dont dépend le nombre de graines formées) satisfaisant. Une analyse par milieu révèle cependant un avantage pour un début floraison en avril dans le sud-ouest, en lien avec les risques de stress de fin de cycle plus importants et plus précoces dans cette région par rapport aux deux autres étudiées. A l'inverse, à Chartres, un début floraison le 10 mai favorise le rendement par rapport à un début floraison le 20 avril. Dans cette situation, un trop faible rayonnement intercepté (du fait soit d'un rayonnement incident trop faible, soit d'un indice foliaire trop peu développé à ce stade) pendant l'élaboration du nombre de graines par m² (NGM²) a pu limiter le rendement, comme le suggère Egli (1993).

La prise en compte du risque de gel modifie les résultats précédents. Les variétés virtuelles ont présenté alors une stabilité de rendement nettement supérieure à celle du pois de printemps et du pois d'hiver *hr*, quels que soient le milieu et la durée IF-DF. Les nouvelles variétés permettent donc *a priori* d'éviter totalement les risques de gel après initiation florale. En absence de stress hydriques, pour les trois durées IF-DF testées, le niveau de rendement des nouvelles variétés est supérieur à celui du pois de printemps et du pois d'hiver. A l'inverse, pour les milieux avec risque de stress hydriques de fin de cycle (sol superficiel non irrigué Chartres, sol profond : irrigué et non irrigué Toulouse, non irrigué Chartres et Mons), un DF le 30 mai ne permet pas d'atteindre les niveaux de rendement du pois de printemps.

b) Date de semis

Sans prise en compte du risque de gel, pour ces nouvelles variétés très réactives à la photopériode, la date de semis n'a eu qu'une faible influence sur le niveau et la stabilité du rendement. Pour la plupart des espèces sur lesquelles cet effet a été observé, la date de semis a une influence sur la date de début floraison (Summerfield et Roberts, 1988 pour le pois ; Egli, 1993 pour le soja ; Acosta-Gallegos et al., 1996 pour le haricot) : plus le semis est précoce, plus la floraison commence tôt. Pour les variétés de pois d'hiver de type *Hr*, la date de semis a seulement un effet sur la durée de la phase végétative, puisque la date de DF est très constante en jour, et donc sur les quantités de biomasse et d'azote totales accumulées par la culture pendant cette phase. Ce faible effet de la date de semis sur le niveau de rendement confirme une hypothèse avancée par les sélectionneurs et caractérise donc ces nouvelles variétés par une plus grande souplesse en terme de dates de semis optimales. La prise en compte du risque de gel module ces résultats, surtout dans les régions les plus à risque comme Chartres et Mons.

Les nouvelles variétés ne deviennent alors plus avantageuses que le pois d'hiver et le pois de printemps, en terme de stabilité et de niveau de rendement, qu'en semis précoce dans tous les milieux. En revanche, pour un semis tardif, les nouvelles variétés ne présentent pas d'avantage concernant les risques de gel entre semis et levée par rapport au pois d'hiver hr, ce qui constitue un réel problème pour leur développement dans certaines régions (Etévé et Derieux, 1982 ; Carrouée, 1996). Il est donc important que les sélectionneurs soient attentifs à ce risque afin de conserver l'avantage quant à la souplesse en terme de date de semis par rapport aux types de pois commercialisés.

Les risques de gel ont pu toutefois avoir été surestimés. En effet, nous avons considéré qu'il suffisait d'un jour de gel pour que la parcelle soit retournée et le rendement nul. Dans la réalité, la survie d'une plante au gel est fonction de la proportion de tige affectée à la base et de l'état du système racinaire (Lejeune-Hénaut et al., 2004). De plus, les bourgeons axillaires inférieurs peuvent prendre le relais du méristème terminal lorsque ce dernier a été détruit. Ceci est d'autant plus vrai pour les nouvelles variétés de pois d'hiver Hr que l'augmentation de la durée de résistance au froid serait corrélée (d'un point de vue génétique) avec le potentiel de ramification (Lejeune-Hénaut, 1996). Enfin, en l'absence de modèle disponible et validé pour ce genre de phénomène, nous avons utilisé trois températures seuils fonction du stade de la culture, pour déterminer le risque de gel. Dans la réalité, à l'automne, les basses températures positives (phase dite d'acclimatation) induisent peu à peu une plus grande résistance de la culture au gel et aux différents stress hivernaux (phase dite d'endurcissement) (Lejeune-Hénaut et al., 2004). L'acquisition de la résistance au gel du pois d'hiver, notamment entre semis et levée, est donc plus complexe que ce qui a été pris en compte dans le modèle. Ces résultats confirment la nécessité de poursuivre les efforts de recherche quant à l'analyse des effets du gel sur le fonctionnement de la culture et à la modélisation.

c) Architecture de la plante

L'architecture de la plante est modifiée, en lien avec le poids moyen d'une graine (PIG), cette composante étant très corrélée au nombre d'étages reproducteurs (partie 1).

Les variétés à petites graines ont eu des rendements plus stables et légèrement plus élevés que les variétés à grosses graines sur l'ensemble des milieux. Cependant, actuellement, la question de la relation entre PIG et la stabilité du rendement en fonction des conditions de sol et de climat reste très débattue (Carrouée, 1996 ; S. Terrier, com. pers.). Le plus grand nombre d'étages des variétés à faible PIG induit une durée plus longue de la phase d'élaboration du rendement (entre DF et FSLA). A même date de floraison, les risques d'occurrence d'un stress hydrique et/ou thermique sont donc plus importants pour ces dernières. Toutefois, Jeuffroy (1991) et Moot et McNeil (1995) ont mis en évidence des phénomènes de compensation entre nombre de gousses par plante et nombre de graines par gousse, ces deux dernières étant très sensibles aux conditions environnementales, susceptibles d'être mises en jeu plus facilement pour des variétés à nombre d'étages reproducteurs élevés. En revanche, le plus grand nombre d'étages reproducteurs tend à favoriser les risques de maladie, en lien avec le développement d'un microclimat dans le peuplement plus favorable (Béasse, 1998), ainsi que les risques de verse, rendant parfois délicate la récolte (S. Terrier, com. pers.), phénomènes non pris en compte par le modèle.

Le résultat observé avec AFISOL peut être lié au formalisme du modèle pour simuler le nombre de graines formées. Le NGM^2 est fonction de la vitesse de croissance entre DF et FSLA et le paramètre $Ngunit$ qui a été déterminé de façon à ce que les deux types de pois (à petites et grosses graines) aient le même potentiel de rendement. Or, la durée de la phase DF-FSLA est plus longue pour les pois d'hiver et/ou les petits poids de graines que pour les pois de printemps et/ou les gros poids de

graines. Le rayonnement incident augmentant de jour en jour, la vitesse de croissance est en moyenne plus importante pour des durées de phase plus longue, à même date de floraison, excepté en cas de stress hydriques et/ou thermiques importants. L'avantage des variétés à petites graines reste faible : différence moyenne de rendement de 4 q ha⁻¹. Des expérimentations complémentaires seraient donc nécessaires pour confirmer ce résultat.

d) Risques de pertes d'azote après pois

Soon et Arshad (2004) ont mis en évidence que le type et la qualité des résidus de récolte influençaient leur contribution à l'alimentation azotée de la culture suivante. De plus, Jensen (1994) a montré que la minéralisation de l'azote des pailles était très rapide les trois premiers mois : l'azote minéralisé issu des pailles de pois (QNveg) est donc à la fois une source non négligeable d'azote pour la culture suivante (Munier-Jolain et Carrouée, 2003) et une source potentielle de pollution des eaux en hiver (Evans et al., 2001). La quantité d'azote laissée par les résidus de récolte est donc importante à prendre en compte dès la sélection.

Contrairement à l'hypothèse émise initialement, ce n'est pas la date de semis mais la date de floraison qui semble être le principal facteur de variation de QNveg, pour tous les milieux. Plus la date de début floraison a été tardive, plus les quantités d'azote des pailles ont été élevées. D'après nos résultats, l'accumulation d'azote dans la plante entière serait, au contraire, indépendante de la date de début floraison. Or, plus la date de début floraison est tardive, plus le modèle simule de faibles rendements (plus courte durée de la phase d'élaboration de chaque composante), et donc plus l'accumulation d'azote dans les graines est faible, contribuant ainsi à expliquer les quantités élevées d'azote retrouvées dans les pailles à la récolte. Une date de semis plus précoce (et donc un allongement de la durée du cycle) n'a eu qu'une faible influence sur le classement des différentes variétés virtuelles, tout comme le milieu et le poids moyen de graines.

Pour des variétés classiques, le modèle simule que QNveg est plus élevé pour les pois d'hiver que pour le pois de printemps, résultat généralement observé (partie 1). Un DF le 20 avril pour les variétés virtuelles permet d'obtenir des QNveg avec des valeurs de l'ordre de grandeur des variétés classiques.

Une floraison précoce semble être une voie de sélection intéressante pour accroître le niveau et la stabilité du rendement des variétés réactives à la photopériode, diminuer le risque de gel et l'azote laissée dans les pailles à la récolte. Une floraison le 10 mai permet déjà d'assurer une stabilité du rendement dans la plupart des milieux, même sans irrigation et en sol superficiel. Une attention toute particulière doit être portée à la résistance au froid des nouvelles variétés de pois d'hiver entre semis et levée, qui pourrait être un frein à leur développement compte tenu du risque potentiel de gel pour des semis tardifs dans des régions comme Chartres et Mons. Un très léger avantage en terme de niveau de rendement des variétés virtuelles à faible poids moyen de graines a été mis en évidence dans l'ensemble des milieux. Toutefois, ce résultat reste à confirmer. Il faudrait également revoir la manière de prendre en compte le risque de gel dans le modèle, notre formalisme étant très simplifié (notamment, non prise en compte des phénomènes d'endurcissement la plante)

4.2.2. Atouts et limites de la méthode utilisée

a) Test de variétés virtuelles et validité

La simulation de « scénarios génétiques » innovants, par des modèles de culture, permet de quantifier *a priori* les performances attendues, sur différents critères agronomiques et environnementaux, de différentes variétés virtuelles dans des régions climatiques contrastées et, pour diverses techniques culturales (dates de semis et irrigation). Cette méthode permet d'intégrer la notion de risque climatique, notion clé en agriculture (Papy et al., 1990), sans avoir à attendre des résultats expérimentaux obtenus sur de nombreuses années, pour pouvoir balayer une gamme de climats suffisamment représentative de ce qui peut être rencontré en conditions agricoles. L'interaction des techniques culturales (date de semis et irrigation, dans notre étude) avec les caractéristiques variétales n'est pas souvent prise en compte dans les programmes de sélection, pour des raisons de faisabilité pratique essentiellement, ce qui pourtant est indispensable pour prévoir le potentiel de la variété simulée en interaction avec les conditions environnementales qu'elle risque de rencontrer en culture (Hammer et al., 1996). La comparaison avec les variétés disponibles est importante afin de déterminer les avantages qu'apporteraient ces nouvelles variétés virtuelles et de proposer non pas une solution optimale mais une gamme de solutions possibles, à confronter avec les stratégies, les moyens et les ressources génétiques des sélectionneurs. Des discussions fréquentes avec les sélectionneurs permettent donc de déterminer, avec eux, les caractères sur lesquels il serait intéressant d'« agir », afin d'explorer une gamme de variétés « virtuelles » potentiellement possibles.

Comme le suggèrent Egli et Bruening (1992), ce genre d'étude prospective ne peut être réalisé qu'avec des modèles pour lesquels les facteurs testés sont correctement simulés et pris en compte par le modèle, ce que nous avons pris le soin de vérifier au préalable dans notre étude. L'exploration de variétés virtuelles nécessite l'utilisation du modèle dans des gammes variétales pour lesquelles le modèle n'a pas été validé ou seulement partiellement. Par exemple, dans notre analyse, les variétés innovantes de pois d'hiver Hr présentent de nombreuses nouvelles caractéristiques (port en rosette, plus grande potentielle de ramification, plus grande réactivité à la photopériode) non prises en compte dans les modèles. L'absence d'effet spécifique de ces caractéristiques sur les formalismes du modèle a donc été vérifiée grâce à l'expérimentation (partie 2), ce qui confirme la complémentarité entre ces deux outils (Boote et al., 1996).

Enfin, l'irrigation a été considérée comme systématique, pour les trois lieux et quelles que soient les caractéristiques de l'année de culture, ce qui n'est pas représentatif de la réalité (Bouthier et Deumier, 1999). Ce manque de souplesse quant au pilotage de l'irrigation serait donc à améliorer par la suite.

Enfin, certaines caractéristiques, telle la récoltabilité, très importante pour le développement d'une variété de pois, ne peuvent pas être testées directement avec ce genre de modèle, car ce critère est difficilement fiable aux variables d'état généralement simulées par les modèles de culture. Toutefois, certains caractères peuvent être utilisés comme indicateur. En effet, par exemple, si les sélectionneurs favorisaient des variétés à architecture indéterminée, les risques de verse pourraient être plus importants, pouvant potentiellement augmenter la difficulté de récolte et donc le temps de récolte et les risques de pertes de rendement.

b) Facteurs non pris en compte

Les principaux facteurs limitants pris en compte dans AFISOL sont les stress hydriques, thermiques et azotés. Les mauvaises herbes, maladies et ravageurs ne sont pas considérés dans le modèle. Cependant, une date de semis précoce et un cycle de culture plus long ne seront pas sans conséquences sur ces facteurs.

Un semis début octobre pourrait augmenter les risques d'infestation par les mauvaises herbes, en particulier les repousses de céréales. Toutefois, les nouvelles variétés ont un port en rosette qui pourrait leur permettre d'être plus compétitives. Des études complémentaires seraient donc nécessaires pour vérifier cette hypothèse.

Un semis précoce augmente les risques de bactériose et d'anthracnose avant l'arrivée de l'hiver (Tivoli et Samson, 1996). Il sera donc particulièrement important de raisonner la date de semis, seul moyen d'échappement efficace à l'automne, en fonction du risque de développement des bactérioses. Il serait sans doute nécessaire d'introduire, dans les variétés Hr, des gènes de résistance à l'anthracnose, déjà en partie connus (Prioul et al., 2004), pour limiter le nombre de traitements à réaliser pour maîtriser cette maladie à l'automne. Ney et Duc (1996) suggèrent l'existence d'une interaction entre architecture de la plante et résistance de la culture à l'anthracnose. Les nouvelles variétés ont un potentiel de ramification élevé, ce qui peut contribuer au maintien d'un micro-climat humide et doux à la base de la culture, favorable au développement de cette maladie (Roger et Tivoli, 1996 ; Roger et al., 1998). L'architecture de la plante pourrait donc avoir une influence sur ce risque maladie (Le May, 2002). Ceci pourrait amener à nuancer les conclusions obtenues par simulation sur l'avantage d'un type de pois par rapport à un autre. Afin de réduire le risque anthracnose, une réduction importante de la densité de semis (dans la mesure où le potentiel de rendement reste inchangé, ce qui semble être le cas d'après les essais Agrotransfert Picardie, F. Flénet, com. pers.) pourrait être envisagée.

Un semis plus précoce peut également être concomitant d'une période de conditions climatiques favorables aux attaques de sitones et thrips, évitées par un semis de novembre. Ce facteur ne doit pas être négligé, d'autant que des conséquences sur la nutrition azotée de la culture sont possibles (Doré et Meynard, 1995). L'avancement de la date de début floraison permettra certainement de limiter les attaques et les traitements contre les cécidomyies et les pucerons.

Enfin, compte tenu de l'influence de l'architecture et des caractéristiques de la culture sur les facteurs ci-dessus évoqués, il apparaît donc essentiel de les considérer dans l'évaluation de ces variétés « virtuelles ».

CHAPITRE 2 :

***Insertion des nouvelles variétés de
pois d'hiver dans l'organisation du
travail d'une exploitation agricole***

1. Introduction

Nous avons fait l'hypothèse que l'avancement de la période de semis permis, par les nouvelles variétés de pois d'hiver Hr, devrait améliorer la stabilité des rendements, le semis d'automne présentant moins de risques de tassement que celui de printemps et diminuant les menaces de stress hydriques de fin de cycle. Toutefois, de nombreuses études (Papy et Servettaz, 1986 ; Chauveau, 1995; Robertson et al., 2000) ont mis en évidence qu'il pouvait exister des contradictions entre d'une part la rationalité agronomique (avantages liés à cette nouvelle date de semis) et d'autre part la logique et la marge de manœuvre de l'agriculteur. En effet, l'existence de contraintes de temps très fortes, liées au caractère saisonnier de l'agriculture et aux aléas climatiques, fait de l'organisation du travail (main d'oeuvre et matériel) une préoccupation très ancienne (Sebillotte, 1986). Ainsi, l'automne étant une période chargée au sein de certaines exploitations agricoles (semis de céréales, récolte de maïs, pomme de terre, betterave), l'introduction de nouvelles variétés de pois d'hiver Hr pourrait accroître la tension du calendrier de travail et induire des changements profonds dans l'assolement, les systèmes de culture, et l'organisation du travail, les décisions prises au sein d'une exploitation étant fortement fonction des autres (Meynard et al., 2001). La modification de période de semis du pois peut également interférer sur les conditions d'intervention et la structure du sol, sous pois ou sous blé (dont la préservation est importante pour l'environnement, Kay, 1990). L'introduction d'une innovation variétale ne peut donc être évaluée sans considérer la manière dont elle va changer l'ensemble du fonctionnement des unités de production par lesquelles elle pourrait être adoptée (Meynard et al., 2001).

Comme le soulignent Robertson et al. (2000), l'évaluation « traditionnelle » des innovations en matière de système de culture passe par la mise en place d'expérimentation croisant les facteurs d'intérêt (par exemple état structural, date de semis et variété) en station de recherche puis, par la diffusion des résultats aux agriculteurs par l'intermédiaire de recommandations et/ou de tests au champ chez les exploitants eux-mêmes. Une telle démarche présente plusieurs inconvénients :

- elle est lente et coûteuse car il faut multiplier les essais au champ pour évaluer l'innovation dans une gamme suffisamment large de sols, de climats et de systèmes de production,
- elle ne prend pas en compte l'insertion des innovations dans les systèmes de production, et leurs conséquences agronomiques et environnementales,
- elle n'est possible que lorsque les variétés sont disponibles.

Dans le contexte actuel, les innovations variétales doivent être évaluées avant diffusion de manière de plus en plus rapide et complète. Il est donc impératif de faire appel à la modélisation, seule démarche permettant de tester rapidement un grand nombre de scénarios, de considérer différents aspects de production et d'environnement, et d'aborder simultanément plusieurs niveaux d'organisation (la parcelle, l'exploitation).

Le modèle APSIM (McCown et al., 1996) a été conçu dans cet objectif : il permet de simuler des successions de cultures et de déterminer les effets, à long terme et dans différents lieux, de systèmes de culture sur la production et l'environnement. De plus, ce logiciel prend en compte des contraintes de dates en terme de choix de cultures, de semis, d'application d'engrais, de labour ou d'irrigation et les éventuelles interactions entre cultures. Il ne permet pas toutefois de considérer les contraintes liées à la disponibilité en main d'œuvre et/ou en matériel. Parmar et al. (1994) ont mis au point un modèle afin d'aider les producteurs d'arachide à optimiser l'utilisation de leur matériel, la date de semis et la gestion de l'irrigation en terme de marge brute. Toutefois, les effets des dates et des conditions d'intervention sur la structure du sol ne sont pas pris en compte. De plus, les dates

d'opération sont raisonnées uniquement pour la culture d'arachide sans interaction avec les éventuelles autres productions.

Ne disposant pas de modèle permettant à lui seul l'évaluation des conséquences de l'adoption des nouvelles variétés de pois d'hiver Hr sur l'organisation du travail, les conditions d'intervention, la structure du sol et le fonctionnement de la culture, nous avons retenu, dans notre démarche, le principe d'un couplage de quatre modèles : OTELO (Papy et al., 1990 ; Chatelain et al., 1994 ; Aubry, 2000), qui simule l'organisation du travail ; un modèle humidité, qui simule l'humidité du sol au moment de chaque opération technique ; SISOL (Roger-Estrade et al., 2000), qui simule l'évolution de la structure du sol en fonction des conditions d'intervention, et AFISOL, décrit dans la partie 2.

Dans ce chapitre, nous présenterons la méthodologie que nous avons conçue pour proposer des réponses aux questions suivantes, qui découlent des éléments de contexte présentés ci-dessus :

- Quels types variétaux sont intéressants à cultiver dans une exploitation agricole, prenant en compte des contraintes d'organisation du travail à l'automne ?
- Quel intérêt de choisir un type variétal précis, étant donné les contraintes d'organisation du travail, les aléas climatiques, les conditions de semis ?
- Quel est l'effet de la période de semis du pois sur l'environnement et la production à l'échelle du système de culture ?

2. Matériel et méthodes

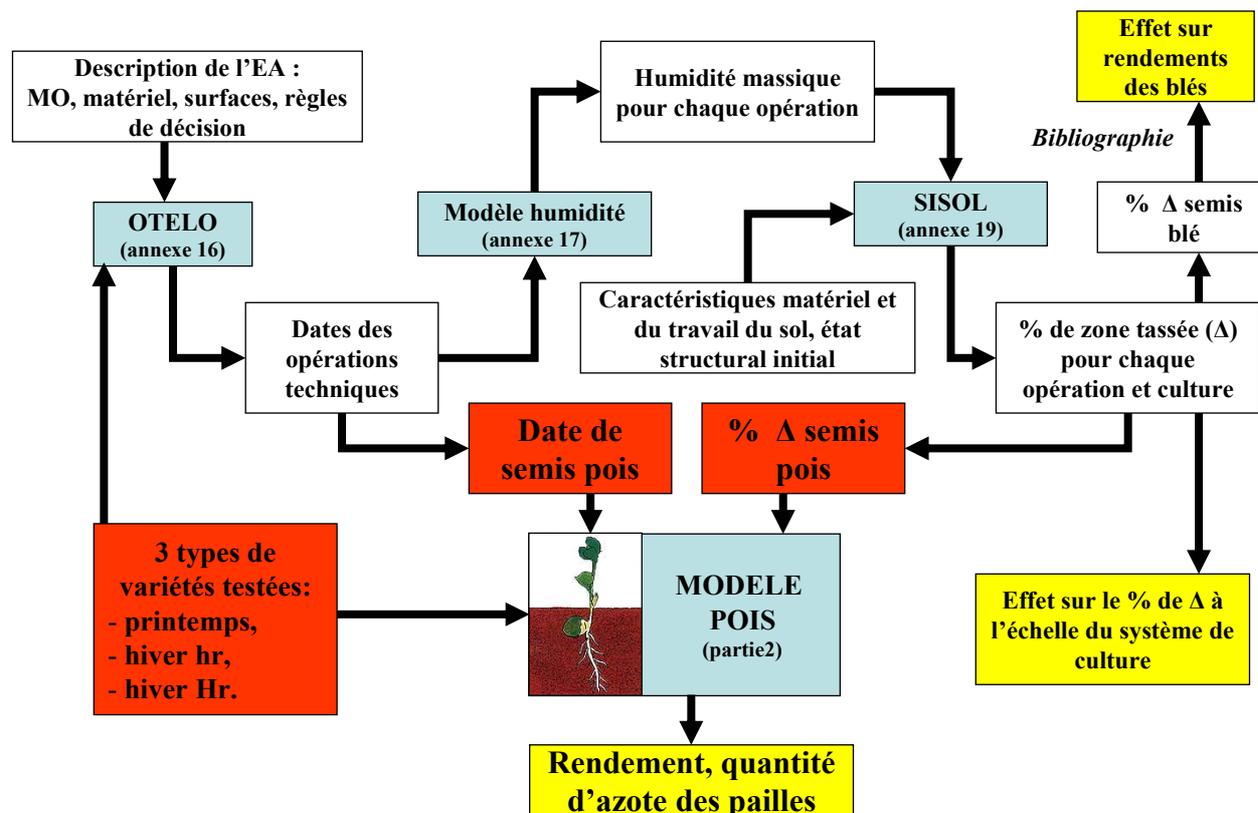
2.1. Modèles utilisés pour le couplage

Coupler plusieurs modèles consiste à utiliser les variables de sortie de l'un comme variable d'entrée du suivant. La Figure III.14 présente les modèles que nous avons couplés et les variables intermédiaires utilisées.

2.1.1. OTELO

Dans une exploitation agricole, les systèmes de culture peuvent être explicités sous forme de règles de décision portant sur les surfaces affectées aux différentes cultures, les successions, les dates et les conditions d'intervention, la nature, la qualité et la quantité des intrants, les réglages des outils,...(Papy et al., 1990). Certaines périodes de l'année sont chargées au sein des exploitations agricoles (semis d'automne, récolte) : l'agriculteur doit alors résoudre des problèmes d'allocation de main d'œuvre et de matériel (deux ressources limitées). Ses décisions sont fonction de règles de priorités, elles-mêmes dépendantes de ses objectifs de production. Sebillotte et Servettaz (1989) ont mis en évidence l'existence d'un modèle d'action de l'agriculteur au sens d'un programme finalisé par des objectifs et comportant des règles sur la constitution des chantiers et leur mise en action, ainsi que des règles adaptatives à certains événements (comme des retards ou de mauvaises conditions climatiques).

Figure III.14. Couplage de modèles
Rotation étudiée : colza/blé/pois/blé/orge (100 ha/ culture)
Opérations considérées : déchaumage-labour-semis-récolte



OTELO (version 3.0) est un logiciel qui intègre l'ensemble de ces notions et simule au quotidien le déroulement des travaux d'une exploitation agricole pendant une ou plusieurs saisons en fonction des contraintes pédo-climatiques (i.e. l'accessibilité des parcelles, qui dépend de l'état d'humidité du sol), de la disponibilité en matériel et en main d'œuvre et des règles de décision de l'agriculteur (annexe 16). Certains jours peuvent être disponibles pour plusieurs activités mais, la main d'œuvre et le matériel étant limités, le modèle applique des règles d'arbitrage entre ces différentes activités (Papy et al., 1990). Ce logiciel est issu d'une collaboration entre l'INRA et Agrotransfert-Picardie.

Les données d'entrée de logiciel sont :

- la description du système de production (matériel, main d'œuvre, horaires, cultures),
- la liste des chantiers (semis, labour, herbicide, ..., encadré 1) et les facteurs favorables ou non à la réalisation de chacun d'eux (appelé indicateur). Un chantier (qui peut être commun à plusieurs cultures) est un ensemble indissociable de matériels et main d'œuvre, caractérisé par des performances fonction des conditions de mise en œuvre (Papy et Mousset, 1992), elles-mêmes définies par les indicateurs. Les indicateurs permettent de prendre en compte le fait que l'agriculteur peut penser qu'il est raisonnable de prendre des risques de travailler en mauvaise condition à partir d'une certaine date si les risques de ne pas finir le chantier sont supérieurs à ceux des risques occasionnés par la réalisation du chantier dans de mauvaises conditions (Papy et Servettaz, 1986),

- l'enchaînement, qui gère les modalités de succession des chantiers (Papy et Mousset, 1992), encadré 1),
- la description de la période étudiée qui définit la chronologie et la priorité des enchaînements entre cultures (encadré 1).

Encadré 1 :
Exemple de chantier, indicateur, enchaînement et période pour OTELO

Chantier : labour (unité ha/h)

Si (labour_impossible) vitesse = 0
Sinon vitesse = 2

Signifie :

Si les conditions de l'indicateur sont réalisées alors le labour n'est pas possible, sinon la vitesse est de 2 ha/h.

Indicateur : labour_impossible

Pluie(j)>6
Ou
Res>=40 et (Pluie(j)>5 ou pluie (j,j-1)>13)

Signifie :

Le labour n'est pas possible si la quantité de précipitation le jour j est supérieure à 6 mm

Ou

Si la réserve utile est supérieure à 40 mm et soit la quantité de précipitation le jour j est supérieure à 5 mm, soit la somme des précipitations du j-1 et j est supérieure à 13 mm.

Enchaînement : blé après pois

semis
herbicide

Signifie :

Pour un semis de blé après une culture de pois, les chantiers de semis et herbicide sont réalisés successivement.

Période : semis d'automne

si (J>28_09) e_orge
si (01_10<J<31_10 et fin(e_orge)) e_col_ble,
....

Signifie :

A partir du 28/09, si les conditions le permettent, l'enchaînement relatif à l'orge est réalisé. Uniquement si l'enchaînement précédent est fini et la date est comprise entre le 01/10 et le 31/10 alors l'enchaînement relatif aux blés après colza est mis en œuvre.

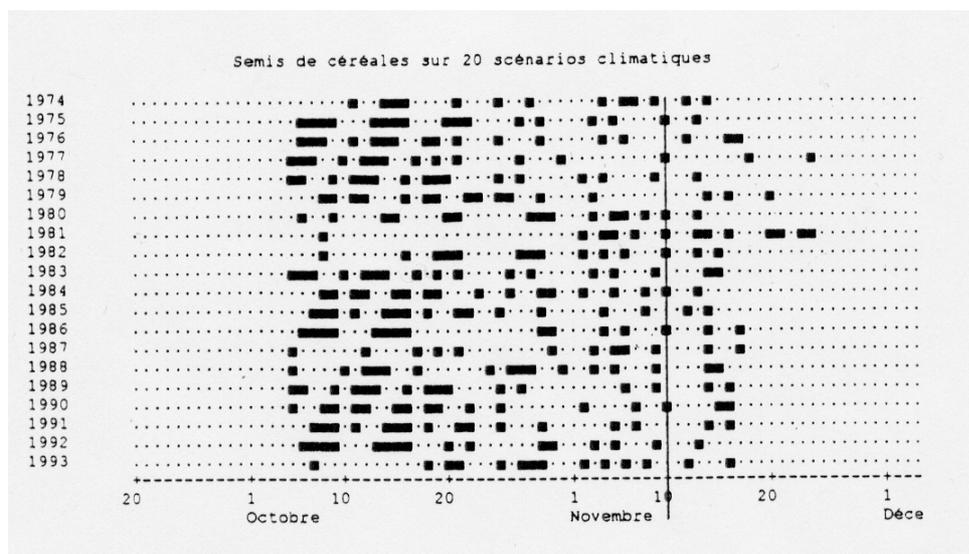
En sortie, OTELO simule principalement, pour une année climatique donnée :

- pour chaque chantier : sa progression quotidienne en terme de surface, durée, vitesse potentielle,
- les travaux non faits en fin de période de simulation,
- le calendrier de travail et l'emploi du temps.

Outre la faisabilité des interventions, OTELO permet de simuler les dates (plus précisément plages de temps) pour la réalisation des différentes opérations culturales pour chaque culture de l'exploitation (Figure III.15). La répétition des simulations pour une série climatique permet de calculer des fréquences de non réalisation de certains travaux, ou d'intervention après une date donnée.

Afin d'évaluer, à l'aide de SISOL, les conséquences en terme de risques de dégradation de la structure du sol des calendriers simulés par OTELO, il nous fallait disposer d'un modèle supplémentaire, nous permettant de prédire l'humidité du sol au moment des interventions. Ce modèle devant être suffisamment robuste tout en étant paramétrable dans les situations que nous avons enquêtées, nous l'avons mis au point à partir d'un bilan hydrique simplifié.

Figure III.15. Exemple de sortie d'OTELLO : pour chaque scénario climatique simulé, chaque carré noir indique un jour où le chantier de semis de céréales est mis en œuvre (Mousset, 1996).



2.1.2. Le modèle de bilan hydrique

Le modèle est présenté en détail à l'annexe 17. Nous ne présentons ici que les principes de sa construction. Un bilan hydrique simule la quantité d'eau disponible pour la culture (réserve utile : $RU(j)$, mm) dans la couche labourée par :

$$RU(j) = \min(RU(j-1) + P(j) - ETR(j) ; RU_{\max})$$

$P(j)$ est la quantité de pluie le jour j (données météo), $ETR(j)$ est l'évapotranspiration réelle le jour j et RU_{\max} , la quantité d'eau à la capacité au champ dans la couche labourée.

L' $ETR(j)$ varie en fonction de la présence ou non de culture et de la période considérée de la façon suivante :

- Au mois d'août, la période est considérée comme « pré-humide », donc d'après Franquin (1968) :

$$ETR(j) = 0.5 \times ETP(j)$$

$ETP(j)$ est l'évapotranspiration potentielle le jour j , donnée climatique,

- Du 1^{er} septembre au semis, la période est dite « humide » (Franquin, 1968) :

$$ETR(j) = ETP(j)$$

- Du semis à maturité, par souci de simplification, l'hypothèse est faite que l'évapotranspiration réelle et l'évapotranspiration maximale ($ETM(j)$) sont égales, ce qui sous-entend que la disponibilité en eau est satisfaisante dans le sol tout au long du cycle de la culture (certainement valable en automne, hiver et printemps). Cette hypothèse a un effet essentiellement sur l'humidité du sol à la fin du cycle et donc à la récolte. Le risque est donc celui d'une sous-estimation de l'humidité du sol au moment de la récolte :

$$ETR(j) = ETM(j) = k_c \times ETP(j)$$

k_c est le coefficient cultural fonction de la culture et de son stade (annexe 18). Les dates des stades utilisés sont fixes d'une année sur l'autre et ont été déterminées à dire d'expert.

- De la maturité à la récolte, la période est dite « post-humide » (Franquin, 1968). L' ETR est donc inférieure à l' ETP . La culture est présente (donc limitation de l'évaporation) mais absorbe de moins en moins d'eau (réduction de la transpiration). L'hypothèse est faite que l' ETR est au maximum égale à 1.6 mm (valeur plus faible que celle d'un sol nu qui est en moyenne en France de 2.2 mm au mois de juillet⁸) et sinon égale à l' ETP .

$$ETR(j) = \min(1.6 ; ETP(j))$$

La valeur de 1.6 mm résulte d'une approximation de la valeur moyenne de l' ETR d'un sol nu en France au mois de juillet¹.

Quelle que soit la période, si la température moyenne journalière est inférieure à 0°C, l'hypothèse est faite que l' $ETR(j)$ est nulle.

RU_{\max} est la quantité d'eau de la couche labourée à la capacité au champ de la couche labourée. Elle est calculée par différence d'humidité volumique (H_v) entre la capacité au champ (H_{vcc}) et le point de flétrissement permanent (H_{vfp}), le tout rapporté sur la profondeur de sol considéré (couche labourée, soit 0.3 m dans le cas présent). Le calcul est initialisé le 01/08 en faisant l'hypothèse que la réserve utile est alors vide. La $RU(j)$ est ensuite transformée en humidité massique : $W(j)$.

⁸ source : www.u-picardie.fr/~beaucham/cours-du/du-6.htm

2.1.3. SISOL

L'état structural du sol est très variable en fonction des conditions d'humidité au moment des interventions techniques et est susceptible d'évoluer différemment en fonction des cultures présentes dans une rotation (Kay, 1990). Le rendement du pois est très sensible à ce facteur (King, 1979 ; Crozat et al., 1991b ; partie 1). L'utilisation de SISOL permet donc d'intégrer à l'évaluation *ex ante* de l'effet des nouvelles variétés de pois sur la production et l'environnement à l'échelle du système de culture, l'impact de l'introduction de l'innovation sur la qualité physique des sols cultivés.

SISOL (annexe 19) est un modèle qui simule l'évolution à moyen terme (quelques années) de l'état structural de la couche labourée, en fonction de l'humidité au moment des passages d'engins et des caractéristiques des équipements employés (largeur de travail, charge sur essieu, largeur d'appui au sol) qui déterminent l'intensité du tassement. S'agissant des opérations de travail du sol, le modèle simule leur effet sur la structure (fragmentation) en fonction de la profondeur de travail des outils. Concernant le labour, SISOL modélise le découpage puis le retournement des bandes de terre découpées par la charrue, qui remonte des volumes de sol soumis ainsi à l'action ultérieure des outils de travail superficiel et du climat. En revanche, SISOL ne tient pas compte des actions biologiques sur la structure (effet des racines, des vers de terre par exemple). La variable simulée est un indicateur de l'effet des systèmes de culture : la teneur en Δ (éléments structuraux très tassés, dont la porosité structurale est nulle) de la couche travaillée (Roger-Estrade et al., 2000). Testé sur un essai de longue durée, sur un sol de limon caractéristique du Bassin Parisien, et très proche de celui dans lequel nous avons mené notre enquête (comme nous le verrons ci-après), il a montré qu'il permettait de décrire de manière satisfaisante, dans des situations régulièrement labourées, l'évolution de l'indicateur retenu.

2.1.4. AFISOL

Ce modèle a été décrit en détail dans la partie 2 et simule les effets de l'état structural, la période de semis et la variété sur les fonctionnements aérien et racinaire d'une culture de pois.

Pour chaque type de pois, la date de semis utilisée a été celle simulée par OTELO. La teneur en Δ était, quant à elle, issue des résultats de simulation de SISOL.

La date de début floraison est fonction de la température et de la photopériode pour les variétés de pois commercialisées (Summerfield et Roberts, 1988) et dépend de la date de semis. Compte tenu de la grande variabilité de la date de semis pour les variétés de pois de printemps et d'hiver hr en conditions agricoles, il était nécessaire qu'AFISOL puisse prédire la date de début floraison (DF) (donnée initialement d'entrée, partie 2) pour chaque type de variétés. Pour le pois de printemps, Roche et al. (1999) ont paramétré un modèle de prédiction de DF fonction de la photopériode et de la température moyenne depuis le semis pour la variété Solara. Le nombre de jour entre semis et DF (D) est calculé :

$$1/D = 20.174 + P_m \times 1.5626 \times 10^{-3} + T_m \times 1.3347 \times 10^{-3} \quad (r^2=0.98)$$

P_m est la photopériode moyenne journalière depuis semis et T_m est la température moyenne journalière depuis semis. Un paramètre de précocité variétal à DF par rapport à Solara a été introduit (Tableau III.10).

Pour le pois d'hiver, aucun modèle de prédiction de DF avec une précision satisfaisante n'existe (Maltas, 2002). Il a donc été décidé d'utiliser un tableau de contingence reliant date de semis et DF (annexe 20), établi à partir des données de la partie 3.1.

2.2. Présentation générale de la démarche

Pour pouvoir réaliser nos simulations, nous nous sommes basés sur un cas réel, celui d'une exploitation située en Beauce, pour laquelle nous disposons d'un recueil de données très complet et très fiable, l'agriculteur enregistrant quotidiennement tous les travaux depuis son installation en 1989. Cette exploitation céréalière, située en Eure-et-Loir, premier département producteur de pois avec 28 200 ha dont 34% en irrigué et 5% en pois d'hiver en 2004 (UNIP, 2005), est le type même d'entreprise susceptible d'adopter les nouvelles variétés de pois d'hiver. En particulier, chez cet agriculteur, la période d'automne est une pointe de travail très forte car environ 40% de la SAU (Surface Agricole Utile) est semée en céréales, ce qui pourrait être un facteur limitant à l'introduction du pois d'hiver Hr dans l'assolement. L'exploitation est, par ailleurs, située sur un sol de limon sain, très proche de celui pour lequel SISOL et AFISOL ont été calibrés. Nous ne chercherons à tirer de ce cas d'étude que des conclusions d'ordre méthodologique, tant il est vrai qu'une exploitation particulière, située dans une région précise ne peut représenter la diversité des situations potentielles de culture du pois d'hiver.

Notre démarche peut être décomposée en cinq étapes :

- (1) une enquête, à partir de deux interviews de type semi directif sur la base de la référence proposée par Mousset (1996) dont les objectifs étaient de décrire le système de production (matériel, main d'œuvre, horaires, surfaces des cultures : annexe 21), afin de comprendre son mode de fonctionnement et de déterminer les règles de décision et de priorités de l'agriculteur,
- (2) le paramétrage d'OTELO avec les caractéristiques de l'exploitation agricole, ce qui nous a amené à faire un certain nombre de simplifications que nous présenterons ci-après,
- (3) la traduction des règles de décision en variables climatiques, afin d'identifier chaque chantier et ses indicateurs, de définir les enchaînements et d'établir la chronologie et les priorités d'opérations pendant la période d'automne (du 25/09 au 31/12) et de printemps (du 20/02 au 20/04),
- (4) l'évaluation d'OTELO sur les semis d'automne entre 1999 et 2003, en confrontant les sorties du modèle aux pratiques de l'agriculteur, enregistrées par lui, au jour le jour sur son carnet de plaine. Les variables utilisées pour cette évaluation ont été les dates de début et de fin de chantier de semis et celles des traitements herbicide pour l'orge d'hiver, le blé tendre et le blé dur (tout type de précédent confondu), et les labours d'hiver,
- (5) la réalisation de simulations sur une période de 28 ans, pour différentes hypothèses de changement d'assolement.

Une description des différents chantiers et enchaînements est présentée en annexe 22. La période de récolte n'a pas été enquêtée car nous avons fait l'hypothèse que les pois d'hiver Hr seront récoltés à la même période que les pois d'hiver hr (fin juin), ce qui est un avantage par rapport au pois de printemps (récolté au moment des céréales). La date de récolte des nouvelles variétés de pois d'hiver ne devrait donc pas constituer un obstacle à leur développement (Carrouée, 1996).

Nous avons, pour paramétrer OTELO, fait un certain nombre d'hypothèses, dont nous nous sommes assuré auprès de l'agriculteur qu'elles étaient raisonnables :

- la nature des terrains a été considérée comme homogène (texture et profondeur de sol, pente, exposition, hydromorphie), en accord avec les propos de l'agriculteur. Les caractéristiques des parcelles n'ont pas été prises en compte (taille, forme, accessibilité, distance des bâtiments) (Papy et al., 1990), ces dernières n'étant pas perçues comme des contraintes pour l'agriculteur,
- pour l'orge et le pois d'hiver, les labours et les semis étant réalisés en même temps, ces opérations ont été considérés comme n'en faisant qu'une. Comme le suggèrent Papy (1986), pour ce genre de succession d'opérations, c'est la plus lente et la plus contraignante (le labour) qui a déterminé les conditions d'intervention et le débit de chantier pour l'ensemble.

2.3. Réalisation des simulations

2.3.1. Paramétrage et scénarios de simulation avec OTELO

Tout en gardant les caractéristiques générales de l'exploitation enquêtée, nous avons, pour nos simulations, effectué deux modifications par rapport à la réalité de l'exploitation enquêtée :

(1) nous nous sommes situés dans l'hypothèse d'un regain d'intérêt pour les protéagineux, lié à un accroissement de la compétitivité de la culture ou à un soutien des pouvoirs publics à la diversification des cultures. L'accroissement de la surface en pois de l'exploitation (100 ha au lieu des 60 ha en réalité) aggrave *a priori* les risques de tension sur le calendrier de travail en cas d'adoption du pois d'hiver Hr. Dans le cadre de simulations, la rotation pratiquée sur toute l'exploitation est la suivante :

Colza/Blé/Pois/Blé/Orge (Tableau III.8)

Chaque culture est présente à hauteur de 100 ha. Pour le blé, 170 ha sont semés en blé tendre et 30 ha en blé dur (cohérence avec les données initiales). Pour les mêmes raisons, pour l'orge, 55 ha sont semés en orge d'hiver et 45 ha en orge de printemps. Les parcelles semées en pois de printemps ont toujours été labourées à l'automne et le pois d'hiver hr est toujours labouré avant d'être semé. Par la suite, l'extrapolation est faite sur une rotation de type Colza / Blé tendre / Pois (printemps, hiver hr ou hiver Hr) / Blé tendre / Orge d'hiver. Chaque année, toutes les cultures sont présentes sur l'exploitation agricole. Sur la période considérée, les opérations simulées sont le labour, le semis et les herbicides post-semis pour les céréales. Aucune distinction n'a été faite entre un blé après pois ou après colza,

(2) l'objectif étant de « tendre » le système (en renforçant la compétition pour la main d'œuvre et le matériel entre les différentes cultures de l'exploitation) et compte tenu de la tendance générale de diminution de la population active agricole, il a été décidé de diminuer d'une personne le personnel de l'exploitation⁹. Le matériel et les horaires de travail journalier n'ont pas été modifiés.

Tableau III.8. Surfaces de chaque culture en fonction du type de pois de la rotation. Les cultures en italique sont celles étudiées par la suite.

Type de pois	Printemps	Hiver hr ou Hr
<i>Colza</i>	<i>100 ha</i>	
<i>Blé tendre</i>	<i>170 ha</i>	
Blé dur	30 ha	
<i>Pois</i>	<i>100 ha</i>	
<i>Orge d'hiver</i>	<i>55 ha</i>	
Orge de printemps	45 ha	
<i>Total labour d'hiver</i>	<i>145 ha</i>	<i>45 ha</i>

⁹ Depuis la réalisation de l'enquête, cette diminution de la main d'œuvre de l'exploitation est devenue réalité....

Trois scénarios (Tableau III.9), correspondant chacun au semis, sur l'ensemble de la sole de pois, de l'un des trois types variétaux suivants, ont été analysés :

- (1) pois de printemps (pp) : variété Athos : variété de printemps témoin en sélection et la plus semée dans l'exploitation agricole étudiée et en France (20.7% des surfaces semées en pois de printemps en 2004, UNIP 2005),
- (2) pois d'hiver (ph hr) : variété Cheyenne, variété d'hiver la plus cultivée en France (43.7% des surfaces semées en pois d'hiver en France en 2004, UNIP 2005) et ayant servi à la mise au point du modèle,
- (3) pois d'hiver nouveau (ph Hr) : variété virtuelle caractérisée par un début floraison (DF) le 20 avril et un poids moyen d'une graine de 0.125 g gr⁻¹ : à Chartres en sol profond et non irrigué, cette variété virtuelle est celle qui a donné les meilleurs résultats par rapport aux critères d'évaluation définis dans la partie 3.1.

La description des périodes, respectivement pour chacun des trois scénarios, entrées dans OTELO est détaillée en annexe 23.

Tableau III.9. Description des simulations réalisées avec AFISOL.

	Poids d'une graine à 14% (gr gr⁻¹)	Conditions de culture	Date de semis	Date de début floraison	Etat structural
Athos (pois de printemps)	0.325	« en ferme » (EA1)	OTELO	Modèle Roche et al. (1999) Précocité à DF par rapport à Solara de -4 jours (V. Biarnès, com. pers.)	SISOL
		Potential expérimentateur	20/02	22/05	10% de mottes Δ
Cheyenne (pois d'hiver hr)	0.235	« en ferme » (EA2)	OTELO	Tableau de contingence (annexe20)	SISOL
		Potential expérimentateur	01/11	02/05	10% de mottes Δ
Pois d'hiver Hr	145	« en ferme » (EA3)	OTELO	20/04	SISOL
		Potential expérimentateur	10/10	20/04	10% de mottes Δ

Les simulations ont été faites sur les périodes du 25/09 au 31/12, correspondant aux semis de céréales et de pois d'hiver et au labour d'hiver, et du 01/02 au 15/04, correspondant aux semis de pois de présent (si présent dans l'assolement). Les données climatiques utilisées sont celles de la station météorologique de Chartres, sur une série de 28 années consécutives (septembre 1976 à juillet 2004). Pour chaque année, les sorties de la simulation d'OTELO concernant les périodes de réalisation des différents chantiers (dates pour lesquelles 50% des surfaces d'une culture donnée a subi chaque opération). Les chantiers étudiés ont été les labour-semis (i) d'orge, (ii) de blé tendre et (iii) de pois, (iv) l'herbicide sur orge et blé tendre et (v) le labour d'hiver (Tableau III.10).

Tableau III.10. Origine des données d'entrée de SISOL.

Rotation	Opération	Source
Colza	Déchaumage Labour-semis Récolte	Date supposée fixe Date supposée fixe Date supposée fixe
Blé	Déchaumage Semis Récolte	Date supposée fixe Simulée par OTELO Date supposée fixe
Pois	Déchaumage Labour-semis Récolte	Date supposée fixe Simulée par OTELO Date supposée fixe
Blé	Déchaumage Semis Récolte	Date supposée fixe Simulée par OTELO Date supposée fixe
Orge d'hiver	Déchaumage Labour-semis Récolte	Date supposée fixe Simulée par OTELO Date supposée fixe
Cultures de printemps	Labour d'hiver	Simulée par OTELO

Les règles de décisions introduites dans OTELO pour les semis du pois de printemps sont directement dérivées des pratiques et du discours de l'agriculteur : le labour est réalisé en sortie hiver (200 ha en labour d'hiver contre 100 ha pour les exploitations agricoles avec pois d'hiver hr et Hr). L'humidité du sol sortie hiver et la température sont apparues comme les deux facteurs les plus importants quant à la date de début de semis. Pendant la période de semis, les règles de décision s'assouplissent à partir d'une certaine date : du 20/03 au 31/03, l'exploitant est exigeant en termes de températures, quantités de précipitations les jours j et j-1 et de RU, mais au-delà de cette date, seules les conditions de précipitation interviennent.

Pour le semis des pois d'hiver hr et Hr, les règles de décision sont dérivées de celles de blé sur blé de l'assolement réel (mêmes conditions de pluviométrie pour la réalisation du labour). Toutefois, de par la plus grande sensibilité du pois à l'état structural, en début de campagne de semis de pois Hr et hr (respectivement du 01/10 au 15/10 et du 01/11 au 20/11), une condition supplémentaire a été ajoutée : la RU doit être inférieure à 90% de la RUm_{ax} (annexe 22). Les pois d'hiver Hr sont semés entre le 01/10 et le 31/10 (objectif de semis en octobre pour allonger le cycle de la culture et semer dans de meilleures conditions d'humidité du sol) (annexe 22). Les pois d'hiver hr sont semés entre le 01/11 et le 30/11 (période recommandée pour la région, ARVALIS-UNIP, 2005). L'agriculteur ne commence pas ses labours d'hiver tant qu'il n'a pas fini de semer les pois (annexe 22).

2.3.2. Couplage des modèles

Le couplage entre les sorties d'OTELO (des dates de réalisation d'opérations culturales) et les entrées de SISOL (humidité du sol au moment des opérations culturales) a été réalisé par l'intermédiaire du modèle de « bilan hydrique » qui simule l'évolution de l'humidité de la couche labourée. Seules les opérations susceptibles d'avoir un effet sur la structure du sol ont été prises en compte. Ainsi, nous avons considéré que les épandages d'herbicides (pour toutes les cultures) et d'engrais (pour les

céréales et le colza) n'avaient pas d'effet sur la structure du sol, la surface affectée par le passage des roues ne représentant qu'une très faible proportion de la surface totale de la parcelle. Nous avons, par ailleurs, fait un certain nombre d'hypothèses quant aux dates des opérations techniques réalisées en dehors de la période simulée par OTELO (Tableau III.10). Les dates de ces opérations ont été considérées comme fixes, car soit elles étaient peu variables d'une année sur l'autre, soit elles correspondaient à des périodes pour lesquelles l'humidité du sol était faible et donc le risque de tassement limité. Ces dates ont été définies par confrontation entre avis d'experts et dates réellement observées au sein de l'exploitation agricole étudiée (annexe 18).

Compte tenu du type de sol considéré dans l'exploitation agricole étudiée, très proche de celui ayant servi à paramétrer la version actuelle de SISOL, nous avons gardé pour nos simulations les valeurs d'humidité à la capacité au champ ($W_{cc} = 33.7 \text{ g g}^{-1}$) et au point de flétrissement permanent ($W_{pfp} = 10.8 \text{ g g}^{-1}$) paramétrées dans le modèle.

Chaque année, le modèle d'évolution de l'humidité a simulé l'humidité massique (W) pour les opérations de déchaumage, labour, semis et récolte de chacune des quatre cultures de la rotation étudiée (colza, blé tendre, pois et orge d'hiver). Ce modèle a été évalué sur les mesures d'humidité massique dans la couche labourée issues de l'essai longue durée de Mons sur la rotation colza / blé tendre d'hiver / pois de printemps / blé tendre d'hiver entre 1996 et 2003, dont une description complète est donnée par Roger-Estrade et al. (2000).

Pour le paramétrage de SISOL, nous avons considéré un profil initial, en 1976, comprenant une teneur faible en éléments structuraux d'état interne Δ (14%), répartis de manière homogène sur l'ensemble du profil, en mottes dont la taille était comprise entre 30 cm² et 300 cm². Les simulations ont été faites à partir de 1976, mais, afin d'éviter toute conséquence de cette initialisation arbitraire, seuls les résultats après 1981 ont été utilisés pour le traitement des données.

SISOL a simulé l'évolution du profil après chaque opération décrite dans le Tableau III.10 chaque année en fonction de l'humidité et des caractéristiques du matériel (annexe 19). La variable de sortie étudiée a été le pourcentage de mottes Δ sur l'ensemble du profil après chaque opération.

En 1976, chacune des 5 parcelles a été semée avec une culture de la rotation, de façon à simuler simultanément 5 rotations. Par la suite, la rotation ayant commencé par du colza en 1976 sera nommée (A), celle avec du blé après colza (B), celle avec du pois (C), celle avec du blé après pois (D) et enfin celle avec de l'orge d'hiver (E).

Outre les conditions climatiques déterminées par les calendriers de travail simulés par OTELO, le modèle AFISOL a été couplé aux autres par l'intermédiaire de la teneur en mottes Δ de la couche labourée et la date de semis.

Afin d'apprécier l'impact de la prise en compte de l'insertion de la culture dans l'exploitation agricole, les rendements simulés par AFISOL en bout de la chaîne OTELO - modèle « bilan hydrique » - SISOL - AFISOL ont été comparés aux rendements simulés par AFISOL pour la même variété, mais avec une date de semis optimale et un état structural non tassé (10% de mottes Δ). Ces conditions visent à représenter celles d'une expérimentation bien conduite, ce pourquoi nous les nommerons « potentielles expérimentateur » (Tableau III.9). La perte de rendement (rdt) par rapport à ce « potentiel expérimentateur » a été calculée par le ratio :

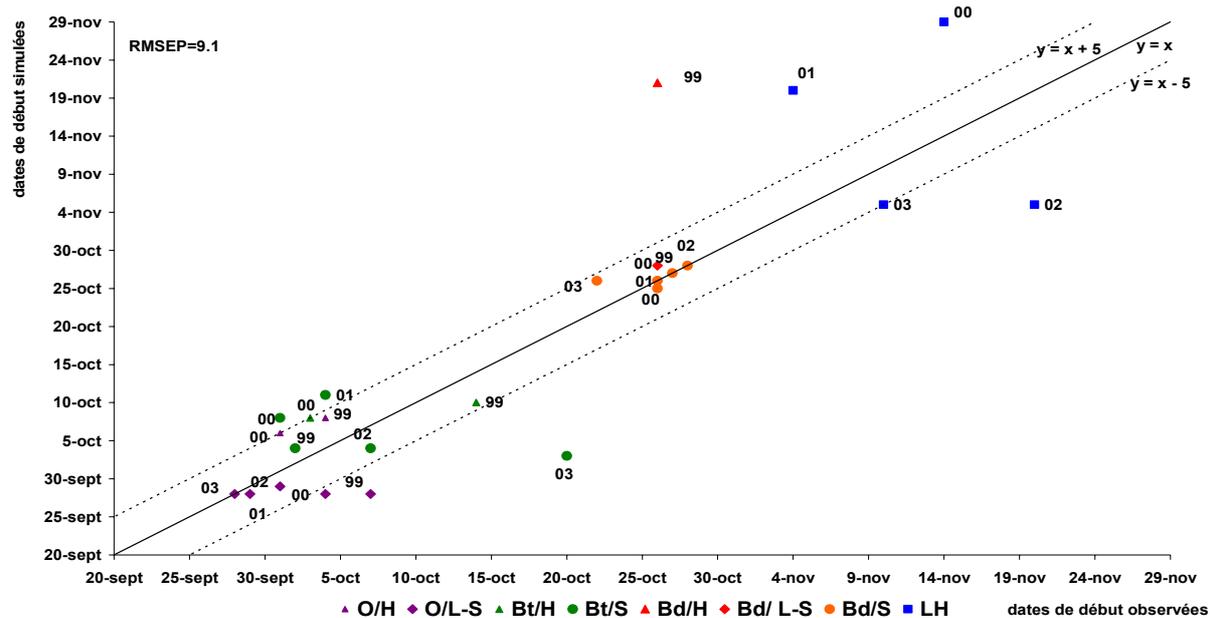
$$\text{Perte} = (\text{Rdt « en ferme »} - \text{rdt « potentiel expérimentateur »}) / \text{rdt « potentiel expérimentateur »}$$

3. Résultats

3.1. Evaluation des modèles OTELO et « bilan hydrique »

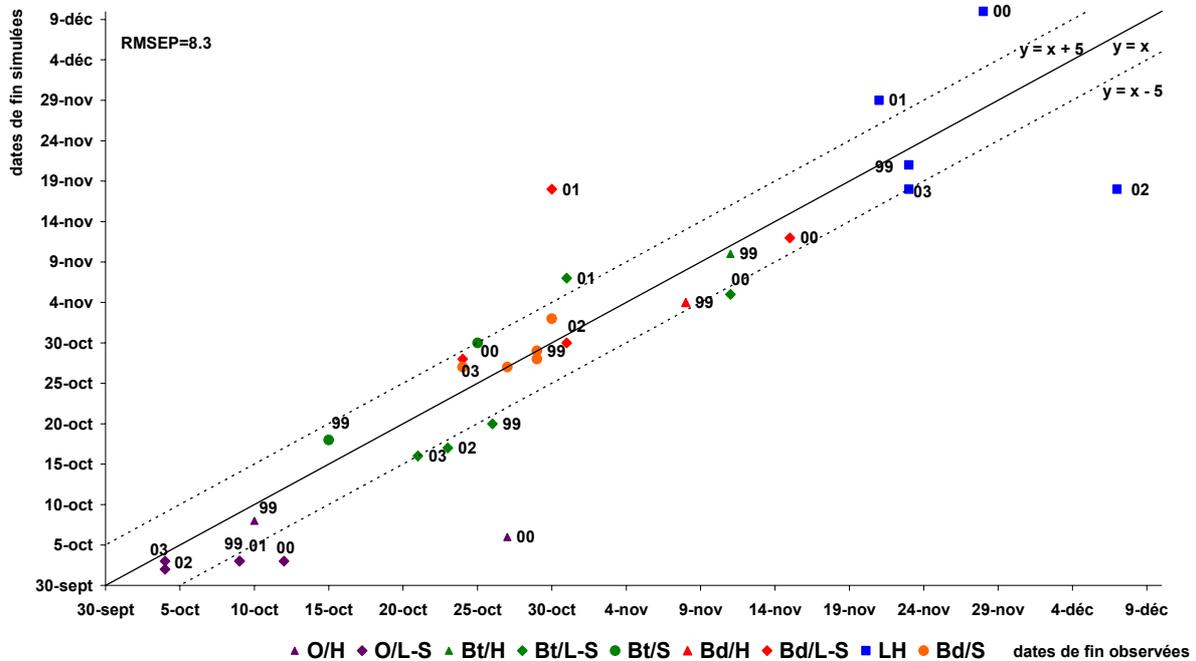
Pour les semis d'automne, tous chantiers confondus, les dates de début d'opérations sont simulées avec une RMSEP¹⁰ de 9 jours (Figure III.16). 80% des dates de début de semis d'orge, de blé tendre et de blé dur et des dates de traitements herbicides sont prédites à plus ou moins 5 jours près. Seul un herbicide blé en 1999 est simulé une vingtaine de jours plus tard que dans la réalité. Les dates de début de labour d'hiver sont globalement moins bien simulées. Les dates de fin d'opérations sont, quant à elles, simulées avec une RMSEP de 8 jours tous chantiers confondus (Figure III.17). De même que pour les dates de début de semis et de traitements herbicides pour les cultures d'orge, de blé tendre et de blé dur, dans la majorité des cas, la date de fin de chantier est simulée à plus ou moins 5 jours à deux exceptions près (herbicide d'orge en 2000 et labour-semis de blé dur en 2001).

Figure III.16. Confrontation dates de début de chantiers (orge : herbicide post-semis : O/H et labour-semis : O/L-S; blé tendre : herbicide post-semis : Bt/H et semis : Bt/S, blé dur : herbicide : BD/H et labour-semis : Bd/L-S, labour d'hiver : LH) observées et simulées entre 1999 et 2003. Les lignes pointillées délimitent les chantiers prédits à plus ou moins 5 jours près par rapport aux dates observées. Les numéros indiquent les années.



¹⁰ définie dans la partie 2

Figure III.17. Confrontation dates de fin d'opérations (orge : herbicide post-semis : O/H et labour-semis : O/L-S; blé tendre : herbicide post-semis : Bt/H, labour-semis : Bt/L-S et semis : Bt/S, blé dur : herbicide : Bd/H, labour-semis : Bd/L-S et semis : Bd/S, labour d'hiver : LH) observées et simulées entre 1999 et 2003. Les lignes pointillées délimitent les chantiers prédits à plus ou moins 5 jours près par rapport aux dates observées. Les numéros indiquent les années.



Pour les semis de pois de printemps, le modèle prédit la date de début à 5 jours près et la date de fin à 6 jours près (Figure III.18). La période de semis est simulée environ 10 jours trop tôt en 1999. En 2002, le chantier s'est terminé plus tard que dans la simulation.

Les durées des différents chantiers sont simulées avec une RMSEP de 1 jour et sont, dans l'ensemble, réparties de façon symétrique par rapport à la première bissectrice, excepté pour les semis de pois de printemps, chantier pour lequel la durée est légèrement surestimée par OTELO (Figure III.19). OTELO ne simule pas de variabilité dans la durée du chantier contrairement à ce qui a été observé.

L'ensemble de ces résultats d'évaluation confirme le réalisme des simulations de calendrier d'intervention réalisées par OTELO. Le jeu de règles de décision élaboré à partir de l'enquête auprès de l'agriculteur apparaît fidèle à la réalité de cette exploitation. Nous retiendrons ce jeu de règles, avec les quelques adaptations signalées plus haut, pour la suite du travail.

Figure III.18. Confrontation dates de début et de fin de semis de pois de printemps observées et simulées entre 1999 et 2003. Les lignes pointillées délimitent les chantiers prédits à plus ou moins 5 jours près par rapport aux dates observées. Les numéros indiquent les années.

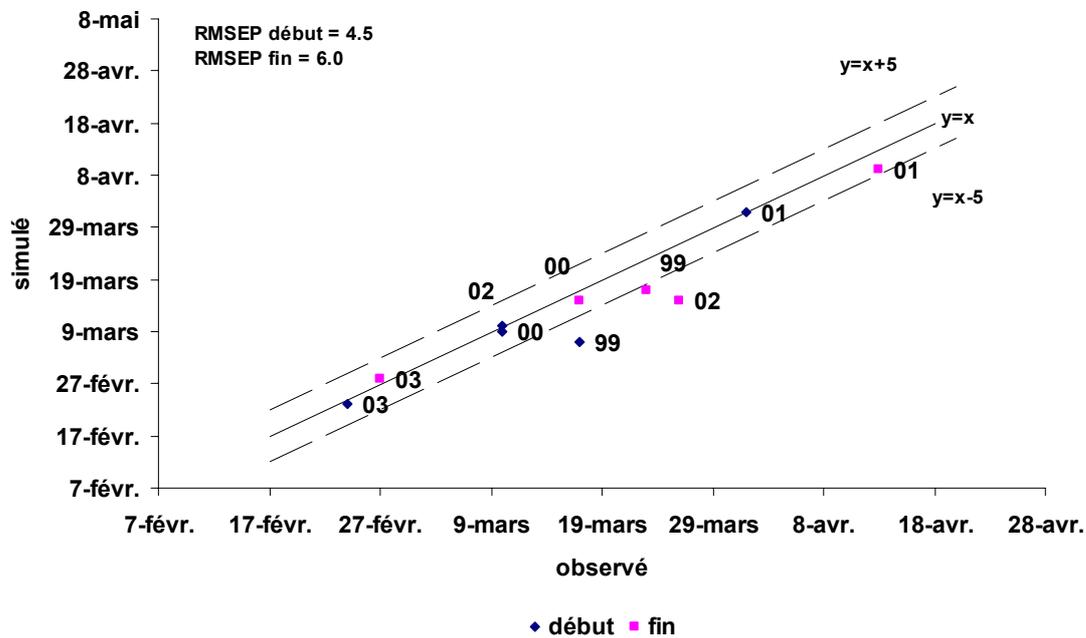
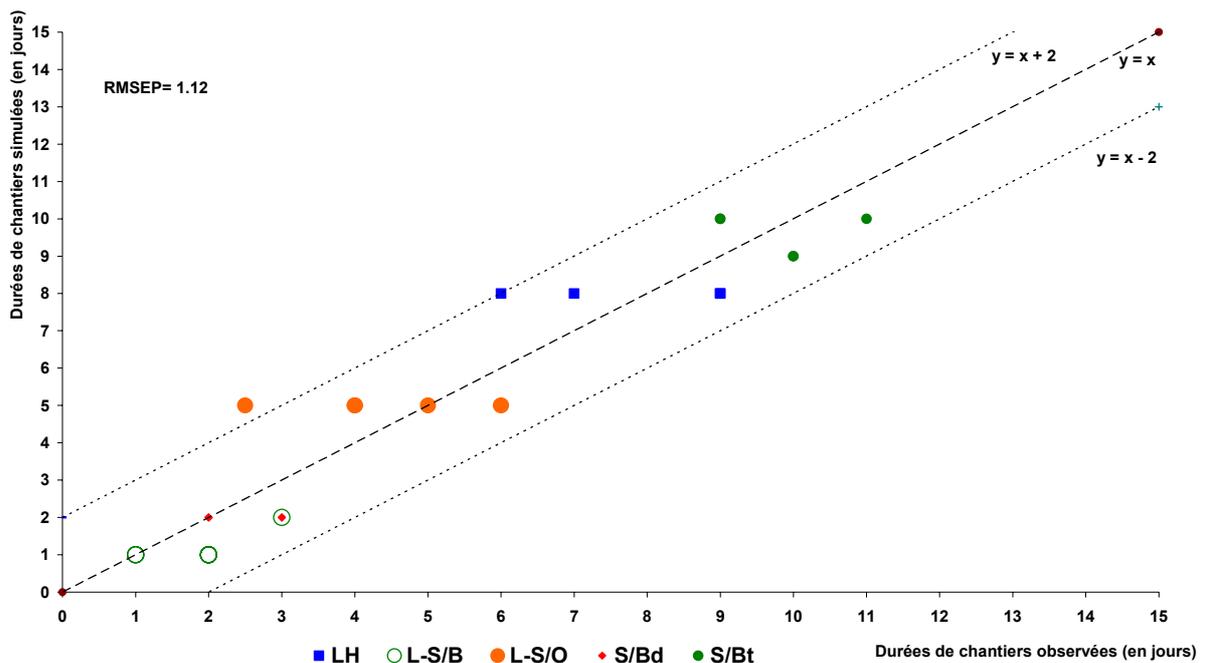


Figure III.19. Confrontation durées de chantiers (labour d'hiver : LH, labour-semis de blé : L-S/B, labour-semis d'orge : L-S/O, semis de blé dur : S/Bd, semis de blé tendre : S/Bt et le semis de pois de printemps : S/pp) observées et simulées entre 1999 et 2003. Les lignes pointillées délimitent les durées de chantiers prédites à plus ou moins 2 jours près par rapport aux durées observées.



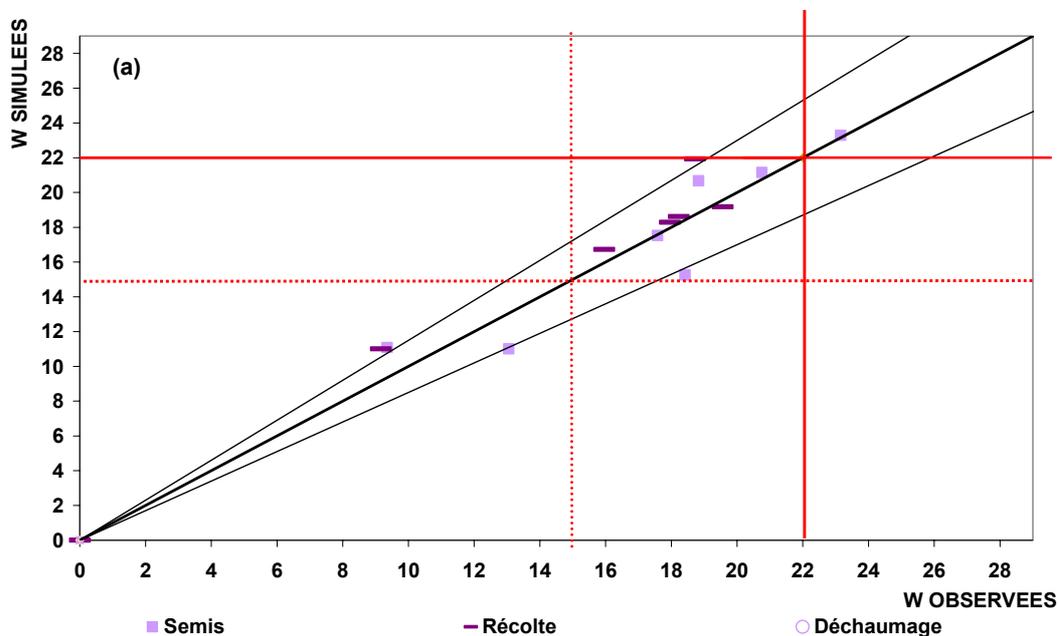
L'évaluation du modèle de bilan hydrique a été faite sur l'essai longue durée de Mons (Roger-Estrade et al., 2001). Les humidités massiques au moment des opérations de semis et de récolte de colza ont été simulées avec une précision de 10% et 11%, respectivement (Figure III.20, Tableau III.11).

Les humidités massiques au moment des opérations de déchaumage et de semis pour les blés après colza et après pois de printemps ont été simulées avec une précision comparable (moyenne d'environ 24% et 14%, respectivement). En revanche, la prédiction d'estimation de l'humidité massique au moment de la récolte des blés après pois de printemps a été meilleure que celle des blés après colza (Tableau III.11). Aucun biais particulier n'a toutefois été observé (Figure III.20).

Pour le pois de printemps, les opérations pour lesquelles les humidités massiques sont prédites avec la moins grande précision sur le déchaumage (24%) et la récolte (15%) (Tableau III.11, Figure III.20). En revanche, les valeurs d'humidité massique au moment des opérations de labour et de semis ont été simulées avec une précision correcte (8% respectivement pour les deux chantiers).

Les résultats de validation du modèle de bilan hydrique sont satisfaisants, compte tenu des hypothèses de simplification faite. Ceci justifie donc de l'intégrer au sein du couplage de modèles et de l'utiliser afin de déterminer l'humidité massique aux dates d'intervention pour chaque culture et chaque opération étudiée.

Figure III.20. Comparaison des humidité massiques (W) des valeurs observées et simulées par le modèle de bilan hydrique sur l'essai longue durée de Mons pour les 3 cultures de la rotation (colza : a, pois de printemps : b et blé : c) en fonction de l'opération technique. Les traits verticaux pleins représentent l'humidité massique seuil de compactage pour le déchaumage et le semis (seuil de 22%, Roger-Estrade et al., 2001). Les traits verticaux en pointillés représentent l'humidité massique seuil de compactage pour la récolte (seuil de 15%, Roger-Estrade et al., 2001). Les traits obliques représentent un écart de plus ou moins 10% par rapport à la première bissectrice.



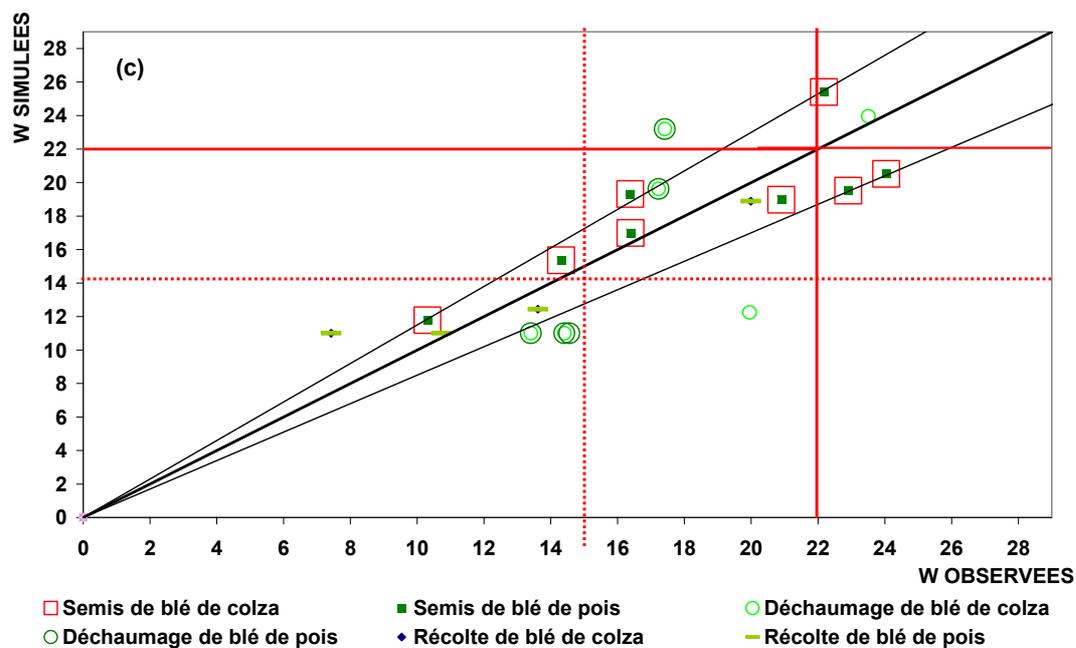
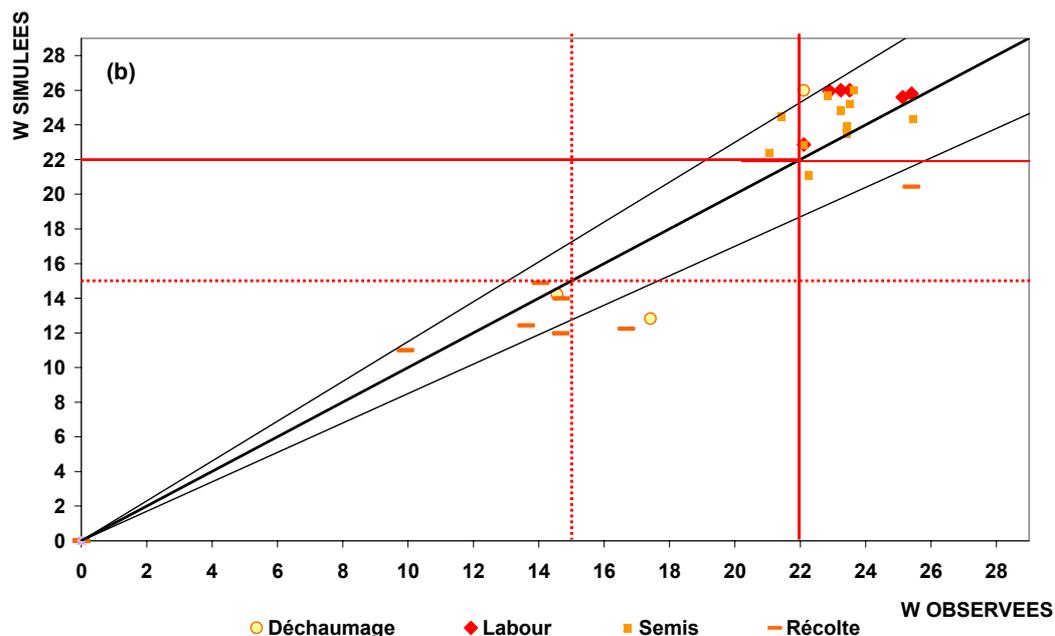


Tableau III.11. RRMSEP (%) par culture et opération culturale pour le modèle de bilan hydrique.

Opération	Colza	Blé	Pois de printemps	Blé
Déchaumage		25	19	24
Labour			8	
Semis	10	14	8	14
Récolte	11	22	18	15

3.2. Simulations

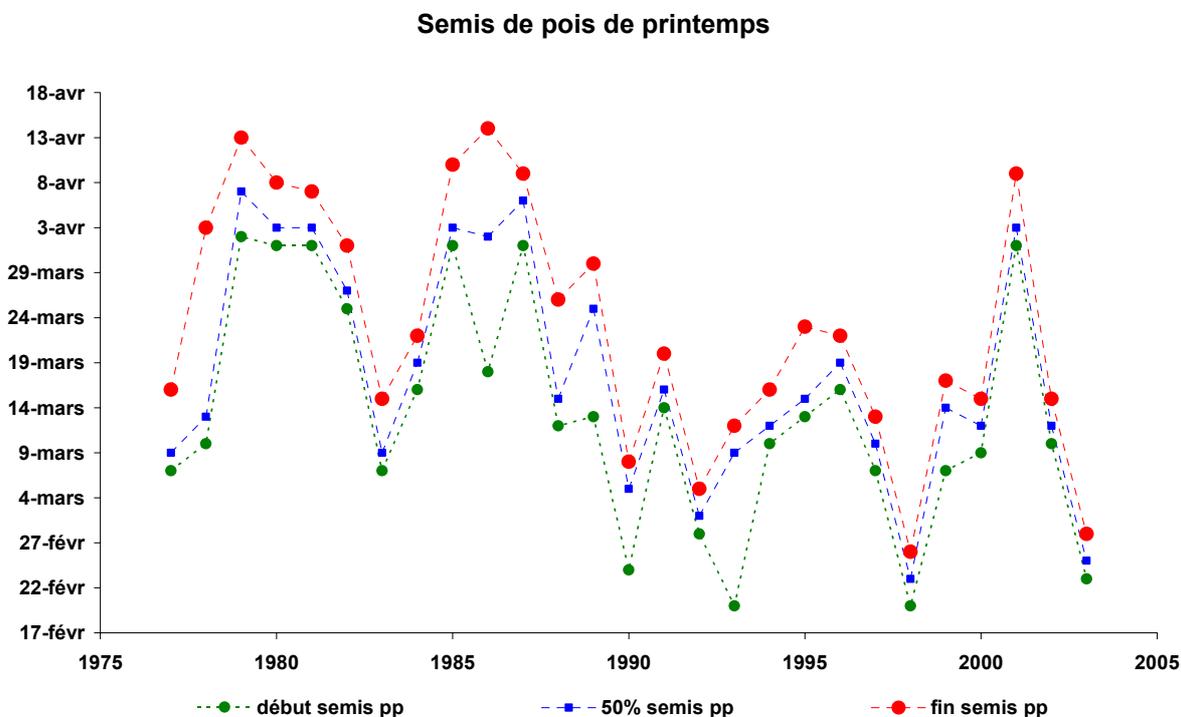
3.2.1. Dates de semis du pois et du blé

Pour le pois de printemps (Figure III.21), la date de semis est très variable d'une année sur l'autre. Les semis de pois commencent entre le 20 février (1993 et 1998) et le 16 mars (1996). Au plus tard, les semis de pois ont lieu jusqu'au 9 avril (2001). Il en est de même pour l'écart entre les dates de début et de fin de semis : le minimum observé est de 6 jours (8 années sur 28) et le maximum de 27 jours (en 1986).

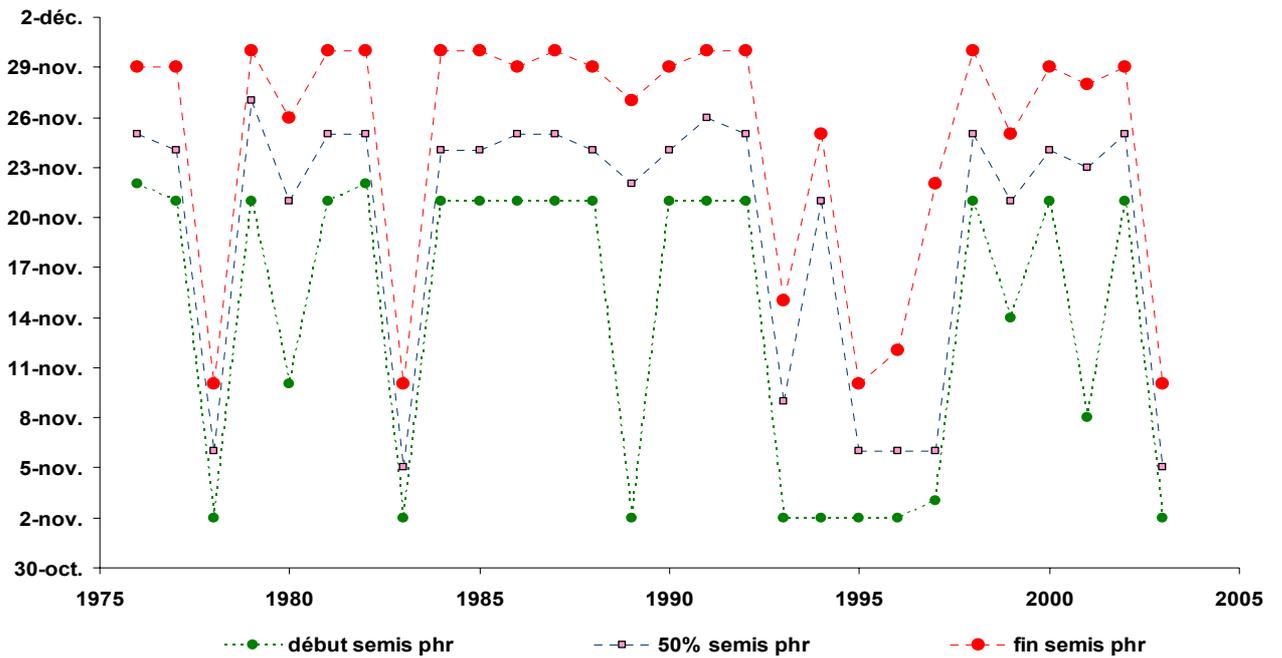
Pour le pois d'hiver hr, la variabilité interannuelle est moins importante que pour le pois de printemps (Figure III.21). Le début de semis se situe entre le 2 novembre et le 21 novembre. L'écart entre date de début et de fin de semis varie de 7 jours (1976) à 25 jours (1989). Dix-neuf années sur 28, la durée de chantier est de 8 à 9 jours. Compte tenu des règles de décision du modèle, certaines années toutes les surfaces de pois d'hiver ne peuvent pas être semées (Figure III.22).

Pour le pois d'hiver Hr, la variabilité des dates de début et de fin de semis est plus faible que pour les deux autres types de pois (Figure III.21). En effet, 22 années sur 28, le semis commence le 3 ou le 4 octobre. La date de début de semis la plus tardive (16 octobre) est observée en 1982 avec pour conséquence la date de fin de semis la plus tardive de toutes les années étudiées (26 octobre). La durée du chantier est assez stable : 10 à 11 jours 23 années sur 28, un maximum de 21 jours étant observé en 1993.

Figure III.21. Dates de début, médiane et de fin de semis de pois en fonction du type de pois (printemps, hiver hr et hiver Hr) dans l'exploitation.



Semis de pois d'hiver hr



Semis de pois d'hiver Hr

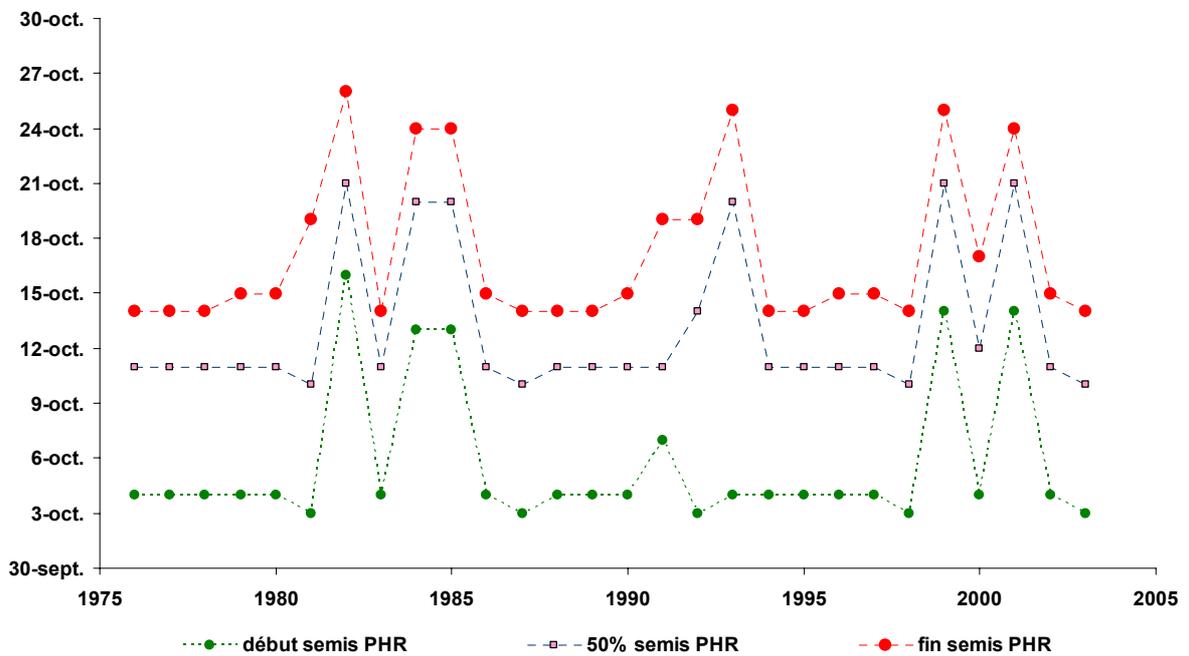
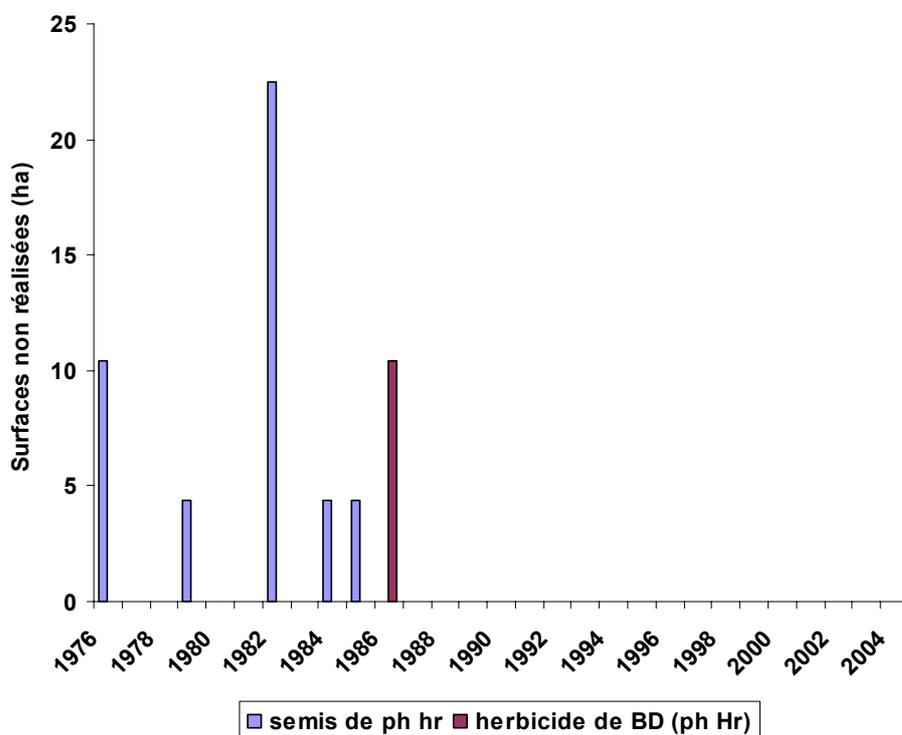


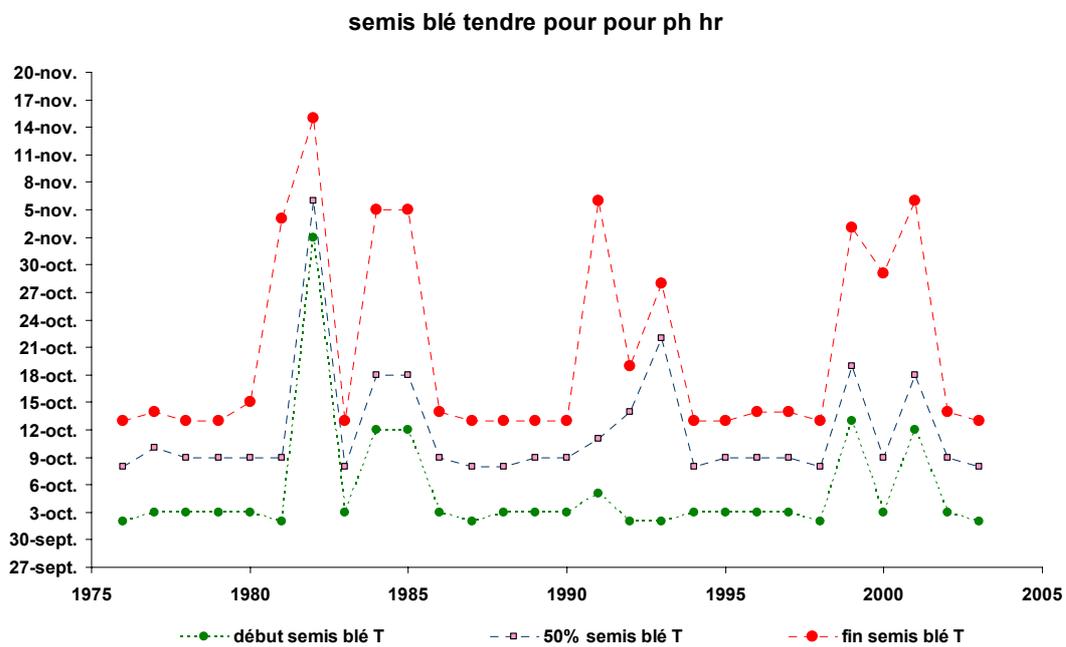
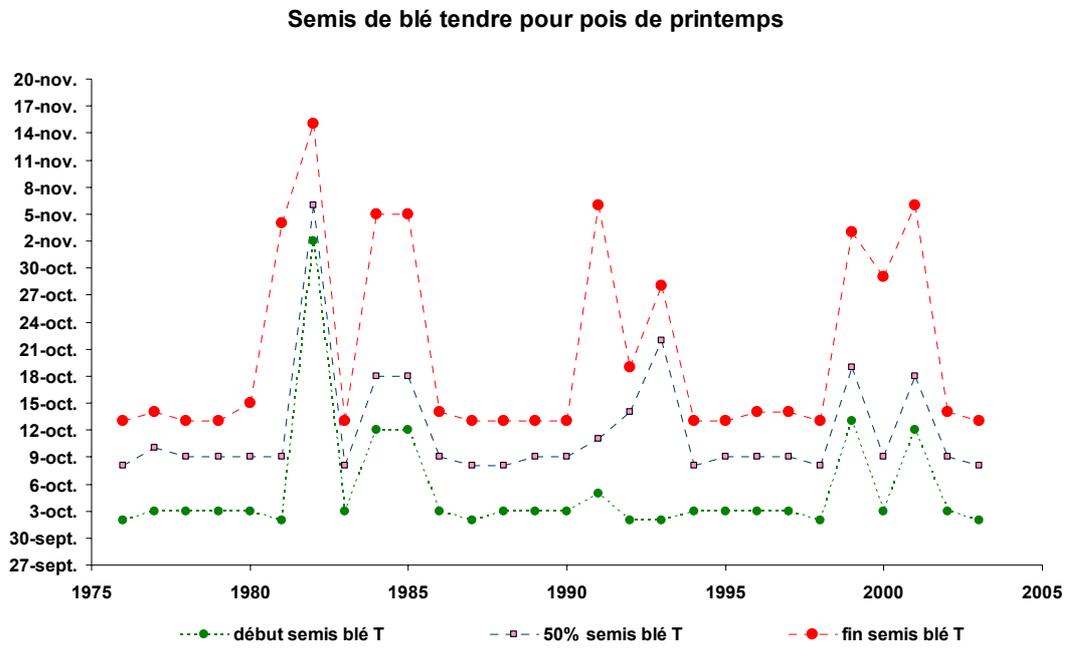
Figure III.22. Surfaces (ha) sur lesquelles certains travaux (semis de pois d’hiver hr et herbicide sur céréales pour l’exploitation avec du pois d’hiver Hr) n’ont pas pu être réalisés compte tenu de la concurrence entre chantiers et des conditions climatiques.



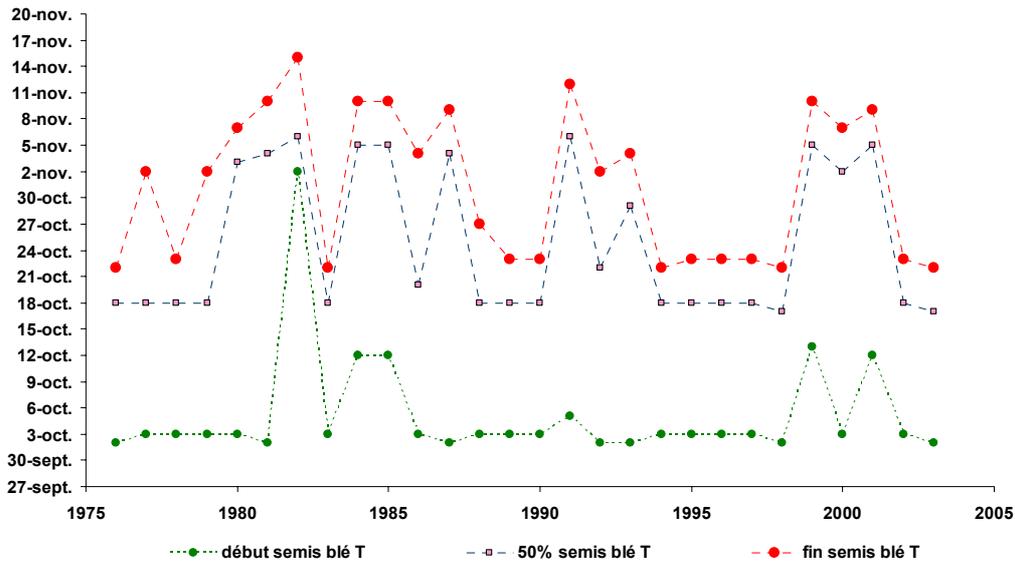
La date de début de semis de blé tendre, peu variable d’une année sur l’autre, n’est pas affectée par le type de pois : le semis de blé tendre commence le 3 ou le 4 octobre 22 années sur 28 (Figure III.23). Le type de pois a, en revanche, une influence sur la date de fin de semis de blé. Pour les pois de printemps et d’hiver classiques, 18 années sur 28, cette dernière a lieu entre le 13 et le 15 octobre ; alors que, pour les pois d’hiver Hr, elle ne se termine que 13 années sur 28 entre le 21 et le 24 octobre. Au plus tard, la fin des semis de blé tendre est observée le 15 novembre pour les trois types étudiés. Notons cependant qu’en 1986, dans l’exploitation ayant adopté le pois d’hiver Hr, 10 ha de blé dur n’ont pas pu recevoir d’herbicide post-semis (Figure III.22).

Pour la suite du travail avec SISOL et AFISOL, afin de maîtriser l’explosion combinatoire qui serait générée par la prise en compte, pour chaque culture de la rotation, de toutes les dates d’intervention simulées, on considérera, pour une opération donnée et une année donnée, que le jour médian de la période d’intervention (50% des surfaces ayant subi l’opération technique considérée). Une analyse de sensibilité a permis de vérifier que la comparaison des trois types de variétés reste inchangée quand on considère, au lieu du jour médian de réalisation de l’intervention, le jour où 80% des surfaces ont subi l’opération (résultats non montrés).

Figure III.23. Dates de début, médiane et de fin de semis du blé tendre en fonction du type de pois (printemps, hiver hr et hiver Hr) dans l'exploitation.



Semis de blé tendre pour ph Hr

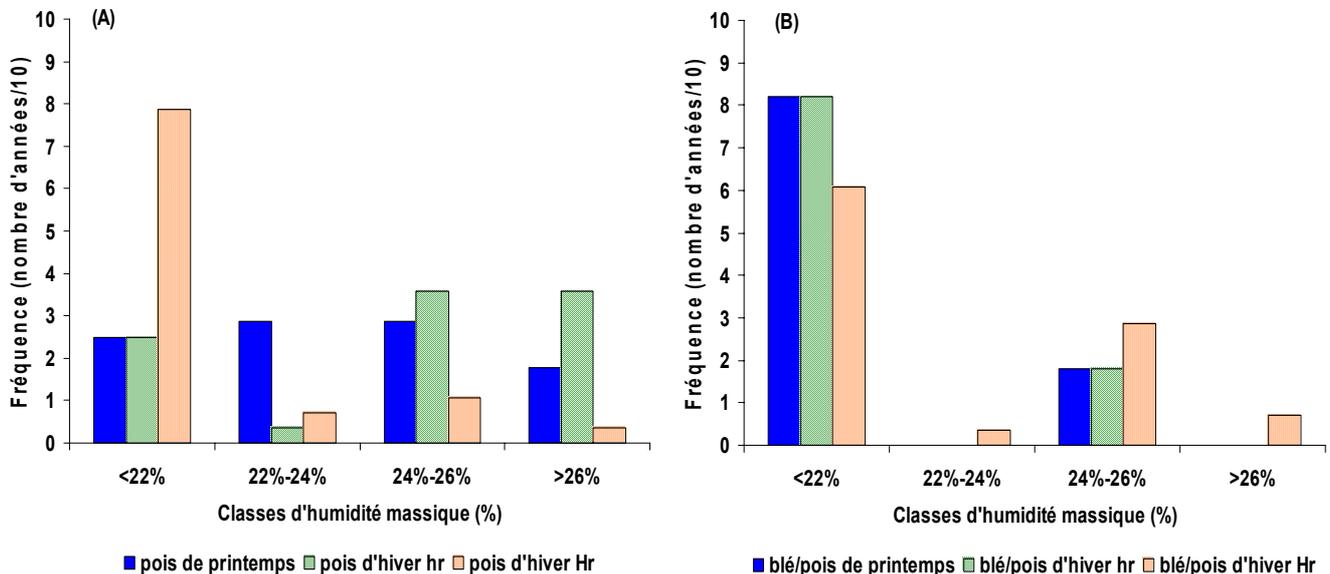


3.2.2. Humidité au moment du semis

La modification de la date de semis du pois a eu un effet sur l'humidité au moment du semis (Figure III.24). Un semis début octobre (ph Hr) favorise les semis en condition d'humidité massique (W) inférieure à 22% (observé 8 années sur 10). Pour le pois de printemps, les différentes classes d'humidité sont également réparties. Pour le pois d'hiver hr, 4 années sur 10, W est supérieure à 26%, taux d'humidité qui correspond, pour le type de sol considéré, à la capacité au champ.

L'humidité massique au moment du semis de blé est aussi influencée par le type de pois de l'exploitation (Figure III.24). Pour le pois d'hiver Hr, 6 années sur 10, W n'est inférieure à 22% que 6 années sur 10, contre 8 années sur 10 pour les deux types de pois classiques. Les classes d'humidité 24%-26% et >26% sont plus représentées pour Hr que pour les variétés classiques.

Figure III.24. Nombre d'année sur 10 avec humidité massique dans les 4 classes définies : <22%, entre 22% et 24%, entre 24% et 26% et > à 26% au moment du semis de pois (A) et de blé (B) en fonction du type de pois de l'exploitation (printemps, hiver hr et hiver Hr).



3.2.3. Etat structural

Pour chaque opération (déchaumage, labour, semis et récolte) et pour chaque culture, la valeur d'humidité simulée chaque année par notre modèle de bilan hydrique a été entrée dans SISOL afin de déterminer l'évolution pluriannuelle de l'état structural résultant des calendriers simulés par OTELO.

La Figure III.25 montre l'évolution de la teneur en mottes Δ dans la couche arable du sol. Chaque point résulte de la moyenne sur la période 1981-2004 des valeurs obtenues après chaque opération, pour chaque culture, dans les rotations A, B, C, D et E¹¹. Le type de pois a les effets les plus importants sur la teneur en mottes Δ à deux moments de la rotation : lors des semis de cette culture et lors des semis de blé de pois. Lors des semis de pois, la teneur en Δ augmente de 6% pour les rotations avec pois d'hiver Hr, contre 18% pour celles avec pois de printemps et 22% pour celles avec pois d'hiver hr. Lors des semis de blé de pois, la teneur en Δ augmente pour une rotation avec pois d'hiver Hr alors qu'elle diminue pour les deux autres types de pois. Elle reste cependant plus élevée sous le blé de pois hr et sous l'orge qui le suit, ces deux cultures n'effaçant pas totalement les différenciations antérieures.

Ce sont plus particulièrement certaines opérations culturales qui créent les différenciations entre les exploitations cultivant des variétés de pois différentes (annexe 24):

- les semis de blé qui entraînent une augmentation de la teneur en Δ supérieure avec le pois d'hiver Hr par rapport aux deux autres types en 1984, 1986, 1987, 1991, 1992, 1996, 1999 et 2000,
- les semis de pois qui entraînent :
 - une augmentation de la teneur en Δ supérieure avec le pois de printemps et le pois d'hiver hr par rapport au pois d'hiver Hr en 1986, 1987, 1991, 1998 et 2000,
 - une augmentation de la teneur en Δ supérieure avec le pois de printemps par rapport aux deux autres types en 1985, 1988 et 1995,
 - une augmentation de la teneur en Δ supérieure avec le pois d'hiver hr par rapport aux deux autres types en 1981, 1987, 1990, 1991, 1992, 1993.

Sur l'ensemble des rotations (A à E), quelle que soit la variété de pois, la teneur en Δ varie entre 10 et 79% (Figure III.26, annexe 24). La variabilité de la teneur en Δ apparaît comme étant fonction des années et des cultures sans que se dégage une tendance nette d'évolution à moyen ou long terme. Il ne semble pas y avoir d'effet cumulatif conduisant à une dégradation (ou à une amélioration) de la structure, l'indicateur « teneur en Δ » fluctuant assez largement autour de la valeur moyenne de l'ensemble de la période simulée. En relation avec les caractères spécifiques du climat des années de culture du pois, le classement des teneurs en Δ entre variétés peut, sensiblement, différer entre rotations A, B, C, D et E. La teneur en Δ des rotations avec pois d'hiver hr est souvent supérieure à celle avec les deux autres types de pois pour les rotations B (plus particulièrement entre 1987 et 1997), C (plus particulièrement entre d'une part 1981 et 1986 et d'autre part 1991 et 1996) et E (plus particulièrement entre 1991 et 2003). La teneur en Δ des rotations avec pois de printemps est souvent supérieure à celle avec les deux autres types de pois pour les rotations A (plus particulièrement entre 1988 et 1995) et D (plus particulièrement entre d'une part 1985 et 1996).

¹¹ rotations identiques (colza-blé-pois-blé-orge), décalées d'un an

Figure III.25. Moyenne entre 1981 et 2003 du % de mottes Δ dans la couche arable du sol en fonction de la culture et de l'opération culturale. Pour chaque point, la moyenne des valeurs obtenues après l'opération considérée pour la culture considérée a été utilisée.

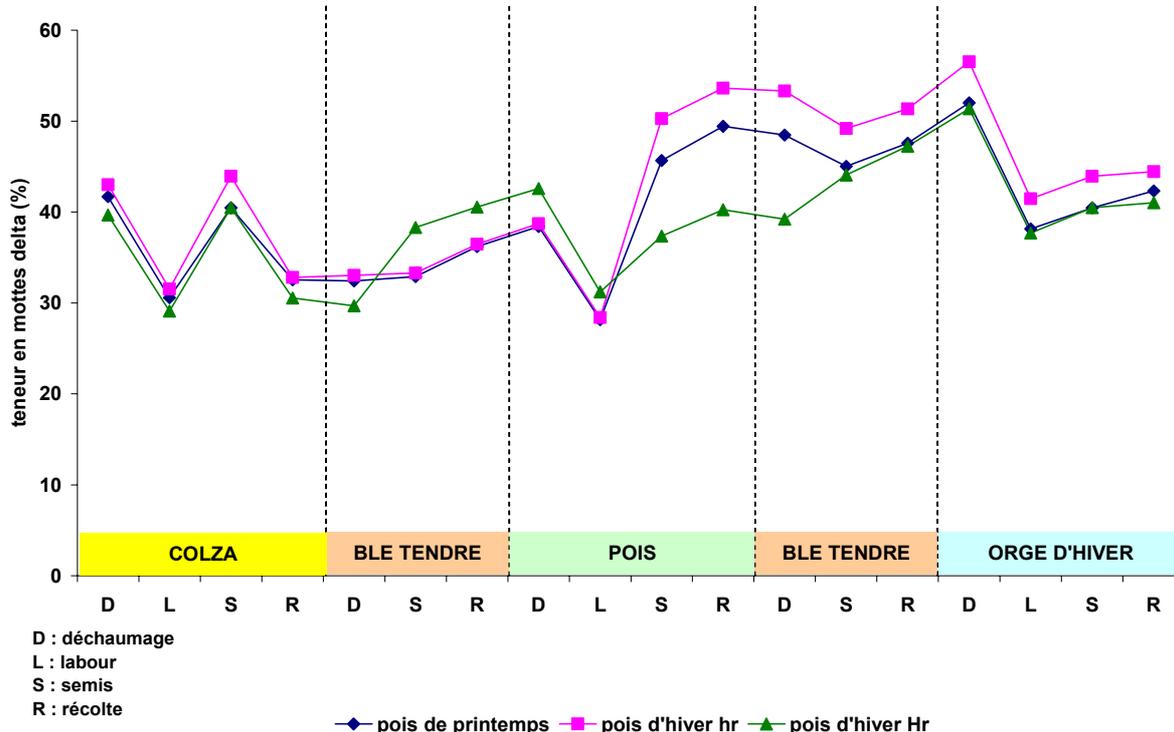


Figure III.26. Evolution de la teneur en mottes Δ entre 1981 et 2003 pour l'assolement A (i.e. débutant en 1976 avec du colza) en fonction du type de pois semé dans l'exploitation (pois de printemps : ◆ ; pois d'hiver hr : ■ ; pois d'hiver Hr : ▲). Les traits verticaux en pointillés séparent chaque culture semé chaque année (C : colza ; B : blé tendre d'hiver ; P : pois ; O : orge d'hiver).

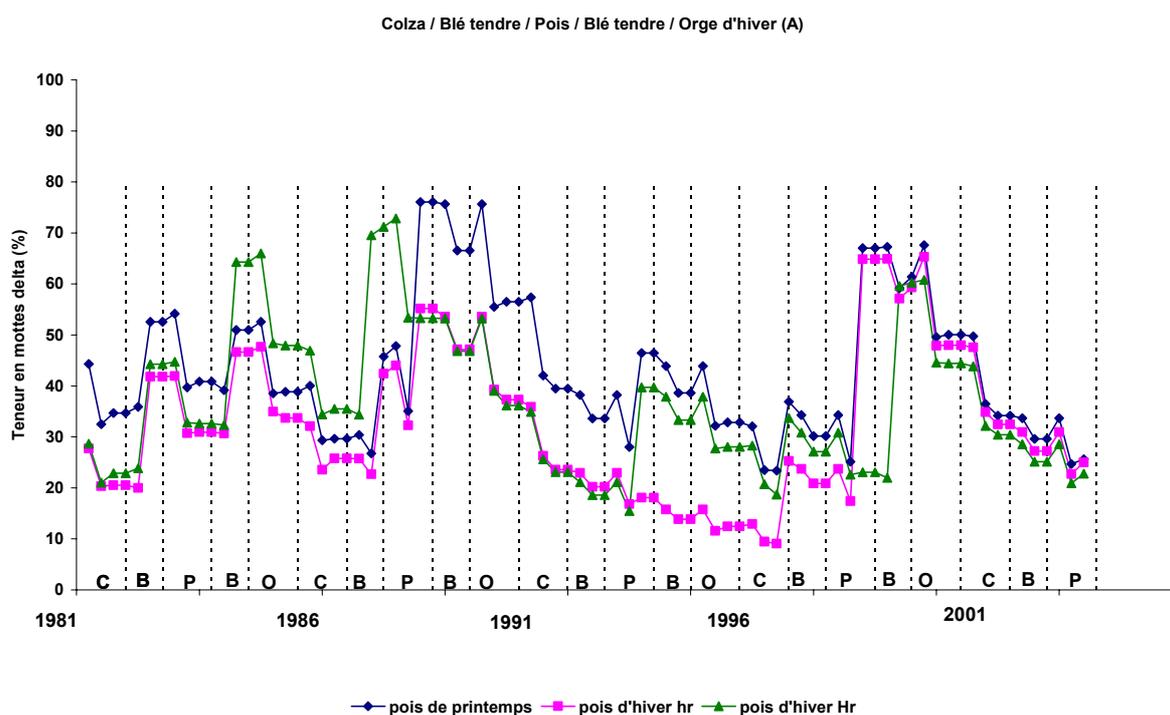
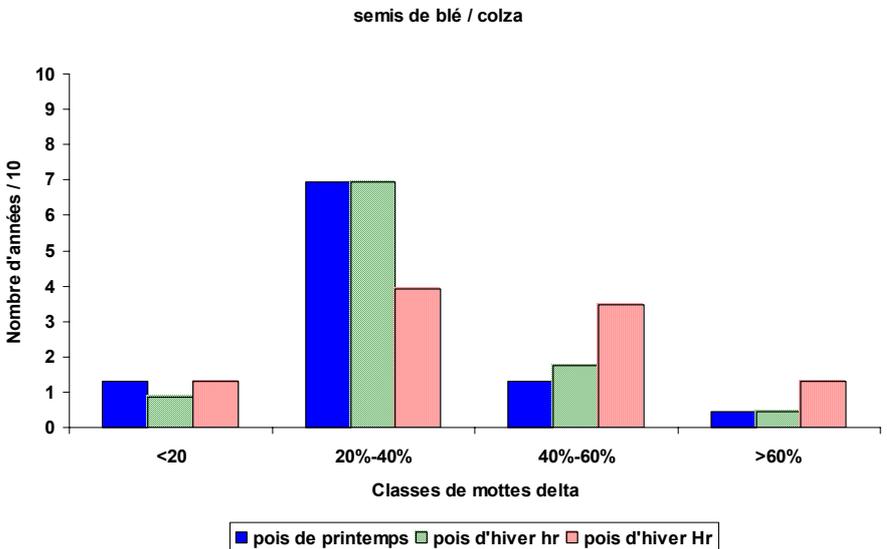
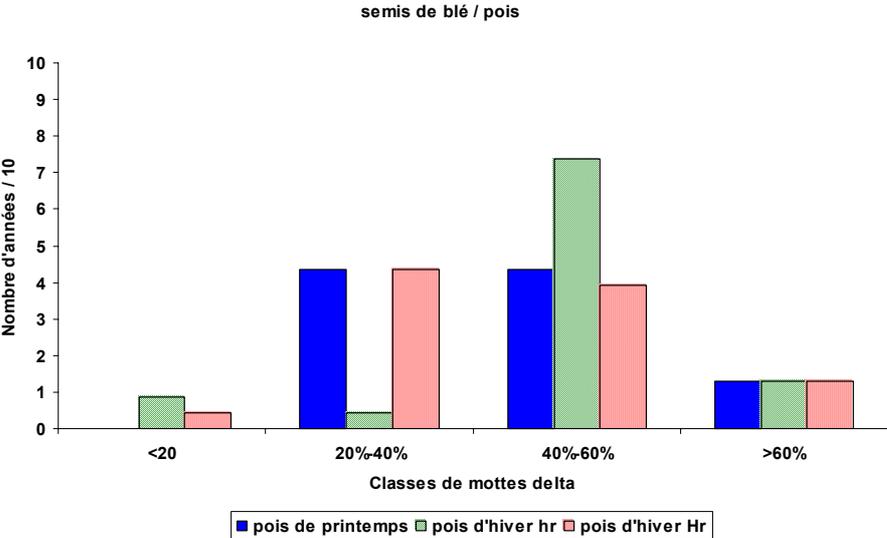
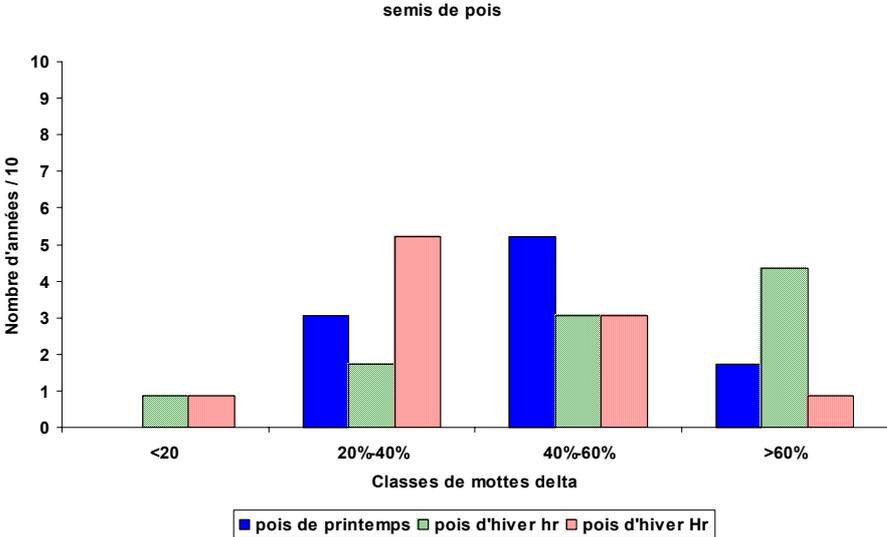


Figure III.27. Fréquence d'occurrence (estimée en nombre d'année sur 10) de chacune des 4 classes de Δ suivantes : <20%, entre 20% et 40%, entre 40% et 60% et > à 60% évaluées au moment du semis de pois, de blé de pois et de blé de colza en fonction du type de pois de la rotation (printemps, hiver hr et hiver Hr).



Pour les sols sous culture de pois, la classe de teneur en mottes Δ la plus représentée est 40%-60% (5 années sur 10) pour le pois de printemps, >60% pour le pois d'hiver hr (4 années sur 10) et 10%-40% pour le pois d'hiver Hr (5 années sur 10) (Figure III.27). Pour les sols sous culture de blé après pois, la répartition de la teneur en mottes Δ est identique pour pois de printemps et pois d'hiver Hr : les deux classes les plus représentées sont 20%-40% et 40%-60%, 4 années sur 10. Pour le blé après pois d'hiver hr, 7 années sur 10 la teneur en mottes Δ est comprise entre 40% et 60%.

Sous culture de blé après colza, les exploitations avec pois de printemps et pois d'hiver hr présentent des répartitions comparables de la teneur en mottes Δ dans les différentes classes, avec, notamment, 7 années sur 10 une teneur en mottes Δ comprise entre 20% et 40%. Pour le pois d'hiver Hr, les deux classes les plus représentées sont 20%-40% et 40%-60%, 4 et 3 années sur 10, respectivement.

3.2.4. Effet sur la production du pois et la quantité d'azote dans les pailles

La Figure III.28 illustre les résultats des simulations de rendements effectuées avec AFISOL : les données présentées correspondent au ratio entre les rendements « en ferme » et « potentiel expérimentateur » respectivement pour chaque type de pois, comme vu précédemment. Les fréquences sont calculées sur le nombre d'années de simulation (1981 à 2004).

Figure III.28. Risques de pertes de rendement par rapport au « potentiel expérimentateur » en fonction du type de pois dans l'exploitation sans (a) ou avec (b) intégration des effets du gel sur les classes de pertes de rendement.

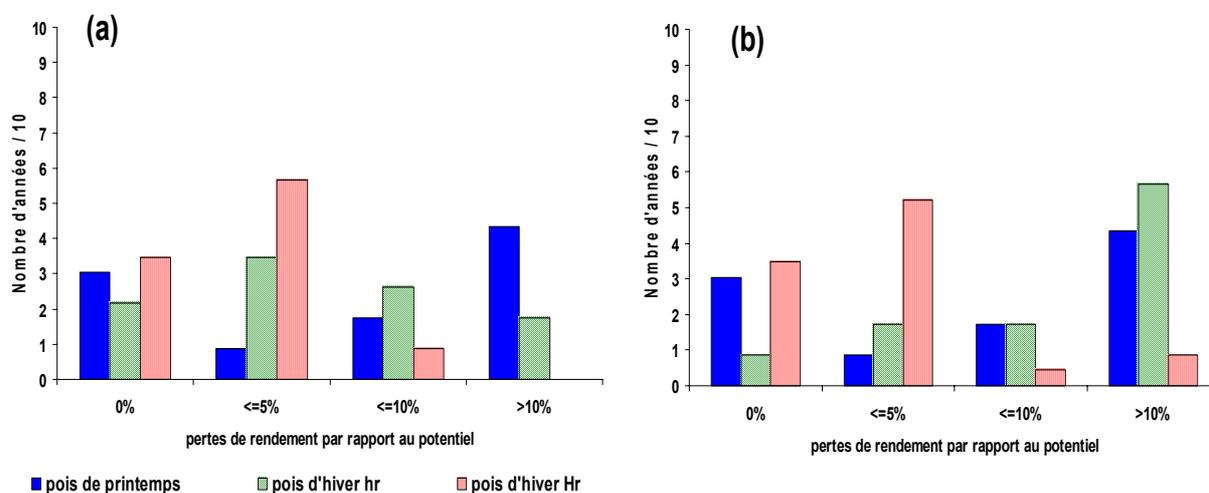


Tableau III.12. Coefficients de variation du rendement en fonction du type de pois et des conditions de culture.

	Potentiel expérimentateur	En ferme	
		Sans risque de gel	Avec risque de gel
Pois de printemps	10%	19%	29%
Pois d'hiver hr	8%	12%	87%
Pois d'hiver Hr	7%	8%	32%

On observe que les pertes de rendement sont fréquemment très élevées pour le pois de printemps (supérieures à 10% 4 années sur 10). Elles sont, au contraire, inférieures à 5% 6 années sur 10 pour le pois d'hiver hr, et 9 années sur 10 pour le pois d'hiver Hr.

Le Tableau III.12 présente les coefficients de variation des rendements simulés, « potentiel expérimentateur » et « en ferme ». La variabilité du rendement est faible et peu différentes entre variétés pour le « potentiel expérimentateur » (7 à 10%) : elle tend à augmenter « en ferme », sauf pour le pois d'hiver Hr. C'est pour le pois de printemps que la variabilité du rendement en ferme est le plus important (coefficient de variation de 19%).

L'intégration des risques de gel¹² sur le rendement n'a pas d'effet pour les pertes de rendement par rapport au potentiel pour le pois de printemps et le pois d'hiver Hr (Figures III.28). En revanche, les pertes de rendement pour le pois d'hiver hr sont plus fréquemment très élevées que précédemment (supérieures à 10% 6 années sur 10).

La variabilité du rendement est plus élevée que précédemment par l'intégration du risque de gel. Le pois de printemps et le pois d'hiver Hr ont une variabilité du rendement comparable (29% et 32%, respectivement, Tableau III.12). A l'inverse, le pois d'hiver hr a un coefficient de variation du rendement de 87% (7 fois supérieur à celui calculé sans prise en compte des effets du gel), lié au risque de gel de 4 années sur 10 entre semis et levée (Figure III.29).

Nous avons fait la moyenne des quantités d'azote des pailles à la date de maturité pour chacun des types de pois étudiés afin de les comparer (Tableau III.13). Quel que soit le type de pois, les valeurs pour les types en conditions « potentiel expérimentateur » sont inférieures à celles en conditions « ferme » pour les pois de printemps et les pois d'hiver hr, mais pas pour le pois d'hiver Hr pour lequel les deux types de conditions de culture obtient la même quantité d'azote des pailles à la date de maturité. De plus, les quantités d'azote des pailles les plus élevées sont observées pour le pois d'hiver hr, suivi du pois de printemps et au final, du pois d'hiver Hr.

¹² pour rappel, comme nous l'avons vu dans la partie 2, le seuil de sensibilité d'une culture de pois au gel est fonction de son stade. Ainsi, pour chacune des trois périodes suivantes : semis-levée, levée-initiation florale et initiation florale-maturité, une température seuil en dessous de laquelle la culture gelaît a été définie à l'aide de la littérature. Chaque année pour laquelle il existe au moins un jour à risque de gel, l'hypothèse a été faite que le rendement était alors nul. Les calculs de risques de pertes de rendement et de coefficients de variation ont donc été après intégration de ces considérations.

Figure III.29. Effet du type de pois (pois de printemps : pp, pois d’hiver hr : ph hr et pois d’hiver hr : ph Hr) et des conditions de culture (chez l’agriculteur ou potentiel sélectionneur) sur le nombre d’années sur 10 avec risque de gel entre semis et levée.

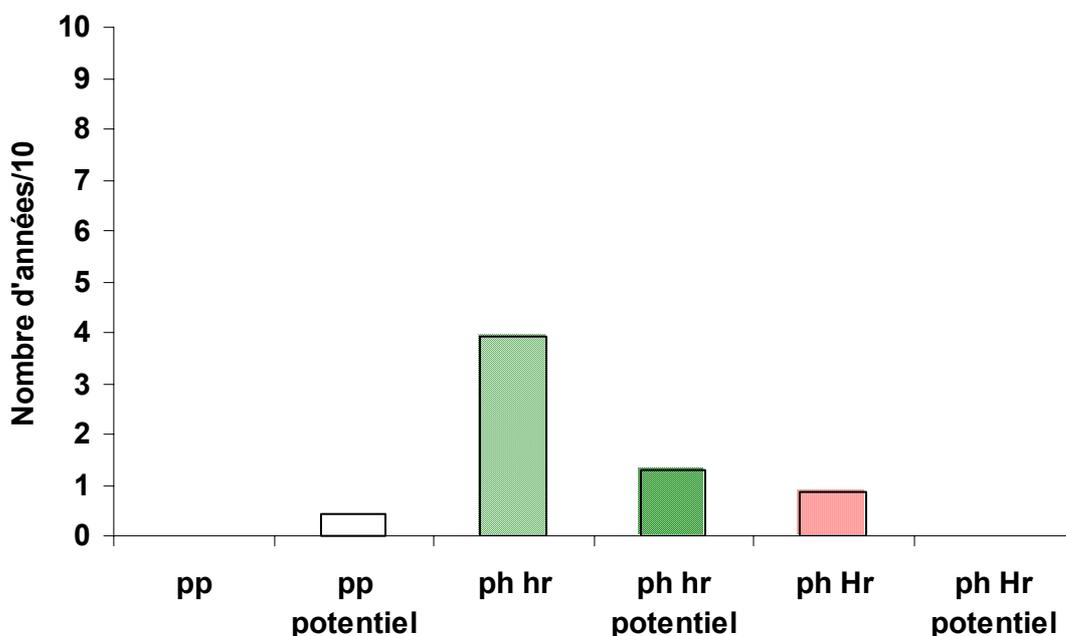


Tableau III.13. Classement des situations par quantité d’azote végétatif des pailles à la récolte croissante et valeurs*.

Type de pois	Conditions de culture	Classement	Quantité d’azote végétatif des pailles à la récolte (kgN ha ⁻¹)
Pois de printemps	Agriculteur	5	64
	Potentiel sélectionneur	3	57
Pois d’hiver hr	Agriculteur	6	71
	Potentiel sélectionneur	4	60
Pois d’hiver Hr	Agriculteur	1	42
	Potentiel sélectionneur	1	42

* les valeurs ne sont qu’indicatives et donc non commentées compte tenu de la faible valeur prédictive d’AFISOL sur cette variable (partie 2)

4. Discussion

4.1. Effet de l'introduction des nouvelles variétés de pois sur le système de culture

Cette analyse par simulation a permis, en prenant en compte l'organisation de l'exploitation agricole, d'étudier l'effet de l'introduction de nouvelles variétés de pois sur le travail de l'agriculteur, les dates de semis du blé et du pois, le rendement du pois et sa variabilité, la structure du sol et la quantité d'azote dans les pailles de pois. Elle a également permis d'évaluer les risques de gel liés à la modification du calendrier des cultures.

Cet ensemble de résultats permet d'asseoir, sur une base plus large que la simple prise en compte de l'amélioration de la productivité, le diagnostic préalable de l'introduction d'un nouveau type variétal.

Nos simulations confirment les observations de Doré (1992) dans l'Est du bassin Parisien et de Boizard et al. (2002) en Picardie : les risques de tassement sont importants lors des semis de pois de printemps et le rendement de cette culture très variable. En effet, pour les cultures de printemps (pois mais aussi tournesol ou betterave), le créneau pour lequel la date de semis ne limite pas le rendement est étroit (Papy et al., 1990) : l'adéquation entre date de semis suffisamment précoce et conditions d'intervention satisfaisantes est donc particulièrement délicate à trouver en cette saison. Sur ce plan donc, l'introduction des nouveaux pois d'hiver devrait représenter un réel intérêt.

Nos simulations montrent que le pois d'hiver hr est semé en moyenne aux environs du 24 novembre, ce qui est dans la gamme des valeurs observées par l'UNIP. Les conditions d'intervention se dégradant au cours de l'automne (Papy et al., 1990), cette date tardive entraîne des risques de tassement lors du semis du pois d'hiver hr. Elle a aussi pour conséquence un risque élevé de gel entre semis et levée est élevé (4 années sur 10). De plus, le blé étant implanté sans labour après le pois, il risque, 7 années sur 10, d'être semé dans un sol tassé (teneur en Δ supérieure à 40%). Or, Meynard (1985) et Doré (1992) ont montré qu'au-delà du seuil de 40% de zones tassées dans le profil cultural, l'alimentation azotée du peuplement de blé pouvait être fortement perturbée. Meynard (com. pers.) estime qu'il peut en résulter une perte de rendement de 5 à 10 quintaux de grain par hectare. Enfin, compte tenu de la règle de décision que nous avons entrée dans le modèle OTELO de ne pas semer de pois après le 1^{er} décembre, nos simulations indiquent que, 2 années sur 10, toutes les surfaces ne peuvent pas être semées. Ces résultats représentent autant de freins à l'insertion dans les exploitations céréalières du Bassin Parisien du pois d'hiver hr.

Un semis de début octobre, comme c'est le cas pour les nouvelles variétés de pois d'hiver Hr, diminue en revanche les risques de tassement sous pois : à l'automne, l'objectif d'obtention d'une bonne qualité de profil est lié à celui de semer tôt (Papy et al., 1990). De plus, l'agriculteur bénéficie d'une plus grande marge de manoeuvre et de souplesse en terme de dates de semis du pois, facteurs importants à prendre en compte pour le développement d'une innovation (Chauveau, 1995). Ces conditions de semis, dans un état structural du sol plus favorable et un début floraison fixé au 20 avril pour la variété virtuelle étudiée, permettent d'éviter les risques de stress de fin de cycle, et les dégâts de gel. Il en résulte un rendement relativement stable, à un niveau proche du « potentiel expérimentateur ». Nous avons vérifié que ces atouts ne s'accompagnaient pas d'une augmentation de la quantité d'azote des pailles, qui pourrait contribuer à des pollutions azotées après récolte. Les principales limites au développement des surfaces en pois, qu'il s'agisse des variétés de type printemps (variabilité du rendement) ou de type hiver hr (sensibilité au froid), pourraient donc surmontées par l'utilisation de ces nouvelles variétés.

Toutefois, l'augmentation de la charge de travail à l'automne, notamment la concurrence entre les deux chantiers de semis, blé et pois, peut obliger l'agriculteur à retarder ses semis de blé, ce qui peut avoir deux grandes catégories de conséquences :

(1) une diminution de l'espérance de rendement (Meynard, 1985). D'après les données de Loyce (1998), un retard moyen de semis de 12 jours, tel que celui que nous avons observé, entraîne une perte de rendement potentiel de 7 q ha⁻¹ environ. Mais le retard de semis n'a pas que des inconvénients : il s'accompagne d'une diminution des risques de verse et de maladies cryptogamiques (Meynard, 1991), ce qui permet de réduire l'usage de produits phytosanitaires. Eviter les semis de blé très précoces (avant le 15 octobre) constitue d'ailleurs l'une des recommandations clé de la production intégrée en blé d'hiver,

(2) une dégradation des conditions de réalisation des opérations de travail du sol, de semis et de traitements phytosanitaires à l'automne, comme l'ont montré Papy et Servettaz (1986) et Willock et al. (1999). Les risques de tassement au moment du semis du blé augmentent (teneur en Δ supérieure à 40% 5 années sur 10). Les rendements de blé peuvent alors être affectés indirectement par l'introduction de pois d'hiver Hr dans la rotation, en fonction des conditions climatiques (Soane et al., 1982). De plus, les résultats d'OTELLO suggèrent que certaines années, l'herbicide post-semis sur céréales pourrait ne pas être réalisé sur toutes les surfaces. Cette analyse confirme bien la nécessité d'évaluer l'introduction d'une innovation variétale à l'échelle du système de culture et non, seulement à celle de la culture étudiée.

L'augmentation de la charge de travail de 50h à l'automne pourrait aussi amener l'agriculteur à semer le pois sans labour, surtout en début du mois d'octobre où le sol est sec et cohérent reste peu facile à travailler. Cette pratique ne serait pas sans risque en cas de sol déjà tassé sous le blé précédant le pois, ce dernier étant très sensible au tassement du sol (Crozat et al., 1991a ; Doré, 1992 ; partie 1). Une analyse plus approfondie des effets de la mise en œuvre d'une telle simplification du travail du sol devrait être entreprise. Dans le même ordre d'idée, l'agriculteur pourrait envisager de semer 50% de ses surfaces dans un type de pois et 50% dans un autre type afin de limiter les contraintes d'organisation du travail, ce qui pourrait aussi être testé par notre enchaînement de modèles. En définitive, la disproportion entre quantité de travail à l'automne et au printemps résultant de l'introduction du pois d'hiver Hr pourrait être un facteur limitant au développement de ce type variétale, notamment dans les exploitations agricoles avec salariés permanents (Papy et Mousset, 1992).

Le maintien d'un équilibre entre cultures d'hiver et de printemps dans une rotation est un moyen efficace pour lutter contre les mauvaises herbes (Munier-Jolain et Collard, 2004). L'adoption du pois d'hiver (hr ou Hr) pourrait rompre cet équilibre, particulièrement dans les exploitations céréalières du type de celle qui a servi de support à notre étude. Toutefois, pour le pois, la difficulté que représente la lutte contre les dicotylédones de printemps, sera moindre avec le pois d'hiver, car, excepté en cas de dégât de gel, la culture couvrira déjà le sol au moment de la levée de ces adventices. L'analyse de la substitution de variétés d'hiver aux variétés de pois de printemps est donc complexe à instruire, d'autant plus qu'elle devra intégrer les risques de toxicité des produits utilisés pour la faune et la flore des champs cultivés et des bordures. De plus, il est également important de raisonner en terme de risque toxique sur la faune et la flore des produits utilisés. Une étude de cette question par modélisation est actuellement en cours (Munier-Jolain et Collard, 2004). Dans le même ordre d'idée et comme évoqué dans la partie 3.1., les effets sur les maladies (anthracnose, bactériose,...) devront être intégrés par la suite (Tivoli et Samson, 1996).

D'autres critères environnementaux sont aussi à évaluer à l'échelle du système de culture, comme le lessivage du nitrate. Du fait de leur date de semis précoce, les variétés d'hiver Hr devraient mieux couvrir le sol avant l'hiver que les variétés hr (et *a fortiori* que les variétés de printemps). Toutefois leur durée de cycle plus longue et de ce fait, la plus grande absorption d'azote, pourrait contribuer à modifier le bilan azoté (partie 1). Même si un semis plus précoce, avec un début floraison le 20 avril, ne semble pas augmenter les quantités d'azote des pailles par rapport aux types de pois classiques, la qualité de ces pailles (en particulier leur rapport C :N) pourrait avoir une influence sur la vitesse de minéralisation de l'azote et donc sur l'équilibre entre utilisation par la culture suivante et lessivage de nitrate pendant l'hiver suivant la récolte (Jensen, 1986). Des études complémentaires sur ce sujet seraient donc nécessaires.

4.2. Atouts et limites de la méthode

L'objectif initial était de mettre en place une méthodologie d'analyse *ex ante* des effets de l'introduction de nouvelles variétés de pois d'hiver sur la production et l'environnement au sein des exploitations agricoles en prenant en compte les contraintes d'organisation du travail.

La première étape a donc été la détermination et la quantification des règles de décision de l'agriculteur afin de les entrer dans OTELO. Un certain nombre de raisons, conséquences du mode de représentation de l'exploitation et des limites d'OTELO, peuvent expliquer les différences entre dates de début et de fin et durée de chantiers.

Une exploitation agricole est un système complexe à dimension spatiale et temporelle (Osty, 1978) : son fonctionnement est fait d'équilibres imbriqués, toujours précaires et évolutifs. Une exploitation a des parcelles plus ou moins homogènes (en terme de qualité des sols, profondeur) ce qui peut induire des techniques de culture différentes adaptées aux contraintes particulières des parcelles. De plus, d'une année sur l'autre, en fonction de l'environnement socio-économique et de son expérience, l'exploitant peut faire évoluer son système de production et adapter ses règles de décision (Osty, 1978). Par exemple, en 2002, quelques hectares de féverole d'hiver ont été introduits dans l'assolement, ce qui a retardé la date de début de labour d'hiver. Une modification des variétés d'orge cultivées entre 1999 (principale variété : Estérel) et 2001 (principale variété : Vanessa) a fait évoluer la date optimale de début de semis d'orge. Ces facteurs n'ont pas été pris en compte dans les simulations et peuvent contribuer à expliquer les différences entre dates observées et simulées.

Pour simplifier le système modélisé, certaines actions n'ont pas été prises en compte. Les livraisons de récoltes et les travaux d'entretien du matériel à l'automne, par exemple, sont difficilement modélisables par OTELO dans la mesure où les conditions de réalisations de ces travaux sont indépendantes des conditions climatiques et ne sont pas à dates « fixes » d'une année sur l'autre. Les semis d'orge et d'engrais au printemps n'ont pas été considérés car, d'après l'agriculteur, ils n'étaient pas en concurrence avec les semis de pois de printemps. Toutefois, on ne peut complètement exclure que ces actions aient pu avoir des conséquences sur les écarts entre dates observées et simulées par OTELO.

Une étape clé est la formalisation des règles du modèle d'action de l'agriculteur qui, dans la quasi-totalité des cas, ne sont pas explicites (Papy et Mousset, 1992 ; Aubry, 2000) et leur traduction à l'aide d'indicateurs climatiques. Ces règles de décisions et d'intervention résultent de l'intégration de trois types de savoir : le savoir-faire, le savoir-comprendre et le savoir de stratégie (Aubry, 2000). Comment, par exemple, intégrer dans OTELO une règle basée sur l'appréciation de la couleur de la terre ? le principe proposé par les concepteurs d'OTELO est de rechercher des variables climatiques

qui, simples ou combinées, sont corrélées aux dates d'intervention. Quand une opération dépend de l'état physique du sol et plus spécifiquement de son humidité (Cerf et al., 1994), la détermination de seuil d'intervention climatique reste cependant délicate. C'est par exemple le cas quant à la possibilité de labourer qui d'après Reboul (1969) est une fonction complexe des facteurs pédo-climatiques et d'abord de l'humidité du sol. La difficulté est accrue par le fait que les agriculteurs prennent en compte dans leurs décisions non seulement le climat passé et ses conséquences sur l'état du sol, mais aussi les prévisions météorologiques disponibles (Sebillotte, 1986). Ainsi, grâce aux prévisions météo à 3-4 jours, l'agriculteur décide s'il peut ou non lancer un chantier (pour des raisons d'organisation du travail, ou s'il préfère ne pas s'interrompre) (Papy et Servettaz, 1986), comme, par exemple, anticiper le labour, opération dont la vitesse est limitante par rapport au semis. De plus, certains écarts par rapport au modèle prévisionnel peuvent exister du fait d'imprévus, comme les pannes de tracteurs.

Toutefois, malgré ces différentes simplifications, l'utilisation d'un modèle de règles de décision permet la prise en compte des relations complexes entre les différentes cultures et de déterminer leurs conséquences dans le temps en terme de risque (notamment climatique) et de stabilité du système. OTELO permet en particulier d'intégrer le fait qu'en cours de campagne, l'agriculteur adapte ses règles d'intervention à l'estimation qu'il fait de l'évolution de certains risques : il arbitre entre le risque d'un retard et celui d'un travail dans de mauvaises conditions (Cerf et al., 1994) et internalise les risques de ses plans d'action et des règles d'adaptation aux circonstances (Papy et al., 1990). En définitive, l'évaluation du modèle sur le calendrier de travail des années récentes (1999 à 2003) a permis de considérer comme relativement satisfaisante l'ensemble des règles de décisions « reconstituées » auquel nous sommes parvenus.

4.2.2. Evolution du système de production et conséquences sur les règles de décision

L'utilisation couplée des modèles OTELO, « bilan hydrique », SISOL et AFISOL a permis l'intégration de la notion de risque afférent à l'introduction d'une nouvelle technique au sein du système de production, ce qui est un élément clé quant à l'anticipation sur la possibilité de sa diffusion.

Afin d'augmenter les surfaces cultivées en pois, l'assolement et le système de production ont été sensiblement modifiés, en faisant l'hypothèse qu'il n'y avait pas d'effet sur les règles de décision. Ces règles de décision sont issues de différents niveaux de connaissances de l'agriculteur (Aubry, 2000). L'agriculteur n'ayant pas de référence sur l'innovation testée, c'est l'utilisateur d'OTELO qui est donc obligé de proposer certaines règles. Notamment, l'hypothèse a été faite que l'agriculteur sèmerait indifféremment les pois d'hiver Hr et le blé, ce qui suppose que ces deux cultures présentent le même intérêt pour lui et que son objectif général est de semer toutes ses cultures d'automne le plus tôt possible. Dans la réalité, comme le souligne Fleury et Mollard (1976), la dimension sociale est à considérer dans une politique d'introduction d'une nouvelle culture dans une nouvelle région : même si la méthodologie définie ci-dessus met en évidence que l'introduction du pois d'hiver Hr est agronomiquement possible et environnementalement acceptable dans une région donnée pour un type d'exploitation agricole, l'appréhension qu'aura l'agriculteur des gains et des risques liés à cette innovation variétale aura un rôle important dans son introduction effective au sein de ces exploitations et aura des conséquences sur la gestion des priorités entre cultures. Le risque pour l'agronome est donc de caricaturer le contexte de décision et de réduire la complexité de la réalité (Meynard et al., 2001). Une analyse de sensibilité des sorties du couplage à une modification de règles de décision et de priorités entre chantiers devrait donc être conduite pour s'assurer de la robustesse des conclusions.

4.2.3. Estimation des risques de tassement et de leurs conséquences sur la culture de pois

L'utilisation couplée de SISOL et d'AFISOL permet de prendre en compte les effets des tassements (Tardieu, 1990) dans l'évolution des variétés. En effet, comme mis en évidence dans la partie 1, le fait que l'enracinement soit défavorable n'entraîne pas spécifiquement une chute de rendement. Celle-ci n'aura lieu que si des conditions climatiques défavorables persistent pendant une période suffisamment longue pour que l'une des composantes du rendement soit affectée, et sans compensation ultérieure possible.

Les résultats des travaux de recherche, synthétisés dans SISOL, ont permis de simuler les effets des différentes opérations sur la structure du sol en fonction des humidités le jour de leur réalisation. Ce modèle repose sur l'hypothèse que l'état hydrique des couches du sol affectées par les contraintes mécaniques est une caractéristique pertinente des conditions d'intervention (Cerf et al., 1994). Une qualité prédictive satisfaisante de l'humidité du sol est donc indispensable. De plus, SISOL prend peu ou pas en compte l'effet de régénération de la structure par les cycles gel-dégel en hiver, l'effet des vers de terre ou des racines (Dexter, 1991). La vitesse de régénération de la structure, c'est-à-dire de diminution de la teneur en mottes Δ , a pu être sous-estimée.

SISOL a été mis au point et validé pour des sols de type limon-argileux. L'extrapolation de la méthode à d'autres types de sol et techniques (comme le non-labour) nécessite avant tout la mise au point de nouvelles courbes de compactage : en effet, la sensibilité d'un sol au tassement, en plus de la teneur en eau du sol, dépend de sa teneur en argile et de sa teneur en matière organique. Le domaine de validité du/des modèle(s) (défini par ses hypothèses de construction et son évaluation) est donc important car il permet de cerner celui des nouveaux systèmes de culture (Meynard et al., 2001).

4.2.4. Couplage de modèles

L'une des difficultés de cette méthode est le choix des variables de sortie (cas pour OTELO). L'utilisation de la médiane des surfaces réalisées a été un bon compromis pour cerner la variabilité des dates d'intervention du fait des aléas climatiques et des contraintes d'organisation du travail sans pour autant favoriser un type de pois. En effet, la date de début de semis s'est montrée peu variable car essentiellement dépendante des conditions climatiques. De plus, les conditions d'intervention sont souvent plus favorables, en terme d'effet sur la structure du sol, en début de campagne à l'automne et inversement au printemps. Si la date de début d'intervention avait été choisie, les conditions auraient été systématiquement plus favorables pour les pois d'hiver hr et Hr que pour le pois de printemps et inversement pour la date de fin d'opération. De plus, le peu d'effet de la variable de sortie d'OTELLO (médiane ou 80% des surfaces réalisées) sur les conclusions par rapport au pois d'hiver Hr valide notre choix (annexe 25).

Une autre difficulté est l'adaptation des variables de sortie du modèle précédent aux variables d'entrée du modèle suivant. L'utilisation et la mise au point d'un modèle de bilan hydrique ont donc été nécessaires afin de pouvoir coupler OTELO et SISOL. De plus, ceci n'est pas sans conséquence sur le choix du formalisme de modélisation lorsqu'un modèle est en cours d'élaboration : dès la conception du modèle AFISOL, l'objectif a été de mettre en relation la teneur en mottes Δ de la couche labourée et les effets sur le fonctionnement de la culture (partie 2).

Enfin, chaque modèle peut être évalué de façon individuelle, mais aucune évaluation de l'ensemble du couplage n'est possible, ce qui s'explique par le caractère prospectif de cette méthode. De ce fait, la diffusion des résultats obtenus doit bien rappeler les hypothèses qui y sont liées (Barré et al., 2005).

Une telle démarche prospective permet d'examiner les futurs possibles en présentant leurs contenus, les enjeux possibles, les risques éventuels et les conditions pour y parvenir, en prenant en compte l'ensemble des variables susceptibles d'avoir une influence sur la question étudiée. Les jeux de variables utilisés, organisés en modèles quantitatifs ou qualitatifs, forment une maquette reproduisant sous forme simplifiée certaines caractéristiques de l'objet complexe étudié (Barré et al., 2005). Les résultats obtenus sont avant tout un appui à la réflexion et visent à faciliter le dialogue et les collaborations entre différentes disciplines (généticiens, agronomes, écophysiologistes) et acteurs (sélectionneurs, agriculteurs, chercheurs, agents du développement).

4.3. Perspectives

Dans l'étude présentée, seule la concurrence entre semis de céréales et de pois d'hiver Hr a été analysée. D'autres chantiers concurrents pourraient par la suite être étudiés comme, par exemple des récoltes de pommes de terre, de tournesol, maïs et betteraves en fonction des régions et donc modification des règles de décision (Papy et al., 1990).

Une analyse de sensibilité des sorties du couplage de modèles aux entrées d'OTÉLO (main d'œuvre, matériel, surfaces cultivées, règles de décision) pourrait être envisagée afin de définir plus précisément pour un type d'exploitation la marge de manœuvre de l'agriculteur et l'ensemble des solutions possibles quant à l'introduction de ces nouvelles de pois d'hiver dans son assolement et des conséquences sur le système de production. Ce genre de travail introduit alors la notion de marge tactique et d'estimation de pertes dues à des retards de dates ou de réalisation en dehors des conditions choisies, données très demandées par les économistes (Papy et Servettaz, 1986). D'ailleurs, il pourrait être intéressant, en essayant d'intégrer l'ensemble des notions développées ci-dessus (gestion des mauvaises herbes, de l'azote, des maladies), d'évaluer l'impact économique à l'échelle de la culture et du système de culture.

Il est clair qu'il serait nécessaire d'explorer maintenant une plus grande variété d'exploitations et de régions de production potentielles du pois d'hiver. L'élargissement de l'échantillon de situations pourrait avoir deux types de retombées :

- permettre de cerner les types d'exploitations agricoles pour lesquels l'introduction du pois d'hiver Hr présenterait un intérêt par rapport aux variétés classiques et de déterminer la surface maximale de semis compte tenu des contraintes d'organisation du travail et du système de production,
- alimenter la recherche d'idéotypes de pois d'hiver, telle que développée dans la partie 3.1., en intégrant les contraintes portant sur les dates de semis au sein des exploitations agricoles.

5. Conclusion : retour sur les questions initiales

L'utilisation de ce couplage de modèles a permis de répondre à nos trois questions initiales :

Question 1 :

Quels types variétaux sont intéressants à cultiver dans une exploitation agricole, prenant en compte des contraintes d'organisation du travail à l'automne ?

Dans l'exploitation agricole, malgré un calendrier de travail déjà chargé à l'automne, les nouvelles variétés de pois d'hiver Hr présentent de nombreux avantages agronomiques par rapport aux types printemps et hiver hr commercialisés.

Question 2 :
Quel intérêt de choisir un type variétal précis, étant donné les contraintes d'organisation du travail, les aléas climatiques, les conditions de semis ?

L'intérêt de choisir un type variétal précis est fonction des objectifs de l'agriculteur en terme d'organisation du travail et de sa relation au risque. Les effets de l'intégration d'une telle innovation variétale doivent être analysés non seulement à l'échelle de la parcelle mais aussi du système de production de par la concurrence entre chantiers. Les trois risques identifiés ont été de ne pas réaliser tous les chantiers à l'automne, de semer en conditions tassées et de ne pas atteindre le rendement potentiel en pois (Tableau III.14). Dans l'exploitation étudiée, c'est le pois d'hiver Hr qui permet le mieux de limiter l'ensemble des risques. Nous proposons une organisation de quatre modèles couplés permettant d'analyser cette question dans d'autres types d'exploitation.

Tableau III.14. Risques (en nombre d'années sur 10) associés au type variétal de pois dans un système de production pour une exploitation agricole.

	Risque de ne pas réaliser tous les chantiers à l'automne	Risque de tasser au moment des semis de blé (en moyenne blé de colza et de pois)*	Risque de tasser au moment des semis de pois*	Risque de perte de rendement de pois **
Pois de printemps	-	3.5 années/10	7 années/10	6 années/10
Pois d'hiver hr	2 années/10 semis de pois	5.5 années/10	7.5 années/10	8 années/10
Pois d'hiver Hr	Eventuellement herbicide sur céréales	5 années/10	4 années/10	1.5 années/10

* seuil de 40%

** seuil de 5% et avec intégration du risque de gel

Question 3 :
Quel effet a la période de semis du pois sur l'environnement et la production à l'échelle du système de culture ?

A l'échelle du système de culture, la période de semis a un effet sur la structure du sol et sur le bilan azoté (via la structure, la quantité d'azote des pailles laissée par le pois et la présence ou non de culture en hiver). Par l'effet du type de pois sur la structure de sol, les rendements de pois et de blé peuvent être modifiés. La structure du sol a un effet sur l'accumulation d'azote d'une culture de pois et de blé. De ce fait, la teneur en protéines des graines de ces deux cultures pourrait aussi être affectée.

**DISCUSSION
GENERALE
&
PERSPECTIVES**

Les recherches sur l'utilisation de modèles pour l'évaluation *ex ante* des innovations variétales sont actuellement en plein essor. Sur le cas concret des nouvelles variétés de pois d'hiver très réactives à la photopériodique, notre travail contribue à faire avancer les méthodes d'approche, en particulier en élargissant la liste des critères utilisés et les échelles d'étude (spatiale et temporelle).

Nous organiserons la discussion autour de ces deux avancées, abordant successivement :

- (1) la prise en compte de critères innovants dans l'évaluation variétale : stabilité du rendement, conséquences sur la quantité d'azote laissée par la culture de pois, impact sur la structure du sol. L'évaluation sur ces critères a été rendue possible grâce à l'articulation entre expérimentation et modélisation, débouchant en particulier sur l'intégration des effets de l'état structural du sol sur les fonctionnements aérien et racinaire d'une culture de pois au sein d'un modèle de culture,
- (2) la mise au point d'une démarche pour aider les sélectionneurs à prendre en compte, aussi bien dans la construction des idéotypes qu'en cours de sélection, les effets de l'insertion de leurs variétés dans les systèmes de culture et de production.

1. Vers la prise en compte de critères d'évaluation innovants dans l'évaluation de géotypes

Notre travail a porté sur l'évaluation de variétés qui ne sont pas encore commercialisées. Notre objectif initial était d'analyser l'intérêt agronomique et environnemental de variétés de pois d'hiver Hr en cours de sélection, selon leurs caractéristiques propres et les conditions de leur insertion dans les exploitations agricoles. Nous sommes allés plus loin en proposant des idéotypes associant ce caractère Hr à d'autres caractères (précocité, caractère indéterminé). C'est sur ce matériel végétal virtuel qu'ont été appréciés la stabilité du rendement et les impacts environnementaux potentiels.

1.1. Stabilité du rendement

Un idéotype de pois d'hiver Hr avec un début floraison le 20 avril ou le 10 mai et un petit poids de graines (donc une architecture de plante indéterminée) permet de répondre à l'objectif de stabilisation du rendement dans des lieux à climat contrasté par échappement aux périodes de stress (allongement de la durée de résistance au froid et avancement de la période de sensibilité de la culture aux stress hydriques et thermiques de fin de cycle). La longue durée de floraison et donc d'élaboration des graines permet, en revanche, de bénéficier de périodes de rayonnement plus élevé, favorable au nombre de graines produit.

1.1.1. Echappement aux risques de gel

Comme le soulignent Etévé et Derieux (1982), pour la sélection de nouvelles variétés capables de supporter régulièrement l'hiver, il est important de prendre en compte à la fois la résistance au froid, la durée de la phase végétative et les caractéristiques climatiques des régions où l'on veut réaliser cette culture, ce qui est possible par l'utilisation de modèles de culture.

La faculté du pois à passer l'hiver est liée à son maintien à l'état végétatif (Etévé et Derieux, 1982). Les pois d'hiver hr ont une durée de résistance au froid limitée (initiation florale avant la fin de l'hiver), ce qui oblige à les semer pendant une période relativement courte. Les pois d'hiver Hr ont une initiation florale très réactive à la photopériode (pour les variétés sélectionnées jusqu'à présent l'initiation florale a lieu à 13h de durée de jour, soit fin mars-début début avril), ce qui devrait

permettre une plus grande souplesse en terme de date de semis. Nos résultats ont cependant mis en évidence que, pour les nouvelles variétés de pois d'hiver Hr, les risques de dégâts de gel pouvaient être importants entre semis et levée pour un semis le 1^{er} novembre dans certaines régions du nord de la France. Toutefois, le formalisme très simple utilisé dans le modèle pour simuler le risque de gel a pu contribuer à sa surestimation, puisqu'aucune phase d'endurcissement de la plante n'est pris en compte, contrairement aux connaissances disponibles sur ce processus (Lejeune-Hénaut et al., 2004). Le risque de semis tardif, pour ces variétés, est *a priori* fonction de la concurrence entre chantiers à cette période et de l'ordre de priorité qu'accordera l'agriculteur à cette culture : ses intérêts agronomiques et économiques auront donc une forte influence sur ce choix. Il serait cependant nécessaire d'affiner la modélisation de la sensibilité au gel des variétés de pois, en particulier la prise en compte du port en rosette et du taux de ramification plus important du pois d'hiver Hr (Lejeune-Hénaut, com. pers.), qui permettent de limiter les effets de dégât de gel sur la culture, ce qui pourrait amener à nuancer les résultats de notre analyse.

Le pois est également très sensible au froid au-delà du stade initiation florale. L'un des objectifs de la sélection des variétés de pois d'hiver est de retarder le plus possible ce stade de façon à échapper au gel même dans des régions à climat plus froid comme le Nord de la France (Lejeune-Hénaut et al., 1999). Les principaux gènes qui contrôlent le passage de l'état végétatif à l'état reproducteur ont été identifiés (Lejeune-Hénaut et al., 2004). D'après Murfet (1973), la réponse quantitative de l'initiation florale d'une variété à la durée du jour est principalement sous le contrôle du gène Hr. Le gène Lf détermine, quant à lui, la précocité à début floraison, en agissant sur la durée entre initiation florale et début floraison. Actuellement, les sélectionneurs ont réussi à mettre au point des variétés Hr présentant une durée entre initiation florale et début floraison de l'ordre de 430 dj, ce qui, pour une initiation florale à 13h de durée de jour (fin mars-début avril), conduit à un début floraison le 10 mai. A ces dates, comme le montrent nos résultats, les risques de gel sont nuls, même dans des régions septentrionales (Mons), ce qui est cohérent avec les résultats de Lejeune-Hénaut et al. (1999). Nous montrons que, si les sélectionneurs parvenaient à diminuer la durée entre initiation florale et début floraison jusqu'à 350 dj (initiation florale début mars pour une durée du jour de 11h et un début floraison le 20 avril), les risques de pertes de rendement par dégât de gel resteraient faibles, même dans le nord de la France.

1.1.2. Echappement aux risques de stress hydrique et thermique de fin de cycle

L'intérêt de réduire la durée entre initiation florale et début floraison est d'échapper aux risques de stress hydriques et thermiques de fin de cycle, notamment dans le sud de la France (représenté par la station météorologique de Toulouse dans nos simulations). De façon générale, un début floraison le 10 mai ou le 20 avril permet l'obtention d'un meilleur niveau de rendement et ce, de façon plus stable qu'avec le pois de printemps et le pois d'hiver hr, par allongement du cycle de la culture et échappement aux stress abiotiques en cours de cycle.

Dans la partie 3.2, nos simulations ont été réalisées avec un idéotype de pois fleurissant le 20 avril. Comme nous l'avons vu précédemment, les variétés de pois d'hiver Hr en cours de sélection ont actuellement un début floraison le 10 mai et les sélectionneurs ont des difficultés à obtenir du matériel végétal à début floraison plus précoce. Nous avons donc également réalisé les simulations de la partie 3.2 avec un idéotype de pois fleurissant le 10 mai (état actuel des variétés de pois Hr actuellement sélectionnées), afin de déterminer l'intérêt des sélectionneurs à essayer d'avancer encore plus la date de début floraison de ces nouvelles variétés. Nos résultats (Figure D.1, Tableau D.1) ont mis en évidence que les conclusions sur la comparaison du niveau et de la stabilité du rendement des trois

types de pois n'étaient alors pas modifiées, même en considérant un pois d'hiver Hr avec un début floraison le 10 mai au lieu du 20 avril.

Une variété performante à l'échelle nationale devrait donc présenter une durée initiation florale début floraison courte et un début floraison précoce, confirmant les résultats expérimentaux de Bourion et al. (2002a), ce qui peut être obtenu soit en augmentant la vitesse d'initiation des nœuds, soit en diminuant le numéro du premier nœud florifère (Ney et Duc, 1996).

Nos résultats ont montré que les variétés indéterminées et à petites graines avaient un rendement plus stable que les variétés déterminées et à grosses graines. Or, une croissance de type indéterminé est aujourd'hui plutôt considérée par les sélectionneurs comme une source d'instabilité du rendement (Carrouée, 1996), ce qui est cohérent avec une sélection des pois de printemps orientée principalement vers des variétés de type plutôt déterminée. Plusieurs arguments sont invoqués : d'une part, la compensation des effets de stress de fin de cycle sur le nombre de graines ne serait pas toujours permise par ce type de variété ; d'autre part, la durée d'élaboration du rendement plus longue rendrait ce type de variété plus susceptible d'être soumis à des stress de fin de cycle (Dumoulin et al., 1994) : les variétés à port indéterminé risquent de verser plus et plus tôt, donc de perturber davantage les conditions de récolte ; elles induiraient un micro-climat plus favorable au développement des maladies de fin de cycle ; enfin, l'étalement important des stades des différentes graines de la plante serait préjudiciable à de bonnes conditions de récolte. Les risques de fin de cycle peuvent en grande partie être maîtrisés par un avancement de la date de début floraison. De plus, il apparaît que la sélection de variétés Hr à plus grosses graines, et donc à port plus déterminé, est difficile et coûteuse même si techniquement possible (faible pourcentage de réussite) (S. Terrier, com. pers.). Toutefois, les poids de graines utilisés dans cette étude étaient extrêmes afin de couvrir la gamme à la fois des pois d'hiver hr et des pois de printemps. Il serait donc intéressant d'utiliser la démarche présentée dans la partie 3.1 pour un poids de graines intermédiaire, par exemple 0,200 g gr⁻¹, plus proche de la moyenne des variétés de pois d'hiver hr et Hr.

Figure D.1. Perte de rendement pour un idéotype de pois d'hiver Hr à début floraison le 10 mai avec prise en compte (a) ou non (b) des risques de gel

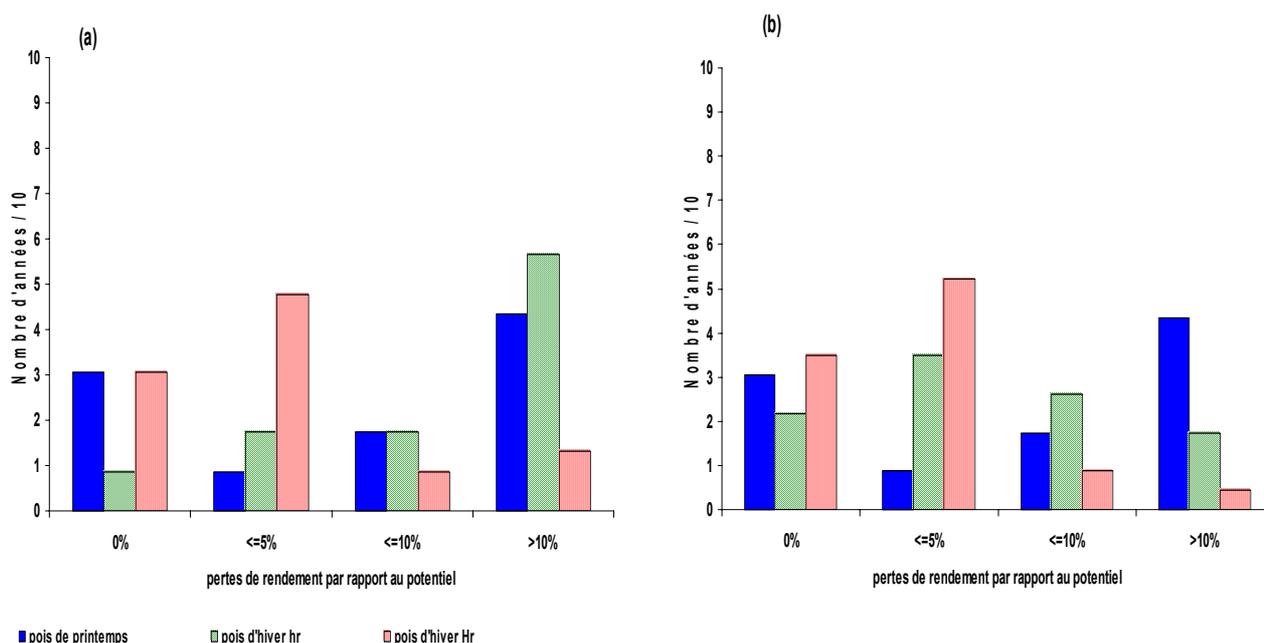


Tableau D.1. Coefficients de variation (%) du rendement pour un idéotype de pois d’hiver Hr à début floraison le 10 mai avec prise en compte ou non du risque de gel.

Intégration du risque de gel	Pois de printemps		Pois d’hiver hr		Pois d’hiver Hr	
	potentiel	agriculteur	potentiel	agriculteur	potentiel	agriculteur
Avec	10	19	7	92	12	35
Sans	10	19	7	12	11	13

1.1.3. Interactions avec les risques de bio-agresseurs

Un point faible notable de notre analyse de la stabilité des variétés Hr est qu’elle ne prend pas en compte les effets des bio-agresseurs (maladies, ravageurs et adventices). Or, l’architecture de la plante a des conséquences sur sa sensibilité aux maladies et sur leur nuisibilité (Le May, 2002) : le plus grand pouvoir de ramification des variétés de pois d’hiver Hr peut contribuer à l’entretien d’un micro-climat humide favorable au développement de l’antracnose. Par ailleurs, une durée de floraison longue augmente les risques d’antracnose (Tivoli et Samson, 1996). Toutefois, il se pourrait que les nouvelles variétés Hr présentent une vitesse d’émission de nœuds fructifères supérieure à la vitesse de progression de la maladie le long de la tige (Le May, INRA de Rennes, travail en cours). L’avancement de la date de début floraison pourrait permettre de limiter les risques de pertes de rendement liées à des ravageurs comme les pucerons (pertes de rendement jusqu’à 30 q ha⁻¹), les cécidomyies (pertes de rendement jusqu’à 20 q ha⁻¹, facteur limitant au développement de la culture dans le nord de la France), les tordeuses et les bruches (dépréciation de la qualité des graines), en décalant les phases sensibles de la culture par rapport aux périodes de présence de ces ravageurs.

Pour ce qui concerne les adventices, le risque d’un semis de pois à l’automne est la forte compétition des repousses de céréales (Froud-Williams, 1988), pouvant limiter le rendement potentiel de la culture et contribuant au salissement des récoltes et au maintien de graines d’adventices dans la parcelle. Toutefois, si les nouvelles variétés ont un pouvoir de couverture du sol rapide, ce risque pourrait être limité. Enfin, un des problèmes techniques dans la conduite du pois de printemps est la gestion des dicotylédones de printemps, évitée par un semis d’automne qui aura déjà couvert tout le sol au moment du développement de ces mauvaises herbes (Munier-Jolain et Collard, 2004). On voit que la prise en compte de l’ensemble des caractères variétaux jouant un rôle dans la sensibilité de la culture aux bio-agresseurs nécessitera un travail complémentaire de modélisation et d’expérimentation très important.

1.2. Environnement

1.2.1. Maîtrise des pollutions azotées

L’absence d’apport d’engrais azoté sur la culture de pois est un avantage environnemental non négligeable par rapport aux autres cultures. Toutefois, le risque associé aux variétés de pois de printemps est une perte d’azote durant l’hiver qui précède le semis et un enracinement superficiel ne permettant pas une bonne valorisation de l’azote des horizons profonds du sol (Munier-Jolain et Carrouée, 2003). Nous avons observé que, quels que soient le type de pois et la période de semis, la zone de sol explorée par les racines est comparable (profondeur d’environ 1 m, partie 1). En sortie hiver, les pois semés à l’automne avaient déjà une profondeur d’enracinement d’environ 60 cm (partie

1). Toutefois, la faible croissance de la culture en hiver ne peut que limiter très partiellement le lessivage de l'azote pendant l'hiver (environ 10 kgN ha⁻¹ absorbés en fin d'hiver).

Trois pools d'azote issus du pois, représentant des sources d'azote pour la culture suivante et le lessivage hivernal, sont identifiables : les pailles, le système racinaire (racines et nodules) et la rhizodéposition au cours du cycle. Pour le pois de printemps, les quantités d'azote des pailles sont relativement élevées (moyenne de 70 kgN ha⁻¹, Jensen, 1989 et partie 1), celles du système racinaire ont été évaluées à environ 30 à 35 kgN ha⁻¹ (Jensen, 1989), et la rhizodéposition à 17 kgN ha⁻¹ (Jensen, 1996). Par un cycle plus long, le pois d'hiver de type hr augmente les quantités d'azote des trois pools (parties 1 et 2). Pour les nouveaux pois d'hiver Hr, comme pour le pois d'hiver hr, les pools d'azote racinaire et rhizodéposé seraient plus importants que pour le pois de printemps sans augmentation de la quantité d'azote des pailles par rapport à un pois de printemps pour un idéotype fleurissant le 20 avril (partie3.1).

En définitive, le pois d'hiver Hr n'a aucun avantage sur le pois de printemps d'un point de vue de la maîtrise des pollutions azotées, mais ne semble avoir également aucun inconvénient.

1.2.2. Structure du sol

Le pois est connu pour son effet positif sur la structure du sol, facteur contribuant à expliquer l'augmentation du rendement de blé suivant (Munier-Jolain et Carrouée, 2003). Toutefois, le pois de printemps est parfois semé en conditions du sol trop humides conduisant à un état structural souvent tassé au moment du semis (Doré, 1992), ce qui a été confirmé par nos simulations.

L'état structural a des conséquences sur la nutrition minérale et hydrique de la culture. Ainsi, la dégradation de l'état structural a une influence sur la croissance et le fonctionnement d'une culture de pois (partie 1). Les résultats de la partie 3.2 ont également mis en évidence les conséquences d'un état structural tassé sous pois sur les cultures suivantes et ce, jusqu'à régénération de la porosité de ce dernier. L'état structural aura donc un effet sur le bilan azoté à l'échelle de la rotation par l'intermédiaire de l'accumulation d'azote par les cultures, l'efficacité de l'apport d'engrais azoté (Doré, 1992), et la minéralisation de l'azote du sol.

Nos résultats ont confirmé que la structure du sol était très sensible aux activités humaines et à l'introduction d'une nouvelle technique dans un système de production (Kay, 1990). Le type de pois cultivé dans la rotation modifie non seulement la structure du sol au niveau de la parcelle mais aussi à l'échelle de l'exploitation agricole. Ce résultat montre l'importance d'une prise en compte spatiale (exploitation agricole) et temporelle (effet précédent) de l'insertion d'une innovation variétale au sein d'un système de production.

En effet, pour une année donnée, les blés, semés à la même période que le pois d'hiver Hr, le sont parfois dans des conditions d'humidité moins favorables qu'en absence de semis de pois d'hiver Hr du fait de concurrence entre chantiers, avec des conséquences éventuelles sur la structure du sol et le rendement. Les pois d'hiver Hr sont, quant à eux, semés dans des conditions d'humidité plus favorables que les variétés de pois classiques. Les priorités entre cultures en période de grande concurrence entre chantiers dépendent de la perception qu'ont les agriculteurs des pertes susceptibles d'être créées par des retards d'intervention (Papy et al., 1990). Nous avons fait l'hypothèse que l'agriculteur semait indifféremment le pois d'hiver Hr et le blé. Toutefois, d'autres jeux de règles de décision pourraient être testés afin de déterminer leur influence sur l'état structural et le rendement à l'échelle du système de culture et d'identifier la marge de manœuvre de l'agriculteur.

Les blés qui suivent un pois d'hiver Hr sont semés sur des sols dont la structure est généralement bonne, grâce aux bonnes conditions d'implantation du pois. Ceci est d'autant plus

important que ces blés sont souvent semés tôt, et donc sans labour¹³. Pour les calculs, nous avons fait l'hypothèse que, quel que soit l'état structural après pois, l'agriculteur appliquait le même itinéraire technique pour le blé, ce qui peut être contestable. En effet, face par exemple à une compaction du sol trop importante lors d'une culture, il peut être amené à réaliser une technique corrective de façon à assurer son objectif de production lors de la culture suivante (Soane et al., 1982). L'étude sur l'ensemble de la rotation a permis de mettre en évidence une absence d'effet à long terme d'un type de pois, mais plutôt l'existence d'un effet moyen avec, notamment, un état structural en moyenne plus tassé pour les variétés commerciales que pour les nouvelles variétés d'hiver Hr. Les nouvelles variétés de pois d'hiver Hr étant semées dès début octobre, l'agriculteur pourrait envisager de ne pas labourer. Il serait donc intéressant de déterminer les effets d'une telle pratique sur le système de culture.

La structure du sol a également une influence sur certaines maladies (Chauplannaz et al., 2004) ou ravageurs, la dynamique de l'eau et les processus de dénitrification, avec des conséquences à la fois environnementales (Kay, 1990) et économiques (Soane et al., 1982 ; Gunjal et Raghavan, 1986 ; Lavoie et al., 1991) ; ces conséquences n'ont pas été prises en compte dans notre travail.

1.2.3. Economie d'eau

Dans les années à venir, les contraintes climatiques pourraient devenir de plus en plus importantes. Compte tenu de la durée d'un cycle de sélection, il est donc nécessaire d'anticiper ce risque dès la détermination d'idéotypes.

Les résultats expérimentaux de la partie 1 et les simulations de la partie 3 ont confirmé la meilleure adéquation entre disponibilité en eau et besoins de la culture, permise par un semis d'automne. Notamment, quelle que soit la profondeur de sol pour Chartres (et donc la réserve utile), en absence d'irrigation, un idéotype Hr avec un début floraison le 20 avril présente un rendement plus stable et plus élevé que les pois de type printemps et hiver (avec prise en compte ou non des risques de gel). Ainsi, grâce à ces nouvelles variétés, la zone de culture du pois pourrait être élargie à des sols à réserve hydrique moyenne et drainant bien l'hiver (Chaillet, 2000), sans nécessiter d'irrigation complémentaire à l'automne.

2. Mise au point d'une démarche pour aider les sélectionneurs à prendre en compte l'insertion de leurs variétés dans les systèmes de culture et de production

La production de démarches et d'outils d'aide à la conception d'innovations est l'un des finalités de l'agronomie. L'originalité des résultats obtenus sur le pois d'hiver grâce à l'utilisation combinée de 4 modèles complémentaires nous conduit à proposer une démarche nouvelle visant à anticiper le comportement et les impacts d'innovations variétales en conditions agricoles.

2.1. Pour une meilleure prise en compte par les sélectionneurs de la diversité d'usage des variétés par les agriculteurs

Les suggestions de modifications de pratiques agricoles (comme une modification de date de semis dans le cas présent), issues de travaux de recherche, sont souvent perçues comme ne prenant pas suffisamment en compte les contraintes de l'exploitation agricole (Osty, 1978 ; Robertson et al.,

¹³ Le sol est souvent sec et cohérent lors des premiers semis de blé en octobre, ce qui rend le labour mécaniquement difficile.

2000). L'intégration des préoccupations des utilisateurs (agriculteurs) aux projets de sélection relève du besoin de mieux adapter l'offre des sélectionneurs aux conditions d'utilisant prenant en compte les contraintes des utilisateurs (Lançon, com. pers.). Il était donc fondamental de s'assurer que le projet variétal initial (semis au mois d'octobre, initiation florale le plus tard possible et durée entre initiation florale et début floraison le plus réduit possible) répondait aux besoins des acteurs et à leurs capacités techniques. Ceci est d'autant plus important dans le cas de modification majeure du système de culture (comme la période de semis).

Notre démarche peut être vue comme intermédiaire entre un schéma de sélection « classique » et un schéma de sélection dit « participatif¹⁴ ». Dans la démarche que nous avons adoptée, le point de vue de l'agriculteur est pris en compte par l'intermédiaire de la minimisation des risques les plus préjudiciables à l'agriculteur et de l'utilisation d'un modèle de règles de décision.

L'intégration des contraintes d'organisation du travail a permis de mettre en évidence la diversité des problèmes techniques directs (sur la culture de pois) et indirects (sur l'ensemble du système de culture) que l'agriculteur aura à résoudre lors de l'introduction de ces variétés de pois innovantes au sein de son assolement, ce qui est à la fois un moyen d'anticiper leur diffusion et un moyen de mettre en avant les voies vers lesquelles orienter de nouvelles recherches (Papy, com. pers.). Toutefois, la difficulté majeure d'une évaluation de l'impact des variétés à l'échelle du système de production réside dans la diversité des systèmes de production susceptibles d'accueillir l'innovation, qu'il serait nécessaire de prendre en compte dans une telle étude. On pourrait imaginer de constituer une « banque » d'exploitations types, caractérisées par leur structure, leurs systèmes de production et leurs règles d'action, et qui permettrait d'analyser et de comparer par simulation (OTELO articulé avec des modèles agronomiques et environnementaux) les effets de l'insertion de ces innovations au sein des différents systèmes de production. Cependant, cette solution nécessiterait une actualisation régulière des données afin de tenir compte de l'évolution permanente de l'environnement de l'exploitation agricole (réglementation, progrès agronomique et variétal, objectifs, effectif, matériel,...), ce qui peut amener les agriculteurs à modifier le mode de gestion de leur système de production.

Il nous semble que les résultats de notre étude pourraient intéresser aussi bien les sélectionneurs que les agriculteurs ou leurs conseillers. Il serait certainement très profitable de réunir ces différents acteurs autour des résultats des simulations pour une discussion collective sur les idéotypes et les critères de sélection.

2.2. Estimation des risques par la modélisation

La relance de la culture de pois nécessite la mise au point de variétés à rendement plus stable que les variétés actuellement commercialisées. Pour atteindre cet objectif, le sélectionneur teste les génotypes en cours de sélection dans des milieux contrastés. Toutefois, l'appréhension complète des risques suppose une accumulation de données sur une période de temps assez longue et dans une gamme de milieux très large, ce qui n'est pas compatible avec les méthodes de sélection et les dispositifs d'évaluation variétale actuels.

La simulation (« expérimentation « in silico » », disent certains) est aujourd'hui de plus en plus utilisée pour appréhender les risques liés à des innovations en agriculture. On peut ainsi l'utiliser pour définir des critères de sélection d'intérêt (Whisler et al., 1986 ; Asseng et al., 2002 ; Fargue, 2002) et déterminer dans quelles conditions les nouvelles variétés présenteraient des avantages par

¹⁴ définie comme un mode de sélection ayant pour objectif d'intégrer plus explicitement l'agriculteur au cœur des projets d'amélioration et de gestion des ressources génétiques (Sperling et al., 1993)

rapport aux variétés de pois commerciales. La modélisation a pour avantage de tester le comportement des nouvelles variétés dans différentes régions et pour différentes conduites de culture (date de semis et irrigation) (Shorter et al., 1991), très rapidement, et ainsi de mieux cibler les éventuelles expérimentations à réaliser pour confirmer certains résultats obtenus par simulation. La modélisation peut aussi être utilisée comme un outil aidant la sélection à anticiper les critères d'intérêt par rapport au risque de réchauffement climatique comme l'ont mis en évidence Carbone et al. (2003) pour le soja.

Dans la littérature scientifique, l'estimation des risques liés à une innovation est généralement abordée par l'utilisation d'un seul modèle. Pour aborder le risque de tassement à l'échelle du système de culture (élément d'évaluation clé, en relation avec ses impacts environnementaux et économiques), le couplage de plusieurs modèles était, dans notre cas, clairement indispensable. Ce couplage n'a pu se faire qu'au prix de certaines simplifications (par exemple, transformation des périodes de semis simulées par OTELO en dates de semis pour rendre possible le couplage avec SISOL). Un travail méthodologique sur ces simplifications et leurs conséquences reste à faire.

2.3. Complémentarité expérimentation-modélisation-sélection

Les modèles sont des représentations simplifiées de la réalité. Il est donc important d'utiliser les résultats d'expérimentation afin d'améliorer la qualité prédictive des modèles (Whisler et al., 1986). En sélection variétale, et d'autant plus dans le cas présent, les expérimentations sont peu nombreuses. Un minimum d'expérimentations avec des géotypes en cours de sélection doit être assuré afin d'assurer la qualité de l'extrapolation des modèles à des variétés « virtuelles ». Par exemple, les variétés de pois d'hiver Hr présentent de nouvelles caractéristiques, comme notamment un port en rosette et un plus grand potentiel de ramification que les variétés commerciales. Les expérimentations (partie 1) ont permis de confirmer l'absence d'effet de ce caractère sur le fonctionnement global de la culture au champ et donc sur le formalisme utilisé pour sa modélisation (partie 2). Une fois cette vérification faite, la modélisation permet d'explorer rapidement différents scénarios (climat, conduite de culture, type de variétés) (Fischer et al., 1990 ; Asseng et al., 2002 ; Yunusa et al., 2004). Ainsi, comme le suggèrent Banterng et al., (2004), en complémentarité de l'expérimentation, la modélisation peut permettre de mettre en évidence les caractères phénotypiques peu performants en fonction des milieux, réduisant significativement le nombre de lignées étudiées pour de plus amples tests et donc les coûts de sélection, facteur très important pour les espèces comme le pois, cultivées sur de faibles surfaces.

L'exploration de variétés virtuelles, réalistes ou non, par modélisation est reconnue aujourd'hui comme un moyen performant pour mettre en évidence les caractères d'intérêt agronomique sur lesquels il serait intéressant de rechercher des QTL (Boote et al., 1996). Toutefois, une attention particulière doit être accordée à la capacité du modèle de culture à discriminer les différentes variétés virtuelles dans la mesure où les résultats des simulations sont directement dépendants des hypothèses et simplifications faites lors de sa mise au point (Hammer et al., 1996). De plus, l'exploration de nouvelles variétés ne doit pas s'arrêter uniquement aux processus et aux caractéristiques intégrées au modèle mais continuer à prospecter indépendamment de façon plus large afin de ne pas passer à côté de solutions innovantes. Dans ce sens, le travail de Bourion et al. (2002a) a permis de mettre en évidence que le potentiel de ramification d'une culture était un critère de sélection d'intérêt vis-à-vis du rendement, d'autant que la localisation d'un gène gouvernant ce caractère a été identifiée (Lejeune-Hénaut et al., 2004). Cette approche permet également de mettre en avant les

manques de connaissances au niveau agrophysiologique et d'orienter la mise en place de nouvelles expérimentations (Whisler et al., 1986) pour les acquérir.

2.4. Intégration de nouveaux critères d'évaluation

L'utilisation de la modélisation donne accès à de nouveaux critères d'évaluation de type agronomique, comme la stabilité du rendement (comme vu précédemment) ou environnementaux, comme la quantité d'azote des pailles et la structure du sol. La notion d'idéotype (au sens de Donald, 1968) peut donc faire référence à d'autres critères qu'à la production de graines. Chez le pois protéagineux, la teneur en protéines digestibles des graines est un critère de qualité essentiel pour l'alimentation animale des porcs et des volailles (Munier-Jolain et Carrouée, 2003). Toutefois, comme le soulignent de nombreux auteurs (Lhuillier-Soundélé et al., 1999c ; Atta et al., 2004), la teneur en protéines des graines varie en fonction de la variété et de l'environnement. Il pourrait donc être intéressant d'évaluer les nouvelles variétés de pois d'hiver sur ce critère agronomique supplémentaire. De même, le reliquat d'azote minéral après récolte du pois peut représenter un stock d'azote non négligeable (partie 2), potentiellement utilisable par la culture suivante, ou lessivable. L'amélioration de la qualité prédictive du modèle sur cette variable serait donc nécessaire.

La sélection ne doit toutefois pas s'arrêter uniquement aux caractères « modélisables ». En effet, certains critères, comme par exemple la « récoltabilité » (liée essentiellement à la verse), la teneur en tryptophane et méthionine (acides aminés essentiels pour l'alimentation des monogastriques), sont également à prendre en compte pour optimiser les chances de diffusion de ces nouvelles variétés.

Enfin d'autres critères d'évaluation, économiques (marge brute) et environnementaux (mauvaises herbes, maladies, ravageurs), doivent également être pris en compte. Le grand nombre de critères pour lesquels une approche par des modèles mécanistes n'est pas envisageable, faute de connaissances, conduit à privilégier un autre type d'approche, intégrant des connaissances expertes. Ce type de travail, qui repose sur la collaboration entre différentes disciplines et le mariage entre connaissances expertes et scientifiques, a été abordé dans le cadre du programme pois de l'action structurante « Impact, acceptabilité et gestion des innovations variétales » de l'INRA. L'utilisation de l'outil d'intégration de connaissances qualitatives et quantitatives DEXI (Jeuffroy et Messéan, 2004) a permis une évaluation plus large des variétés virtuelles et l'identification des conditions dans lesquelles elles auraient un intérêt (date de semis en fonction de la zone de culture).

REFERENCES

BIBLIOGRAPHIQUES

- Acikgoz, E., I. Turgut, I., and H. Ekiz. 1989.** Variation of seed yield and its components in common vetch (*Vicia sativa* L.) under different conditions. Proceedings of the XVI International Grassland Congress, Nice (France). Association Francaise pour la Production Fourragere, Centre National de Recherche Agronomique; Versailles; France.
- Acosta-Gallegos, J.A., P. Vargas-Vazquez, and J.W. White. 1996.** Effect of sowing date on the growth and seed yield of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) in highland environments. *Field Crop Res.* 49:1-10.
- Amir, J., and T.R. Sinclair. 1991.** A model of the temperature and solar-radiation effects on spring wheat growth and yield. *Field Crops Res.* 28:47-58.
- Asseng, S., N.C. Turner, J.D. Ray, and B.A. Keating. 2002.** A simulation analysis that predicts the influence of physiological traits on the potential yield of wheat. *Eur. J. Agro.* 17:123-141.
- Atta, S., S. Maltese, and R. Cousin. 2004.** Protein content and dry weight of seeds from various pea genotypes. *Agronomie* 24:257-266.
- Aubry, C. 2000.** Une modélisation de la gestion de production dans l'exploitation agricole. *Revue Française de Gestion* 129:32-46.
- Bantern, P., A. Patanothai, K. Pannangpetch, S. Jogloy, and G. Hoogenboom. 2004.** Determination and evaluation of genetic coefficients of peanuts lines for breeding applications. *Eur. J. Agron.* 21:297-310.
- Barbottin, A. 2004.** Utilisation d'un modèle de culture pour évaluer le comportement des génotypes : Pertinence de l'utilisation d'Azodyn pour analyser la variabilité du rendement et de la teneur en protéines du blé tendre, Thèse de Doctorat, INA-PG, Paris-Grignon.
- Barbottin, A., C. Lecomte, C. Bouchard, and M.H. Jeuffroy. 2005.** Nitrogen remobilisation during grain filling in wheat: genotypic and environmental effect. *Crop Sci.* 45:1141-1150.
- Barré, R., S. Carcelle, S. Paillard, and C. Sebillotte. 2005.** La prospective, un outil pour la stratégie de l'INRA. La lettre de l'INRA n°11.
- Béasse, C. 1998.** Effets de l'anthracnose due à *Mycosphaerella pinodes* sur l'élaboration du rendement de pois (*Pisum sativum* L.) au champ, Thèse de Doctorat, Rennes I, Rennes (France).
- Bélangier, G., F. Gastal, and G. Lemaire. 1992.** Crop ecology, production and management: growth analysis of tall Fescue sward fertilized with different rate of nitrogen. *Crop Sci.* 32:1371-1376.
- Bengough, A.G., and C.E. Mullins. 1990.** Mechanical impedance to root growth: a review of experimental techniques and root growth responses. *J. Soil Sci.* 41:341-358.
- Biarnès, V., I. Chaillat, and B. Carrouée. 2004a.** Frost damages observed on winter grain legumes in France in 2003, *In* I. AEP, ed. 5th European Conference on grain legumes. AEP, INRA, Dijon, France.
- Biarnès, V., J. Lecoeur, M.H. Jeuffroy, A. Vocanson, and B. Ney. 2004b.** Un modèle pour l'intégration des connaissances et le diagnostic agronomique, p. 217-244, *In* B. V. Munier-Jolain Na., Chaillat I., Lecoeur J., Jeuffroy M.H., ed. Agrophysiologie du pois protéagineux. INRA-Arvalis, Paris.
- Bindi, M., T.R. Sinclair, and J. Harrison. 1999.** Analysis of seed growth by linear increase in harvest index. *Crop Sci.* 39:486-493.
- Boerma, H.R., and D.A. Ashley. 1988.** Canopy photosynthesis and seed fill duration in recently developed soybean cultivars and selected plant introduction. *Crop Sci.* 28:137-140.
- Boizard, H., G. Richard, J. Roger-Estrade, C. Dürr, and J. Boiffin. 2002.** Cumulative effects of cropping systems on the structure of the tilled layer in Northern France. *Soil Till. Res.* 64:149-164.
- Boote, K.J., J.W. Jones, and N.B. Pickering. 1996.** Potential uses and limitations of crop models. *Agro. J.* 88:704-716.
- Boote, K.J., Jones J.W., Hoogenboom G., and Pickering N.B, 1998.** The CROPGRO model for grain legumes. P. 99-128. *In* G.Y. Tsuji et al. (ed) Understanding options for agricultural production. Kluwer Academic Publ., Dordrecht, the Netherlands.
- Boote, K.J., M.I. Minguez, and F. Sau. 2002.** Adapating the CROPGRO Legume Model to simulate growth of Faba Bean. *Agron. J.* 94:743-756.
- Borel, C., T. Simonneau, D. This, and F. Tardieu. 1997.** Stomatal conductance and ABA concentration in the xylem sap of barley lines of contrasting genetic origins. *Aust. J. Plant Physiol.* 24:607-615.
- Bourgeois, E., B. Carrouée, and A. Aveline. 2004.** Nitrate leaching after dry pea compared to other arable crops. Grain legumes and the environment: how to assess benefits and impacts? T. Nemecek, Brühlmann, S., Schneider, A. and Vaca, C. (ed.). Grain legumes and the environment: how to assess benefits and impacts?, Zurich (Switzerland). A.E.P.
- Bourion, V., M. Duparque, I. Lejeune-Hénaut, and N. Munier-Jolain. 2002a.** Criteria for selecting productive and stable pea cultivars. *Euphytica* 126:391-399.
- Bourion, V., G. Fouilloux, C. Le Signor, and I. Lejeune-Hénaut. 2002b.** Genetic studies of selection criteria for productive and stable pea. *Euphytica* 127:261-273.

- Bouthier, A., and J.M. Deumier. 1999.** Pois protéagineux : gérer l'irrigation avec Irrinov Pois. *Pers. Agric.* 245:61.
- Brisson, N., B. Mary, D. Ripoche, M.H. Jeuffroy, F. Ruget, B. Nicoulaud, P. Gate, F. Devienne-Barret, R. Antonioletti, C. Durr, G. Richard, N. Beaudoin, S. Recous, X. Tayot, D. Plenet, P. Cellier, J.M. Machet, J.M. Meynard, and R. Delecolle. 1998.** STICS: a generic model for the simulation of crops and their water and nitrogen balances. I. Theory and parameterization applied to wheat and corn. *Agronomie* 18:311-346.
- Brisson, N., F. Ruget, P. Gate, J. Lorgeou, B. Nicoulaud, X. Tayot, D. Plenet, M.H. Jeuffroy, A. Bouthier, D. Ripoche, B. Mary, and E. Justes. 2002.** STICS: a generic model for simulating crops and their water and nitrogen balances. II. Model validation for wheat and maize. *Agronomie* 22:69-92.
- Brisson, N., C. Gary, E. Justes, R. Roche, B. Mary, D. Ripoche, D. Zimmer, J. Sierra, P. Bertuzzi, P. Burger, F. Bussiere, Y.M. Cabidoche, P. Cellier, P. Debaeke, J.P. Gaudillere, C. Henault, F. Maraux, B. Seguin, and H. Sinoquet. 2003.** An overview of the crop model STICS. *Eur. J. Agron.* 18:309-332.
- Brun, D. 2002.** Développement du pois d'hiver en zone Nord. Mémoire de fin d'études. ENSAIA, Nancy.
- Brussaard, L., and H.G. Faasen. 1994.** Effects of Compaction on Soil Biota and Soil Biological Processes, p. 212-235, *In* B. D. Soane and C.V. Ouwkerk (eds). *Soil Compaction in Crop Production*. Elsevier Science B.V., Amsterdam.
- Bushamuka, V.N., and R.W. Zobel. 1998.** Differential Genotypic and Root Type Penetration of Compacted Soil Layers. *Crop Sci.* 38:776-781.
- Carrouée, B., and E. Duchêne. 1993.** Comment maîtriser de telles variations ? Teneur en protéines du pois. *Pers. Agric.* 183:75-81.
- Carrouée, B. 1996.** Overview of winter grain legumes in France. Problems and prospects for winter sowing of grain legumes in Europe. M. Duc G., F., Ney, B., Schneider, AN, Summerfield, R.J (ed). *Problems and prospects for winter sowing of grain legumes in Europe*, Dijon, France. AEP.
- Cerf, M., J. Mousset, F. Angevin, and H. Boizard. 1994.** La modélisation des conditions d'intervention au champ en grande culture. 13ème Symposium international sur la Recherche-système en agriculture et développement rural, Montpellier (France).
- Carbone, G.J., L.O. Mearns, T. Mavromatis, E.J. Sadler, and D. Stooksbury. 2003.** Evaluating CROPGRO-Soybean performance for use in climatic impact studies. *Agron. J.* 95:537-544.
- Chaillet, I. 2000.** Où cultiver du pois d'hiver ? *Pers. Agri.* 260:70-73.
- Chaillet, I., and V. Biarnès. 2004.** Fiche méthodologique : mesures des stades de développement, p. 58-63, *In* B. V. Munier-Jolain Na., Chaillet I., Lecoœur J., Jeuffroy M.H., ed. *Agrophysiologie du pois protéagineux*. INRA-Arvalis, Paris.
- Charlot, G. 1978.** Recherche d'une liaison entre deux variables, p. 396-399, *In* CEA, ed. *Statistique appliquée à l'exploitation des mesures*, Vol. 2. Masson, Paris.
- Chatelain, M.H., J. Mousset, and F. Papy. 1994.** Taking account decision-making behaviour as basis of advice. A real world experiment in Picardie (Fr). P. Jacobsen, Christensen and Rasmussen (ed.). 38th EAAE Seminar, Denmark.
- Chauplannaz, S., C. Abjean, L. Brouant, and J. Sanssené. 2004.** Effect of compaction and moisture of the soil on *Aphanomyces* root rot of the pea. *In* I. AEP, ed. 5th European Conference on grain legumes. AEP, INRA, Dijon, France.
- Chauveau, J.P. 1995.** Farmer strategies. *The rural extension bulletin* 7:24-28.
- Chopart, J.L. 1994.** Systèmes racinaires des cultures annuelles tropicales : effets du travail du sol sur les racines, *In* W. B. Hoogmoed and M. C. Klaij, eds. *Le travail du sol pour une agriculture durable*. FAO, Niamey, Niger.
- Colenne, C., J.M. Meynard, R. Reau, E. Justes, and A. Merrien. 1998.** Determination of a Critical Nitrogen Dilution Curve for Winter Oilseed Rape. *Ann. Bot.* 81:311-317.
- Coque, M., and M. Willaume. 2002.** Bilan sur la modélisation du fonctionnement du pois de printemps : adaptabilité au pois d'hiver. INA-PG/Paris XI, Grignon.
- Corre-Hellou. 2005.** Acquisition de l'azote dans des associations pois - orge (*Pisum sativum* L. - *Hordeum vulgare* L.) en relation avec le fonctionnement du peuplement, Thèse de Doctorat, ESA, Angers.
- Crozat, Y., J. Gillet, D. Gille, and F. Tricot. 1991a.** Pois de printemps : effets de la structure du sol et de l'eau sur la nutrition azotée et le rendement. *Pers. Agric.* 162 : 52-58.
- Crozat, Y., J.P. Gillet, and F. Tricot. 1991b.** Effects of the soil compaction on root distribution N, P, K uptakes and growth of pea crop. *In* Proc. of the 3rd International Symposium of the Society of root research. 2-6 Sept. 1991, Vienna, Austria.

- Crozat, Y., J.P. Gillet, and A.M. Domenach. 1992.** Nodulation, N₂ fixation and incorporation of combined N from soil into pea crop: effects of soil compaction and water regime, p. 141-142, *In* A. Scaife (ed), First European Conference on Grain Legumes Proc. Angers, France. 5-7 Dec 1990. ESA, Colmar, France.
- Debaene, G. 1996.** Introduction : Les fruits de la recherche. ITCF-UNIP-INRA (ed.). Forum Pois : Améliorer le rendement du pois protéagineux et maintenir une qualité élevée, Paris. 28 mars 1996.
- Dexter, A.R. 1988.** Advances in Characterization of Soil Structure. *Soil Till. Res.* 11:199-238.
- Dexter, A.R. 1991.** Amelioration of soil by natural processes. *Soil Till. Res.* 20:87-100.
- Dexter, A.R. 1997.** Physical properties of tilled soils. *Soil Till. Res.* 43:41-63.
- Donald, C.M. 1968.** The breeding of crop ideotypes. *Euphytica* 17:385-403.
- Donatelli, T.C.K., and R. Marchetti. 1994.** A multi-crop submodel to predict emergence time: model definition and preliminary testing. 3rd ESA Congress, Abano-Palova (Espagne).
- Doré, T. 1990.** Diagnostic sur les facteurs limitants du rendement du pois dans une petite région. *Pers. Agri.* 149:66-71.
- Doré, T. 1992.** Analyse, par voie d'enquête, de la variabilité des rendements et des effets précédents du pois protéagineux de printemps (*Pisum sativum* L.), Thèse de Doctorat, INA, Paris-Grignon.
- Doré, T., and J.M. Meynard. 1995.** On-farm analysis of attacks by the pea weevil (*Sitona lineatus* L.; Col., Curculionidae) and the resulting damage to pea (*Pisum sativum* L.) crops. *Journal of Applied Entomology* 119:49-54.
- Doré, T., J.M. Meynard, and M. Sebillotte. 1998.** The role of grain number, nitrogen nutrition and stem number in limiting pea crop (*Pisum sativum* L.) yields under agricultural conditions. *Eur. J. Agron.* 8:29-37.
- Drinkwater, L.E., P. Wagoner, and M. Sarrantonio. 1998.** Legume-based cropping systems have reduced carbon and nitrogen losses. *Nature* 396:262-265.
- Duchenne, M., and B. Grimaud. 1996.** Compte-rendu de l'expérimentation menée par Agro-transfert en 1995. Le Biopole (section Agro-transfert), Estrée-Mons.
- Dumoulin, V., B. Ney, and G. Eteve. 1994.** Variability of seed and plant development in pea. *Crop Sci.* 34:992-998.
- Dürr, C., and J.N. Aubertot. 2000.** Emergence of seedlings of sugar beet (*Beta vulgaris* L.) as affected by the size, roughness and position of aggregates in the seedbed. *Plant Soil* 219:211-220.
- Egli, D.B. 1993.** Cutivar maturity and potential yield of soybean. *Field Crops Res.* 32:147-158.
- Egli, D.B., and W. Bruening. 1992.** Planting date and soybean yield: evaluation of environmental effects with a crop simulation model: SOYGRO. *Agricultural and Forest Meteorology* 62:19-29.
- Ellis, R.P., and G. Russell. 1984.** Plant development and grain yield in spring and winter barley. *J. Agric. Sci.* 102:85-95.
- Étévé, G., and M. Derieux. 1982.** Variabilité de la durée de la phase végétative chez le pois (*Pisum sativum* L.). Application à la sélection de types résistants à l'hiver et à la détermination de la date de semis. *Agronomie* 2:813-817.
- Evans, J., A.M. McNeill, M.J. Unkovich, N.A. Fettell, and D.P. Heenan. 2001.** Net nitrogen balances for cool-season grain legume crops and contributions to wheat nitrogen uptake: a review. *Aust. J. Exp. Agri.* 41.
- Fargue, 2002.** Maîtrise des flux de gènes chez le colza : étude ex ante de l'impact de différentes innovations variétales, Thèse de Doctorat, INA-PG, Paris-Grignon.
- Fargue, A., N. Colbach, and J.M. Meynard. 2005.** Introduction of genotypic effects into Genesys-Rape: the example of height and male sterility. *Agri. Ecosyst. Env.* 108:318-328.
- Fargue, A., J.M. Menard, N. Colbach, P. Vallee, G. Grandeau, and M. Renard. 2004.** Contamination of rapeseed harvest by volunteers of other varieties: a study of intergenotypic competition. *Eur. J. Agro.* 21:193-207.
- Fischer, R.A., J.S. Armstrong, and M. Stapper. 1990.** Simulation of soil water storage and sowing day probabilities with fallow and no-fallow in southern New South Wales: I. Model and long term mean effects. *Agri. Syst.* 33:215-240.
- Fleury, A. 1970.** Introduction du maïs et transformation du système de culture. Chaire d'agriculture de l'I.N.A., Paris.
- Fleury, A., and A. Mollard. 1976.** Systèmes de production agricoles et environnement : contradictions et perspectives. I.R.E.P., Grenoble (France).
- Franquin, P. 1968.** Analyse agroclimatique en régions tropicales les conditions hydriques. *Cahiers ORSTOM* 5:15-24.

- Froud-Williams, R.J. 1988.** Changes in weed flora with different tillage and agronomic management systems, p. 213-236, *In* M. A. A. a. M. Liebman, ed. Weed management in Agroecosystems: Ecological approaches. Boca Baton, FL: CRC Press.
- Gabrielle, B., P. Denoroy, G. Gosse, E. Justes, and M.N. Andersen. 1998.** Development and evaluation of a CERES-type model for winter oilseed rape. *Field Crop Res.* 57:95-111.
- Gaillard, G., and A. Bouthier. 1997.** Pois de printemps - Irrigation : concilier maîtrise technique et conduite pratique. *Pers. Agric.* 220:54-58.
- Gerard, C.J., H.C. Mehta, and E. Hinojosa. 1971.** Root growth in a clay soil. *Soil Sci.* 114:37-49.
- Grath, T., and I. Hakansson. 1992.** Effects of soil compaction on development and nutrient uptake of peas. Swedish, *J. Agric. Res.* 22:13-17.
- Guilioni, L. 1997.** Effets des hautes températures sur la croissance végétative et le développement des organes reproducteurs chez le pois (*Pisum sativum* L. c.v. Messire). Conséquence sur la production de biomasse et le nombre de graines, ENSA Montpellier.
- Guilioni, L., J. Wéry, and J. Lecoeur. 2003.** High temperature and water deficit may reduce seed number in field pea purely by decreasing plant growth rate. *Functional Plant Biology* 30:1151-1164.
- Guilioni, L., and M.H. Jeuffroy. 2004.** Fortes températures et fonctionnement d'un couvert de pois, p. 164-173, *In* B. V. Munier-Jolain Na., Chaillet I., Lecoeur J., Jeuffroy M.H., ed. Agrophysiologie du pois protéagineux. INRA-Arvalis, Paris.
- Gunjal, K.R., and G.S.V. Raghavan. 1986.** Economic analysis of soil compaction due to machinery traffic. *American Society of Agricultural Engineers* 2:85-88.
- Hamblin, A.P., and J. Hamblin. 1985.** Root characteristics of some legumes species and varieties on deep, free-draining entisols. *Aust. J. Agri. Res.* 36:63-72.
- Hammer, G.L., and R.L. Vanderlip. 1989.** Genotype-by-environment interaction in grain sorghum. III. Modeling the impact in field environments. *Crop Sci.* 29:385-391.
- Hammer, G.L., D.G. Butler, R.C. Muchow, and H. Meinke. 1996.** Integrating physiological understanding and plant breeding via crop modelling and optimization, p. 419-441, *In* M. H. Cooper, G.L., ed. Plant adaptation and crop improvement. CAB INTERNATIONAL, Wallingford (UK).
- Hansen, S., H.E. Jensen, N.E. Nielsen, and H. Svendsen. 1991.** Simulation of nitrogen dynamics and biomass production in winter wheat using the Danish simulation model DAISY. *Fert. Res.* 27:245-259.
- Hardwick, R.C. 1988.** Les points critiques de la physiologie des protéagineux. *Pers. Agri.* 121:55-62.
- Hoogenboom, G., J.W. Jones, and K.J. Boote. 1992.** Modelling growth, development, and yield of grain legumes using soygro, pnutgro, and beangro: a review. *ASAE* 35:2043-2056.
- Horn, C.P., R.C. Dalal, C.J. Birch, and J.A. Doughton. 1996.** Sowing time and tillage practice affect chickpea yield and nitrogen fixation-2. Nitrogen accumulation, nitrogen fixation and soil nitrogen balance. *Aust. J. Agri. Res.* 36:701-706.
- Horton, R., M.D. Ankeny, and R.R. Allmaras. 1994.** Effects of Compaction on Soil Hydraulic Properties, p. 141-166, *In* B. D. Soane and C. v. Ouwkerk, eds. Soil Compaction in Crop Production. Elsevier Science B.V., Amsterdam.
- Houles, V., B. Mary, M. Guerif, D. Makowski, and E. Justes. 2004.** Evaluation of the ability of the crop model STICS to recommend nitrogen fertilisation rates according to agro-environmental criteria. *Agronomie* 24:339-349.
- IBSNAT, 1990.** Network report 1987-1990. Technical report, University of Hawaiï, Honolulu, HI, USA.
- Imssande, J., and D.G. Edwards. 1988.** Decreased rates of nitrate uptake during pod fill by cowpea, green gram, and soybean. *Agron. J.* 80:789-793.
- Ittersum, M.K.v., P.A. Leffelaar, H.v. Keulen, M.J. Kropff, L. Bastiaans, and J. Goudriaan. 2003.** On approaches and applications of the Wageningen crop models. *Eur. J. Agron.* 18:201-234.
- Jensen, E.S. 1986.** Symbiotic N₂ fixation in pea and field bean estimated by ¹⁵N fertilizer dilution in field experiments with barley as a reference crop. *Plant Soil* 92:3-13.
- Jensen, E.S. 1989.** The role of pea cultivation in the nitrogen economy of soils and succeeding crops, p. 3-15, *In* P. P. R. Hagggar, ed. Legumes in farming systems. Kluwer Acad. Pub., Dordrecht/Boston/London.
- Jensen, E.S. 1994.** Availability of nitrogen in ¹⁵N-labelled mature pea residues to subsequent crops in the field. *Soil Biol. Biochem.* 26:465-472.
- Jensen, E.S. 1996.** Compared cycling in a soil-plant system of pea and barley residue nitrogen. *Plant Soil* 182:13-23.
- Jeuffroy, M.H., C. Duthion, J.M. Meynard, and A. Pigeaire. 1990.** Effect of a short period of high day temperatures during flowering on the seed number per pod of pea (*Pisum sativum* L.). *Agronomie* 10:139-145.

- Jeuffroy, M.H. 1991.** Rôle de la vitesse de croissance, de la répartition des assimilats et de la nutrition azotée dans l'élaboration du nombre de graines du pois protéagineux de printemps (*Pisum sativum* L.), Thèse de Doctorat, Paris Sud-Orsay.
- Jeuffroy, M.H., and B. Ney. 1997.** Crop physiology and productivity. *Field Crop Res.* 53:3-16.
- Jeuffroy, M.H., and S. Recous. 1999.** Azodyn: a simple model simulating the date of nitrogen deficiency for decision support in wheat fertilisation. *Eur. J. Agron.* 10:129-144.
- Jeuffroy, M.H., and A. Messéan. 2004.** An analysis of the environmental performances of various pea genotypes using a multi-agent system. Grain legumes and the environment: how to assess benefits and impacts? T. Nemecek, Brühlmann, S., Schneider, A. and Vaca, C. (ed.). Grain legumes and the environment: how to assess benefits and impacts?, Zurich (Switzerland). A.E.P.
- Jeuffroy, M.H., A. Barbottin, J. Jones, and J. Lecoeur. 2006.** Estimating genotype parameters for crop models, *In* D. Wallach, et al., eds. Working with crop models. sous presse.
- Jones, C.A., Kiniry, J.R., 1986.** Ceres-N Maize: a simulation model of maize growth and development. Texas A&M Univ. Press. College Station, Temple, TX, 194 pp.
- Jones, C.A., W.L. Bland, J.T. Ritchie, and J.R. Williams. 1991.** Simulation of root growth, p. 91-123, *In* J. Hanks and J. T. Ritchie, eds. Modeling plant and soil systems. American Society of Agronomy, Inc., Madison, USA, Temple, Texas, USA.
- Jordan, M.O. 1987.** Mise en place du système racinaire du maïs. I. Importance de quelques paramètres relatifs à la plante. *Agronomie* 7:365-371.
- Justes, E., B. Mary, J.M. Meynard, J.M. Machet, and L. Thelier-Huches. 1994.** Determination of a Critical Nitrogen Dilution Curve for Winter Wheat Crops. *Ann. Bot.* 74:397-407.
- Kay, B.D. 1990.** Rates of change of soil structure under different cropping systems, p. 1-52, *In* B. A. Steward, ed. Advances in soil science, Vol. 12. Springer-Verlag, New-York (USA).
- Keating, B.A., P.S. Carberry, G.L. Hammer, M.E. Probert, M.J. Robertson, D. Holzworth, N.I. Huth, J.N.G. Hargreaves, H. Meinke, Z. Hochman, G. McLean, K. Verburg, V. Snow, J.P. Dimes, M. Silburn, E. Wang, S. Brown, K.L. Bristow, S. Asseng, S. Chapman, R.L. McCown, D.M. Freebairn, and C. Smith. 2003.** An overview of APSIM, a model designed for farming systems simulation. *Eur. J. Agron.* 18:267-288.
- King, J.M. 1979.** Soils structure - the key to successful pea crops. *Arable Farming:* 26-27.
- Klepper, B., and R.W. Rickman. 1990.** Modelling crop root growth and function. *Adv. Agro.* 44:113-132.
- Kumar, K., and K.M. Goh. 2000.** Biological nitrogen fixation, accumulation of soil nitrogen and nitrogen balance for white clover (*Trifolium repens* L.) and field pea (*Pisum sativum* L.) grown for seed. *Field Crop Res.* 68:49-59.
- Kutra, G., and R. Aksomaitiene. 2003.** Use of nutrient balances for environmental impact calculations on experimental field scale. *Eur. J. Agron.* 20:127-135.
- Larmure, A., and N. Munier-Jolain. 2004.** Teneur en protéines des graines, p. 217-244, *In* B. V. Munier-Jolain Na., Chaillet I., Lecoeur J., Jeuffroy M.H., ed. Agrophysiologie du pois protéagineux. INRA-Arvalis, Paris.
- Lavoie, G., K.R. Gunjal, and G.S.V. Raghavan. 1991.** Soil compaction, machinery selection, and optimum crop planting. *ASAE* 34:1-8.
- Lecoeur, J. 1994.** Réponses phénologiques et morphologiques du pois (*Pisum sativum* L.) à la contrainte hydrique. Conséquences sur le nombre de phytomères reproducteurs., Thèse de Doctorat, ENSA de Montpellier, Montpellier.
- Lecoeur, J., and T.R. Sinclair. 1996.** Field pea transpiration and leaf growth in response to soil water deficits. *Crop Sci.* 36:331-335.
- Lecoeur, J., and T.R. Sinclair. 2001a.** Harvest index increase during seed growth of field pea. *Eur. J. Agron.* 19:91-105.
- Lecoeur, J., and T.R. Sinclair. 2001b.** Nitrogen accumulation, partitioning, and nitrogen harvest index increase during seed fill of field pea. *Field Crops Res.* 71:87-99.
- Lecoeur, J., and B. Ney. 2003.** Change with time in potential-use efficiency in field pea. *Eur. J. Agron.* 19:91-105.
- Lecoeur, J., and L. Guilioni. 2004.** Déficit hydrique et fonctionnement d'un couvert de pois, p. 153-164, *In* B. V. Munier-Jolain Na., Chaillet I., Lecoeur J., Jeuffroy M.H., ed. Agrophysiologie du pois protéagineux. INRA-Arvalis, Paris.
- Lecomte, C. 2005.** L'évaluation expérimentale des innovations variétales : proposition d'outils d'analyse de l'interaction génotype x milieu adaptés à la diversité des besoins et des contraintes des acteurs de la filière semences, Thèse de Doctorat, INA-PG, Paris-Grignon (France).

- Lejeune-Hénaut, I. 1996.** Abiotic constraints on yield and produce quality. Problems and projects for winter sowing of grain legumes in Europe. M. Duc G., F., Ney, B., Schneider, AN, Summerfield, R.J. (ed.). Problems and projects for winter sowing of grain legumes in Europe, Dijon, France. AEP.
- Lejeune-Hénaut, I., V. Bourion, G. Etévé, E. Cunot, K. Delhaye, and D. C. 1999.** Floral initiation in field-grown forage peas is delayed to a greater extent by short photoperiods, than in other types of European varieties. *Euphytica* 109:201-211.
- Lejeune-Hénaut, I., B. Delbreil, R. Devaux, and L. Guilioni. 2004.** Températures froides et fonctionnement d'un couvert de pois, p. 184-195, *In* B. V. Munier-Jolain Na., Chaillet I., Lecoeur J., Jeuffroy M.H., ed. Agrophysiologie du pois protéagineux. INRA-Arvalis, Paris.
- Lemaire, G., and F. Gastal. 1997.** N uptake and distribution in plant canopies, p. 3-43, *In* G. Lemaire, ed. Diagnosis of the nitrogen status in crops. Heidelberg: Springer-Verlag, Berlin.
- Le May, C. 2002.** Effet du couvert végétal du pois protéagineux sur le développement spatio-temporelle de l'antracnose à *Mycosphaerella pinodes*. Conséquences sur le nombre de phytomères reproducteurs, Thèse de Doctorat ENSAR, Rennes (France).
- Lhuillier-Soundélé, A. 1999.** Analyse de l'élaboration de la teneur en azote des graines chez le pois (*Pisum sativum* L.). Modélisation de la répartition de l'azote vers les graines en remplissage., Paris.
- Lhuillier-Soundélé, A., N.G. Munier-Jolain, and B. Ney. 1999a.** Dependence of seed nitrogen concentration on plant nitrogen availability during the seed filling in pea. *Eur. J. Agron.* 11:157-166.
- Lhuillier-Soundélé, A., N.G. Munier-Jolain, and B. Ney. 1999b.** Influence of Nitrogen Availability on Seed nitrogen Accumulation in Pea. *Crop Sci.* 39:1741-1748.
- Loyce, C. 1998.** Mise au point d'itinéraires techniques pour un cahier des charges multicritère : Le cas de la production de blé éthanol en Champagne crayeuse. Thèse de Doctorat, INA-PG, Paris-Grignon.
- Maltas, A. 2002.** Mise au point et évaluation d'un modèle pour déterminer a priori les conséquences agronomiques et environnementales de l'insertion de nouvelles variétés de pois d'hiver. Mémoire de DEA, Paris XI. UMR d'Agronomie, Grignon.
- Martin, R.J. 1992.** Dry matter and nitrogen redistribution in autumn- and spring-sown wheats. Proceedings Annual Conference, Christchurch, New Zealand. Agronomy Society of New Zealand.
- Mary, B., N. Beaudoin, E. Justes, and J.M. Machet. 1999.** Calculation of nitrogen mineralization and leaching in fallow soil using a simple dynamic model. *Eur. J. Soil Sci.* 50:549-566.
- McCown, R.L., G.L. Hammer, J.N.G. Hargreaves, D.P. Holzworth, and D.M. Freebairn. 1996.** APSIM: a novel software system for model development, model testing and simulation in agricultural systems research. *Agri. Syst.* 50:255-271.
- McMichael, B.L., and J.E. Quisenberry. 1993.** The impact of the soil environment on the growth of root systems. *Env. Exp. Bot.* 33:53-61.
- Meinke, H., and G.L. Hammer. 1995.** A peanut simulation model: II. Assessing regional production potential. *Agron. J.* 87:1093-1099.
- Messéan, A., F. Angevin, N. Colbach, and J.M. Meynard. 2003.** Assessing the indirect and long-term ecological impacts of innovation in agriculture is a real challenge: the GM example. *Oléagineux Corps Gras Lipides* 10:195-197.
- Meynard, J.M. 1985.** Construction d'itinéraires techniques pour la conduite du blé d'hiver, Thèse de Doctorat, INA PG, Paris.
- Meynard, J.M. 1991.** Pesticides et itinéraires techniques, p. 85-100, *In* P. D. Bye, C.;Deshayes, A., ed. Un point sur...Phytoprotecteurs, protection des plantes, biopesticides. INRA, Paris (France).
- Meynard, J.M., T. Doré, and R. Habib. 2001.** L'évaluation et la conception de systèmes de culture pour une agriculture durable. *Acad. Agric. Fr.* 87:223-236.
- Meynard, J.M., and M.H. Jeuffroy. 2002.** Progrès génétique et agriculture durable. *Le Sélectionneur Français* 53:69-82.
- Monteith, J.L. 1977.** Climate and efficiency of crop production in Britain. *Phil. Trans. R. Soc. Lond.* 281:277-294.
- Moot, D.J., and D.L. McNeil. 1995.** Yield components, harvest index and plant type in relation to yield differences in field pea genotypes. *Euphytica* 86:31-40.
- Mousset, J. 1996.** Métagro, conseil en agro-équipement dans les exploitations de grandes cultures. Biopôle, section Agro-transfert - Chambre d'agriculture de Picardie, Conseil régional de Picardie.
- Munier-Jolain, N., and B. Carrouée. 2003.** Quelle place pour le pois dans une agriculture respectueuse de l'environnement ? Argumentaire agri-environmental. *Cahiers Agricultures* 12:111-120.
- Munier-Jolain, N. 2004.** Poids d'une graine, p. 129-135, *In* B. V. Munier-Jolain Na., Chaillet I., Lecoeur J., Jeuffroy M.H., ed. Agrophysiologie du pois protéagineux. INRA-Arvalis, Paris.

- Munier-Jolain, N.M., and A. Collard. 2004.** Grain legumes and weed management in crop rotations: stakes and methodologies for reducing environmental impacts of weed control. Grain legumes and the environment: how to assess benefits and impacts? T. Nemecek, Brühlmann, S., Schneider, A. and Vaca, C. (ed.). Grain legumes and the environment: how to assess benefits and impacts?, Zurich (Switzerland). A.E.P.
- Murfet, I.C. 1973.** Flowering in *Pisum*. Hr, a gene for high response to photoperiod. *Heredity* 26.
- Ney, B. 1994.** Modélisation de la croissance aérienne d'un peuplement de pois, p. 39-48, *In* UNIP-ITCF-INRA, ed. Agrophysiologie du pois protéagineux.
- Ney, B., and G. Duc. 1996.** Potential and problems with winter sowing of food legumes in northern Europe. M. Duc G., F., Ney, B., Schneider, AN, Summerfield, R.J. (ed.). Problems and projects for winter sowing of grain legumes in Europe, Dijon, France. AEP.
- Ney, B., T. Dore, and M. Sagan. 1997.** Grain Legumes, p. 107-118, *In* G. Lemaire, ed. Diagnosis of the nitrogen status in crops. Springer.
- Nolot, J.M., and P. Debaeke. 2003.** Principles and tools for the design, management and evaluation of cropping systems. *Cahiers Agricultures* 12:387-400.
- Osty, P.L. 1978.** L'exploitation agricole vue comme un système. *Bulletin technique agricole* 326:43-49.
- Pages, L., and F. Aries. 1988.** SARAH: a simulation model of the growth, development and architecture of root systems. *Agronomie* 8:889-896.
- Papy, F., and L. Servettaz. 1986.** Jours disponibles et organisation du travail. *Bulletin technique agricole* 412-413:693-702.
- Papy, F., C. Aubry, and J. Mousset. 1990.** Eléments pour le choix des équipements et chantiers d'implantation des cultures en liaison avec l'organisation du travail. *Les Colloques de l'INRA* 53:157-196.
- Papy, F., and J. Mousset. 1992.** Vers une communication entre savoirs théorique et pratique. 4^{ème} congrès international d'informatique agricole. Paris, Versailles (France). INRA.
- Parmar, R.S., R.W. McClendon, and E.J. Williams. 1994.** A computer simulation model for peanut machinery management. *Applied Engineering in Agriculture* 10:455-461.
- Passioura, J.B. 1973.** Sense and nonsense in crop simulation. *J. Aust. Inst. Agri. Sci.* September:181-183.
- Pate, J.S. 1958.** Nodulation studies in legumes. I The synchronisation of host and symbiotic development in the field pea, *Pisum arvense* L. *Aust. J. Biol. Sci.* 11:361-381.
- Pigeaire, A., C. Duthion, and O. Turc. 1986.** Characterisation of final stage of seed abortion in indeterminate soybean, white lupin and pea. *Agronomie* 6:371-378.
- Pilbeam, C.J., P.D. Hebblethwaite, H.E. Ricketts, and O.A. Hassan. 1990.** Effects of autumn sowing dates on growth and yield of indeterminate and determinate field beans (*Vicia faba*). *J. Agri. Sci.* 114:339-352.
- Plénet, D., and P. Cruz. 1997.** Maize and Sorghum, p. 93-106, *In* G. Lemaire, ed. Diagnosis of the Nitrogen Status in Crops. Springer, Berlin.
- Polomski, J., and N. Kuhn. 1998.** Root research methods, p. 295-321, *In* J. K. Polomski, N., ed. Root systems. Paul Haupt AG Bern, Bern, Switzerland.
- Prioul, S., A. Frankewitz, G. Deniot, G. Morin, and A. Baranger. 2004.** Mapping of quantitative trait loci for partial resistance to *Mycosphaerella pinodes* in pea (*Pisum sativum* L.), at the seedling and adult plant stages. *Theoretical and Applied Genetics* 108:1322-1334.
- Probert, M.E., P.S. Carberry, R.L. McCown, and J.E. Turpin. 1998.** Simulation of legume-cereal systems using APSIM. *Aust. J. Agric. Res.* 49:317-327.
- PROLEA. 2002.** Rapport statistiques UNIP. 80p.
- Ranalli, P., M. Di Candilo, and V. Faeti. 1997.** Performance in northern Italy of pea breeding lines for dry seed yield. *Adv. Hort. Sci.* 11:85-90.
- Reboul, C. 1969.** Météorologie et jours disponibles pour les travaux agricoles. *Bulletin technique agricole* 238:309-320.
- Robertson, M.J., S. Fukai, G.L. Hammer, and M.M. Ludlow. 1993.** Modelling root growth of grain sorghum using the CERES approach. *Field Crops Res.* 33:113-130.
- Robertson, M.J., P.S. Carberry, and M. Lucy. 2000.** Evaluation of a new cropping option using a participatory approach with on-farm monitoring and simulation: a case study of spring-sown mungbeans. *Aust. J. Agri. Res.* 51:1-12.
- Roche, R. 1998.** Modélisation de la variabilité des profils de graines associée à la séquentialité du développement chez différents génotypes de pois protéagineux de printemps, Thèse de Doctorat, INA-PG, Paris-Grignon.
- Roche, R., M.H. Jeuffroy, and B. Ney. 1998.** A Model to Simulate the Final Number of reproductive Nodes in Pea (*Pisum sativum* L.). *Ann. Bot.* 81:545-555.

- Roche, R., M.H. Jeuffroy, and B. Ney. 1999.** Comparison of different models predicting the date of beginning of flowering in pea (*Pisum sativum* L.). *Ecological modelling* 118:213-226.
- Roger, C., and B. Tivoli. 1996.** Spatio-temporal development of pycnidia and perithecia and dissemination of spores of *Mycosphaerella pinodes* on pea (*Pisum sativum*). *Plant Patho.* 45:518-528.
- Roger, C., B. Tivoli, and E. Lemarchand. 1998.** Epidémiologie de l'antracnose. *Phytoma* 509:32-36.
- Roger-Estrade, J., G. Richard, H. Boizard, J. Boiffin, J. Caneill, and H. Manichon. 2000.** Modelling structural changes in tilled topsoil over time as a function of cropping systems. *Eur. J. Soil Sci.* 51:455-474.
- SAS Institute. 1987.** SAS/STAT Guide for Personal Computer. 6th edition, SAS institute, Cary, NC.
- Savin, R., A.J. Hall, and E.H. Satorre. 1994.** Testing the root growth subroutine of the CERES-Wheat model for two cultivars of different cycle length. *Field Crops Res.* 38:125-133.
- Sebillotte, M. 1986.** Evolution et actualité de problèmes d'organisation du travail en agriculture. *Bulletin technique agricole* 412/413:621-630.
- Sebillotte, M., and L. Servettaz. 1989.** Fertilité et systèmes de production INRA, Paris (France).
- Shibles, R.M., J. Secor, and D.M. Ford. 1987.** Carbone assimilation and metabolism, p. 535-588 *Improvement, production, and uses.* ASA-CSSA-SSSA.
- Shorter, R., R.J. Lawn, and G.L. Hammer. 1991.** Improving genotypic adaptation in crops - a role for breeders, physiologists and modellers. *Expl. Agric.* 27:155-175.
- Sinclair, T.R., and C.T. De Witt. 1976.** Analysis of the carbon and nitrogen limitations to soybean yield. *Agron. J.* 68:319-324.
- Singh, P., and S.M. Virmani. 1996.** Modelling growth and yield of chickpea (*Cicer arietinum* L.). *Field Crop Res.* 46:41-59.
- Smith, G.P., and M.J. Gooding. 1999.** Models of wheat grain quality considering climate, cultivar and nitrogen effects. *Agricultural and Forest Meteorology* 94:159-170.
- Soane, B.D., J.W. Dickson, and D.J. Campbell. 1982.** Compaction by agricultural vehicles: a review. III. Incidence and control of compaction in crop production. *Soil & Tillage Research* 2:3-36.
- Soon, Y.K., and M.A. Arshad. 2004.** Contribution of di-nitrogen fixation by pea to the productivity and N budget of a wheat-based cropping system. *J. Agri. Sci.* 142:629-637.
- Spaeth, S.C., and T.R. Sinclair. 1985.** Linear increase in soybean harvest index during seed-filling. *Agro. J.* 77:207-211.
- Spaeth, S.C., T.R. Sinclair, T. Ohnuma, and S. Konno. 1987.** Temperature, radiation, and duration dependence of high soybean yields: measurement and simulation. *Field Crops Res.* 16:297-307.
- Sperling, L., M. Loevinsohn, and B. Ntabomvura. 1993.** Rethinking the farmer's role in plant breeding: local bean expertes ans on-station in Rwanda. *Expl. Agric.* 29.
- Stanfield, B., D.P. Ormrod, and H.F. Fletcher. 1966.** Response of peas to environments. II. Effects of temperature in controlled-environment cabinets. *Can. J. Plant Sci.* 46:195-203.
- Stepniewski, W., J. Glinski, and B.C. Ball. 1994.** Effects of compaction on soil aeration properties, p. 167-189, *In* B. D. Soane and C. van Ouwerkerk, eds. *Soil compaction in crop production.* Elsevier, Amsterdam.
- Stutzel, H. 1995.** A simple model for simulation of growth and development in faba beans (*Vicia faba* L.) 2. Model evaluation and application for the assessment of sowing date effects. *Eur. J. Agro.* 4:187-195.
- Summerfield, R.J., and E.H. Roberts. 1988.** *Photothermal regulation of flowering in pea, lentil faba bean and chickpea* Kluwer Academic Publishers, Amsterdam.
- Tardieu, F. 1984.** Etude au champ de l'enracinement du maïs : influence de l'état structural sur la répartition des racines, conséquences sur l'alimentation hydrique, Thèse de Doctorat, INA, Paris.
- Tardieu, F., and H. Manichon. 1987.** Etat structural, enracinement et alimentation hydrique du maïs. II. - Croissance et disposition spatiale du système racinaire. *Agronomie* 7:201-211.
- Tardieu, F. 1990.** Effects of soil structure on rooting. What should be considered for modelling? *Colloques de l'INRA* 53:91-109.
- Tivoli, B., and R. Samson. 1996.** Biotic constraints on yield and produce quality. Problems and projects for winter sowing of grain legumes in Europe. M. Duc G., F., Ney, B., Schneider, AN, Summerfield, R.J. (ed.) 1996. *Problems and projects for winter sowing of grain legumes in Europe*, Dijon, France. AEP.
- Tivoli, B., C. Le Ma, A. Schoeny, M.H. Jeuffroy, and B. Ney. 2004.** Impacts de l'antracnose sur le fonctionnement d'un couvert de pois et sur le rendement au champ, p. 197-207, *In* B. V. Munier-Jolain Na., Chaillet I., Lecoœur J., Jeuffroy M.H., ed. *Agrophysiologie du pois protéagineux.* INRA-Arvalis, Paris.
- Tricot, F. 1993.** Mise en place des nodosités du pois protéagineux de printemps (*Pisum sativum* L.). Influence de la nutrition carbonée, Thèse de Doctorat, Paris-Sud Orsay.

- Tricot-Pellerin, F., F. Angevin, and Y. Crozat. 1994.** Elaboration de la biomasse des nodosités : influence de la nutrition carbonée, p. 75-91, *In* B. Ney, Duchêne, E., Carrouée, B., Angevin, F., ed. Agrophysiologie du pois protéagineux : applications à la production agricole. INRA-ITCF, Paris.
- Tsegaye, T., and C.E. Mullins. 1994.** Effect of mechanical impedance on root growth and morphology of two varieties of pea (*Pisum sativum* L.). *New Phytologist* 126:707-713.
- Tsegaye, T., C.E. Mullins, and A.J. Diggle. 1995.** An experimental procedure for obtaining input parameters for the "ROOTMAP" root simulation program for peas (*Pisum sativum* L.). *Plant and soil* 172:1-16.
- UNIP-ITCF. 1998.** Pois protéagineux : un atout pour l'agriculture européenne. 47p.
- UNIP. 2005.** UNIP Statistiques Plantes riches en protéines. UNIP, Paris.
- Uzun, A., and E. Açıkgöz. 1998.** Effect of sowing season and seeding rate on the morphological traits and yields in pea cultivars of differing leaf types. *J. Agronomy & Crop Science* 181:215-222.
- van Kessel, C., and C. Hartley. 2000.** Agricultural management of grain legumes: has it led to an increase in nitrogen fixation? *Field Crop Res.* 65:165-181.
- Varlet-Grancher, C., G. Gosse, M. Chartier, H. Sinoquet, R. Bonhomme, and J.M. Allirand. 1989.** Mise au point : rayonnement solaire absorbé ou intercepté par un couvert végétal. *Agronomie* 9:419-439.
- Villalobos, F.J., A.J. Hall, J.T. Ritchie, and F. Orgaz. 1996.** OILCROP-SUN: a development, growth, and yield model of the sunflower crop. *Agron. J.* 88.
- Vocanson, A., M.H. Jeuffroy, and T. Doré. 2004a.** Carence azoté, p. 173-177, *In* B. V. Munier-Jolain Na., Chaillet I., Lecoer J., Jeuffroy M.H., ed. Agrophysiologie du pois protéagineux. INRA-Arvalis, Paris.
- Vocanson, A., N. Munier-Jolain, A.S. Voisin, and B. Ney. 2004b.** Courbe de dilution, p. 81-86, *In* B. V. Munier-Jolain Na., Chaillet I., Lecoer J., Jeuffroy M.H., ed. Agrophysiologie du pois protéagineux. INRA-Arvalis, Paris.
- Vocanson, A., Y. Crozat, and M.H. Jeuffroy. 2004c.** Etat structural, p. 178-183, *In* B. V. Munier-Jolain Na., Chaillet I., Lecoer J., Jeuffroy M.H., ed. Agrophysiologie du pois protéagineux. INRA-Arvalis, Paris.
- Vogrincic, C. 2000.** Mise au point et évaluation d'un outil de gestion de l'azote sur le colza : Azodyn-colza. Synthèse bibliographique. ENITA, Clermont-Ferrand (France).
- Voisin, A.S., and C. Salon. 2004.** Efficience de la nutrition azotée, p. 94-98, *In* B. V. Munier-Jolain Na., Chaillet I., Lecoer J., Jeuffroy M.H., ed. Agrophysiologie du pois protéagineux. INRA-Arvalis, Paris.
- Voisin, A.S., C. Salon, N.G. Munier-Jolain, and B. Ney. 2002.** Quantitative effects of soil nitrate, growth potential and phenology on symbiotic nitrogen fixation of pea (*Pisum sativum* L.). *Plant and soil* 243:31-42.
- Voisin, A.S. 2002.** Etude du fonctionnement des racines nodulées du pois (*Pisum sativum* L.) en relation avec la disponibilité en nitrates du sol, les flux de carbone au sein de la plante et la phénologie, Thèse de Doctorat, Bourgogne, Dijon.
- Wallach, D., and B. Gofinet. 1987.** Mean squared error of prediction in models for studying ecological and agronomic systems. *Biometrics* 43:561-573.
- Wang, F., C.W. Fraisse, N.R. Kitchen, and K.A. Sudduth. 2003.** Site-specific evaluation of the CROPGRO-soybean model on Missouri claypan soils. *Agri. Syst.* 76:985-1005.
- Whisler, F.D., B. Acock, D.N. Baker, R.E. Fye, H.F. Hodges, J.R. Lambert, H.E. Lemmon, J.M. McKinion, and V.R. Reddy. 1986.** Crop simulation models in agronomic systems. *Adv. Agro.* 40:141-208.
- White, J.W., and G. Hoogenboom. 1996.** Simulating effects of genes for physiological traits in a process-oriented crop model. *Agron. J.* 88:416-422.
- Willock, J., I.J. Deary, G. Edward-Jones, G.J. Gibson, M.J. McGregor, A. Sutherland, J. Barry Dent, O. Morgan, and R. Grieve. 1999.** The role of attitudes and objectives in farmer decision making: business and environmentally-oriented behaviour in Scotland. *Journal of Agricultural Economics* 50:286-303.
- Yunusa, I.A.M., W.D. Bellotti, A.D. Moore, M.E. Probert, J.A. Baldock, and S.M. Miyan. 2004.** An exploratory evaluation of APSIM to simulate growth and yield processes for winter cereals in rotation systems in South Australia. *Aust. J. Exp. Agri.* 44:787-800.
- Zhang, X.Y. 2005.** Modélisation de la réponse des variétés de blé au niveau d'intensification. Influence de la pression de maladies foliaires, INA-PG, Paris-Grignon.

ANNEXES

ANNEXE 1

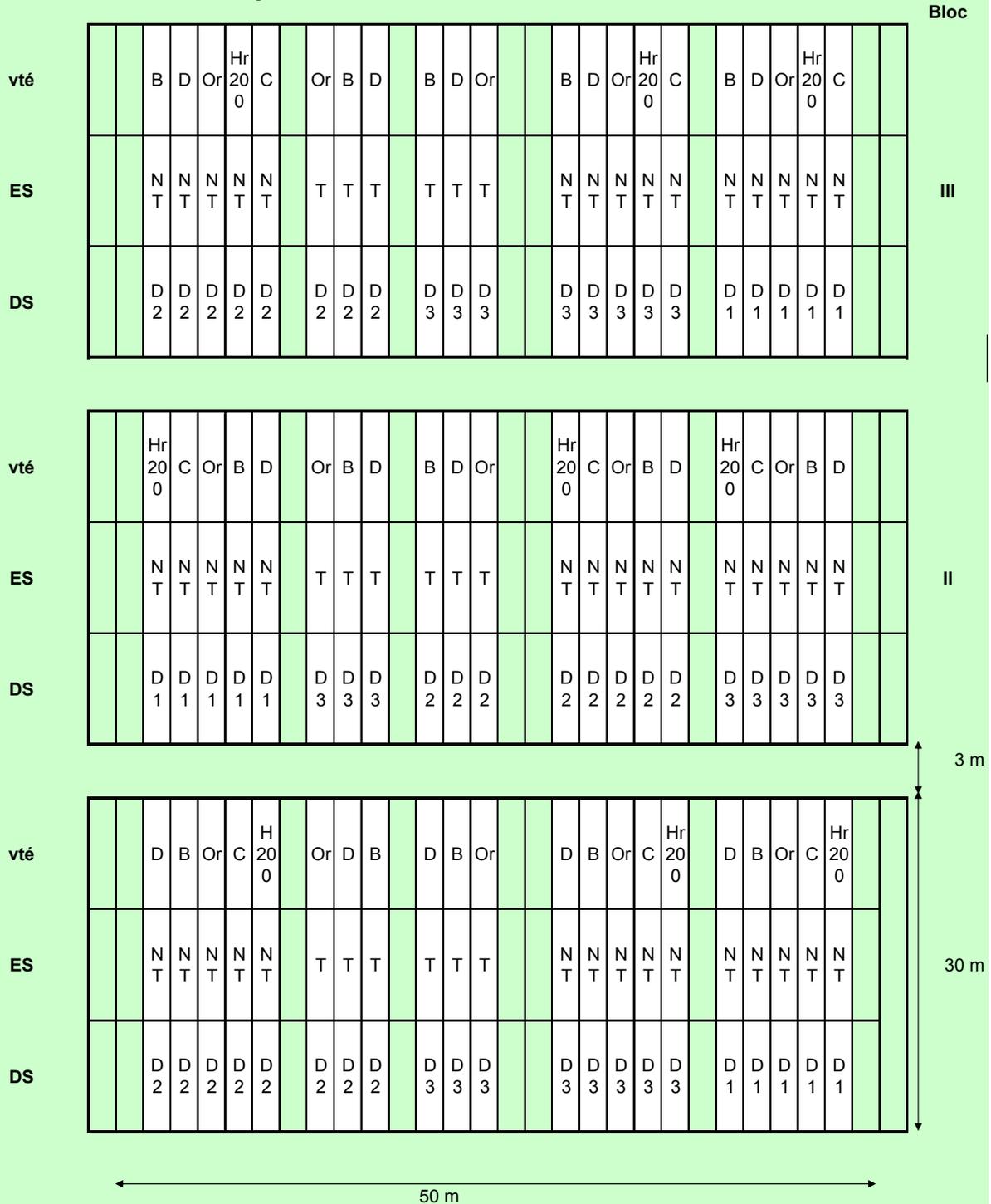
Plan des essais de Grignon (78) et Mons (80) en 2002-2003 et 2003-2004

↑ Plaisir
Essais de GRIGNON en 2002-2003 et 2003-2004 (exp.1 et 2)
 ↓ Beynes

variétés (vtés) : Baccara : B, Dove : D, Hr200 (nvelle vté), Cheyenne : C + Orge : Or (%Nfixé)
Etat structural (ES) : Non tassé : NT et tassé : T
Date de semis (DS) : D1 (début octobre), D2 (novembre), D3 (fev-mars)

allée

Densité de semis : 90 gr/m²



Rq : Orge d'hiver en bordure
 Filets de protection après semis
 parcelle élémentaire : 1.75 x 30 m

Essais de MONS en 2002-2003 et 2003-2004 (exp.3 et 4)

variétés : Baccara, Dove , Hr200 (nvelle vté), Cheyenne, autre nouvelle variété Hr102

Etat structural : Non tassé et tassé

Date de semis : Date 1 (début octobre), Date 2 (novembre), Date 3 (fev-mars)

Densité de semis : 90 gr/m²

Hr102	Hr102		Hr102	Hr102		Hr102	Hr102	
Dove	Dove		Dove	Cheyenne		Cheyenne	Cheyenne	REP1
Dove	Dove		Dove	Cheyenne		Cheyenne	Cheyenne	
Hr102	Hr102		Hr102	Hr200		R200	R200	
Hr102	Hr102		Hr102	Hr200		R200	R200	REP2
Hr200	Hr200		Hr200	Dove		Dove	Dove	
Hr200	Hr200		Hr200	Dove		Dove	Dove	
Cheyenne	Cheyenne		Cheyenne	Hr102		Hr102	Hr102	REP3
Cheyenne	Cheyenne		Cheyenne	Hr102		Hr102	Hr102	
Cheyenne	Cheyenne		Cheyenne	Hr200		R200	R200	
Cheyenne	Cheyenne		Cheyenne	Hr200		R200	R200	REP3
Dove	Dove		Dove	Hr102		Hr102	Hr102	
Dove	Dove		Dove	Hr102		Hr102	Hr102	
Hr102	Hr102		Hr102	Hr102		Hr102	Hr102	

allée 5 mètres

Hr102	Hr102		Hr102	Hr102		Hr102	Hr102	
Hr200	Hr200		Hr200	Baccara		Baccara	Baccara	REP1
Hr200	Hr200		Hr200	Baccara		Baccara	Baccara	
Cheyenne	Cheyenne		Cheyenne	Dove		Dove	Dove	
Cheyenne	Cheyenne		Cheyenne	Dove		Dove	Dove	REP2
Baccara	Baccara		Baccara	Cheyenne		Cheyenne	Cheyenne	
Baccara	Baccara		Baccara	Cheyenne		Cheyenne	Cheyenne	
Dove	Dove		Dove	Hr200		Hr200	Hr200	REP3
Dove	Dove		Dove	Hr200		Hr200	Hr200	
Cheyenne	Cheyenne		Cheyenne	Dove		Dove	Dove	
Cheyenne	Cheyenne		Cheyenne	Dove		Dove	Dove	REP3
Baccara	Baccara		Baccara	Hr200		Hr200	Hr200	
Baccara	Baccara		Baccara	Hr200		Hr200	Hr200	
Hr102	Hr102		Hr102	Hr102		Hr102	Hr102	

allée 5 mètres

Hr102	Hr102		Hr102	Hr102		Hr102	Hr102	
Baccara	Baccara		Baccara	Hr200		Hr200	Hr200	REP1
Baccara	Baccara		Baccara	Hr200		Hr200	Hr200	
Dove	Dove		Dove	Cheyenne		Cheyenne	Cheyenne	
Dove	Dove		Dove	Cheyenne		Cheyenne	Cheyenne	REP2
Cheyenne	Cheyenne		Cheyenne	Baccara		Baccara	Baccara	
Cheyenne	Cheyenne		Cheyenne	Baccara		Baccara	Baccara	
Hr200	Hr200		Hr200	Dove		Dove	Dove	REP3
Hr200	Hr200		Hr200	Dove		Dove	Dove	
Dove	Dove		Dove	Cheyenne		Cheyenne	Cheyenne	
Dove	Dove		Dove	Cheyenne		Cheyenne	Cheyenne	REP3
Hr200	Hr200		Hr200	Baccara		Baccara	Baccara	
Hr200	Hr200		Hr200	Baccara		Baccara	Baccara	
Hr102	Hr102		Hr102	Hr102		Hr102	Hr102	

allée 5 mètres

Hr102	Hr102		Hr102	Hr102		Hr102	Hr102	
Dove	Dove		Dove	Cheyenne		Cheyenne	Cheyenne	REP1
Dove	Dove		Dove	Cheyenne		Cheyenne	Cheyenne	
Baccara	Baccara		Baccara	Hr200		Hr200	Hr200	
Baccara	Baccara		Baccara	Hr200		Hr200	Hr200	REP2
Hr200	Hr200		Hr200	Dove		Dove	Dove	
Hr200	Hr200		Hr200	Dove		Dove	Dove	
Cheyenne	Cheyenne		Cheyenne	Baccara		Baccara	Baccara	REP3
Cheyenne	Cheyenne		Cheyenne	Baccara		Baccara	Baccara	
Cheyenne	Cheyenne		Cheyenne	Hr200		Hr200	Hr200	
Cheyenne	Cheyenne		Cheyenne	Hr200		Hr200	Hr200	REP3
Dove	Dove		Dove	Baccara		Baccara	Baccara	
Dove	Dove		Dove	Baccara		Baccara	Baccara	
Hr102	Hr102		Hr102	Hr102		Hr102	Hr102	

allée 5 mètres

Hr102	Hr102		Hr102	Hr102		Hr102	Hr102	
Baccara	Baccara		Baccara	Hr200		Hr200	Hr200	REP1
Baccara	Baccara		Baccara	Hr200		Hr200	Hr200	
Dove	Dove		Dove	Cheyenne		Cheyenne	Cheyenne	
Dove	Dove		Dove	Cheyenne		Cheyenne	Cheyenne	REP2
Baccara	Baccara		Baccara	Cheyenne		Cheyenne	Cheyenne	
Baccara	Baccara		Baccara	Cheyenne		Cheyenne	Cheyenne	
Dove	Dove		Dove	Hr200		Hr200	Hr200	REP3
Dove	Dove		Dove	Hr200		Hr200	Hr200	
Dove	Dove		Dove	Cheyenne		Cheyenne	Cheyenne	
Dove	Dove		Dove	Cheyenne		Cheyenne	Cheyenne	REP3
Hr200	Hr200		Hr200	Baccara		Baccara	Baccara	
Hr200	Hr200		Hr200	Baccara		Baccara	Baccara	
Hr102	Hr102		Hr102	Hr102		Hr102	Hr102	

ANNEXE 2

Caractéristiques physico-chimiques du sol (INRA, Laboratoire d'analyses des sols d'Arras)

	GRIGNON		MONS	
	2002-2003	2003-2004	2002-2003	2003-2004
	Exp.1	Exp.2	Exp.3	Exp.4
Analyse granulométrique (% de terre fine)				
Argile	21.0	21.6	17.2	20.4
Limons fins	21.8	23.8	30.9	30.1
Limons grossiers	48.5	45.1	45.0	42.3
Sables fins	6.7	6.6	5.5	5.8
Sables grossiers	1.9	1.8	1.4	1.4
Analyse chimique de la terre fine				
pH	7.3	7.9	7.8	7.5
Carbone organique (g kg⁻¹)	15.52	13.49	9.17	8.91
Azote total (g kg⁻¹)	1.22	1.33	0.962	0.974
C/N	12.72	10.14	9.53	9.15
Matière organique (g kg⁻¹)	26.7	23.2	15.9	15.4
Calcaire (CaCO₃) total (g kg⁻¹)	1.00	1.11	1.98	1.98
Phosphore (P₂O₅) (g kg⁻¹)	0.152	0.153	0.266	0.291
Magnésium (MgO) (g kg⁻¹)	0.0200	0.0214	0.0669	0.0929
Potassium (K₂O) (g kg⁻¹)	0.198	0.174	0.237	0.307

ANNEXE 3

Itinéraire technique et dates de mesures pour chaque essai

Etat structural	Date de semis
Non tassé : NT	Octobre : D1
Tassé : T	Novembre : D2
	Février-mars : D3

Grignon 2002-2003 : exp.1

Précédent : Escourgeon

Date	Opérations techniques	Mesures
Fin juillet	100 u P K, enlèvement des pailles d'escourgeon, cover-crop après récolte d'escourgeon	
04/10/02	Labour D1 Herse rotative tasse avant avec jumelage (2 passages) pour T Semis pois et orge D1	
8/10/02	Challenge (herbicide) pois D1	
17-25/10/02		<i>Comptages levée tous les 2 jours D1</i>
28/10/02	Labour D2 et D3 Tassement pour T en D2 et D3	
12/11/02		<i>Prélèvement plante 1 D1</i>
14/11/02	Herse alternative et semis de pois et orge D2	
15/11/02	Quartz sur orge et Challenge sur pois D2	
26/11/02		<i>Prélèvement sol 1 D1 et D2</i>
09/12/02		<i>Prélèvement plante 2 D1</i>
16-30/12/02		<i>Comptages levée tous les 2-3 jours D2</i>
16/01/03		<i>Prélèvement plante 3 D1 et D2</i>
06/02/03		<i>Profils racinaires D1 et D2 Installation sondes TDR</i>
11/02/03		<i>Prélèvement plante 4 D1 et D2</i>
18/02/03		<i>Prélèvement sol 2 D1 et D2</i>
26/02/03	Semis de pois et orge D3 Centaure (herbicide) pois D3 Traitement préventif anthracnose D1 et D2	
04/03/03		<i>Prélèvement sol 3 D3</i>
06/03/03		<i>Profils racinaires D1 et D2</i>
10/03/03		<i>Prélèvement plante 5 D1 et D2</i>
11/03/03		<i>Prélèvement sol 4 D1 et D2</i>
20-28/03/03		<i>Comptages levée tous les 2 jours D3</i>
25/03/03	Décis Micro (sitones) les 3 dates de semis	<i>Profils racinaires D1 et D2</i>
07/04/03		<i>Profils racinaires D3</i>
08/04/03		<i>Prélèvement plante 6 D1, D2 et D3 Prélèvement sol 5 D1, D2 et D3 Caractérisation des états structuraux et densité apparente</i>
16/04/03	Décis Micro (sitones) les 3 dates de semis	
24/04/03	Maori (fongicide) D1	<i>Profils racinaires D3</i>
29/04/03	Maori (fongicide) D2	
Du 25/04/03 au 10/05/03		<i>Prélèvements DF en D2 pour Baccara, Cheyenne et Dove</i>
12/05/03		<i>Prélèvement plante 7 D1, D2 et D3</i>
14/05/03		<i>Prélèvement sol 6 D1, D2 et D3</i>
16/05/03	Best (fongicide) sur pois les 3 dates de semis	
22/05/03		<i>Profils racinaires D3</i>
Du 22/05/03 au 30/05/03		<i>Prélèvements DF en D3 pour Baccara, Cheyenne et Dove et tous les Hr200</i>
23/05/03	Maori + Décis les 3 dates de semis	
02/06/03		<i>Prélèvement plante 8 D1, D2 et D3</i>
03/06/03		<i>Prélèvement sol 7 D1, D2 et D3</i>
A partir du 24/06/03		<i>Prélèvements récolte</i>
26/06/03		<i>Profils racinaires D1, D2 et D3</i>
27/06/03		<i>Prélèvement sol 8 D1, D2 et D3</i>
04/07/03		<i>Dernier prélèvement plante</i>

Grignon 2003-2004 : exp.2

Précédent : Escourgeon

Date	Opérations techniques	Mesures
Fin juillet	enlèvement des pailles d'escourgeon, cover-crop après récolte d'escourgeon	
02/09/03	100 u P K	
13/10/03	Labour D1 Herse rotative tasse avant avec jumelage (2 passages) pour T Semis pois et orge D1 Challenge (herbicide) pois D1	
23/10/03		<i>Prélèvement sol 1 D1</i>
03/11/03	Labour D2 et D3 Tassement pour T en D2 et D3	
04-15/11/03		<i>Comptages levée D1</i>
13/11/03	Herse rotative et semis de pois et orge D2	
18/11/03	Quartz sur orge et Challenge sur pois D2	
20/11/03		<i>Prélèvement sol 2 D2</i>
28-29/11/03		<i>Installation sondes TDR D2</i>
05-30/12/03		<i>Comptages levée D2</i>
06/01/04		<i>Prélèvement plante 1 D1 et D2</i>
02/02/04		<i>Prélèvement plante 2 D1 et D2</i>
04/02/04		<i>Profils racinaires D1 et D2</i>
05/02/04	Semis de pois et orge D3	
11/02/04	Challenge sur D3	<i>Prélèvement sol 3 D3</i>
17/02/04		<i>Prélèvement plante 3 D1 et D2</i>
02/03/04		<i>Profils racinaires D1 et D2</i>
05/03/04		<i>Prélèvement plante 4 D1 et D2</i>
12/03/04		<i>Installation sondes TDR D3</i>
Du 18/03 au 01/04/04		<i>Comptages levée D3</i>
25/03/04		<i>Profils racinaires D3</i>
30/03/04		<i>Comptages levée D1 et D2</i>
05/04/04		<i>Prélèvement plante 5 D1, D2 et D3</i>
14/04/04	Maori et Clameur (sitones, thrips et anthracnose)	
15/04/04		<i>Profils racinaires D3</i>
27/04/04		<i>Profils racinaires D1, D2 et D3</i>
29-10/05		<i>Prélèvements DF D1 pour Baccara, Cheyenne et Dove</i>
03/05/04		<i>Prélèvement plante 6 D1, D2 et D3</i>
12/05/04		<i>Prélèvements DF D2 pour Cheyenne et Dove</i>
12/05/04		<i>Caractérisation des états structuraux et densité apparente</i>
14/05/04	Maori + Décis les 3 dates de semis	
Du 22/05 au 01/06/04		<i>Prélèvements DF D3 pour Baccara, Cheyenne et Dove et Hr200 pour les 3 dates de semis</i>
27/05/04	Traitement fongicide les 3 dates de semis	<i>Profils racinaires D3</i>
07/06/04		<i>Prélèvement plante 7 D1, D2 et D3</i>
10/06/04	Irrigation les 3 dates de semis 35 mm	
A partir du 21/06/04		<i>Début des prélèvements récolte</i>
24/06/04		<i>Profils racinaires D1, D2 et D3</i>
05/07/04		<i>Prélèvement plante 8 D1, D2 et D3 pour Hr200</i>
20/07/04		<i>Dernier prélèvement récolte</i>
27/07/04		<i>Prélèvement de sol 5 D1, D2 et D3</i>

Mons 2002-2003 : exp.3

Précédent : Blé tendre d'hiver

Date	Opérations techniques	Mesures
07/10/02	Labour et semis D1 Herbicide D1	
31/10/02	Herbicide et fongicide D1	
30/10/02	Labour, tassement et semis D2 Herbicide D2	
<i>06/12/02</i>		<i>Prélèvement sol 1 D1 et D2</i>
<i>27/01/03</i>		<i>Prélèvement plante 1 D1 et D2</i>
<i>26/02/03</i>		<i>Prélèvement plante 2 D1 et D2 Profils racinaires D1 et D2 Prélèvement sol 1 D1 et D2</i>
27/02/03	Labour, tassement et semis D3	
10/03/03	Herbicide D3	
<i>19/03/03</i>		<i>Prélèvement plante 3 D1, D2 et D3 Profils racinaires D1 et D2 Prélèvement sol 3 D1, D2 et D3</i>
<i>20/03/03</i>		<i>Caractérisation des états structuraux et densité apparente</i>
<i>15/04/03</i>		<i>Prélèvement plante 4 D2 et D3 Profils racinaires D2 et D3 Prélèvement sol 3 D2 et D3</i>
05/05/04	Fongicide D1 et D2	
09/05/04	Insecticide D2 et D3	
15/05/04	Fongicide et insecticide D1, D2 et D3	
<i>21/05/03</i>		<i>Prélèvement plante 5 D2 et D3 Profils racinaires D3 Prélèvement sol 4 D2 et D3</i>
03/06/04	Fongicide D1 et D2	
08/06/04	Fongicide et insecticide D1, D2 et D3	
<i>11-12/06/03</i>		<i>Prélèvement plante 6 D2 et D3 Profils racinaires D2 et D3 Prélèvement sol 5 D2 et D3</i>
<i>08/07/03</i>		<i>Prélèvement plante 7 D3 Profils racinaires D3 Prélèvement sol 6 D2 et D3</i>
<i>18/07/03</i>		<i>Dernier prélèvement plante</i>

Remarque :

la date de levée et les prélèvements aux stades DF et MP ont été faits par l'équipe technique de génétique et amélioration des plantes de Mons

Mons 2003-2004 : exp.4

Précédent : Blé tendre d'hiver

Date	Opérations techniques	Mesures
30/09/03	Labour et semis D1 Herbicide D1	
06/11/03	Herbicide et fongicide D1	
20/11/03	Labour, tassement et semis D2 Herbicide D2	
<i>10/12/03</i>		<i>Prélèvement sol 1 D1 et D2</i>
<i>21/01/04</i>		<i>Prélèvement plante 1 D1 et D2</i>
<i>17/02/04</i>		<i>Prélèvement plante 2 D1 et D2</i>
04/03/04	Labour, tassement et semis D3	
<i>23/03/04</i>		<i>Prélèvement plante 3 D1 et D2 Prélèvement sol 2 D3</i>
24/03/04	Fongicide et insecticide D1	
15/04/04	Herbicide D3	
<i>20/04/04</i>		<i>Prélèvement plante 4 D1, D2 et D3</i>
<i>21/04/04</i>		<i>Caractérisation des états structuraux et densité apparente</i>
<i>11/05/04</i>		<i>Prélèvement plante 5 D1, D2 et D3</i>
13/05/04	Fongicide D1 et D2	
15/05/04	Insecticide D2 et D3	
18/05/04	Fongicide et insecticide D1, D2 et D3	
26/05/04	Fongicide D1 et D2	
06/06/04	Fongicide et insecticide D1, D2 et D3	
<i>15/06/04</i>		<i>Prélèvement plante 6 D1, D2 et D3</i>
<i>07/07/04</i>		<i>Prélèvement plante 7 D1, D2 et D3</i>
<i>21/07/04</i>		<i>Dernier prélèvement plante Prélèvement sol 3 D1, D2 et D3</i>

Remarque :

la date de levée et les prélèvements aux stades DF et MP ont été faits par l'équipe technique de génétique et amélioration des plantes de Mons

ANNEXE 4

**Photos de profils culturaux
(le 19/03/2003, Mons)**

Traitement non tassé, semis du 30/09/02, Dove

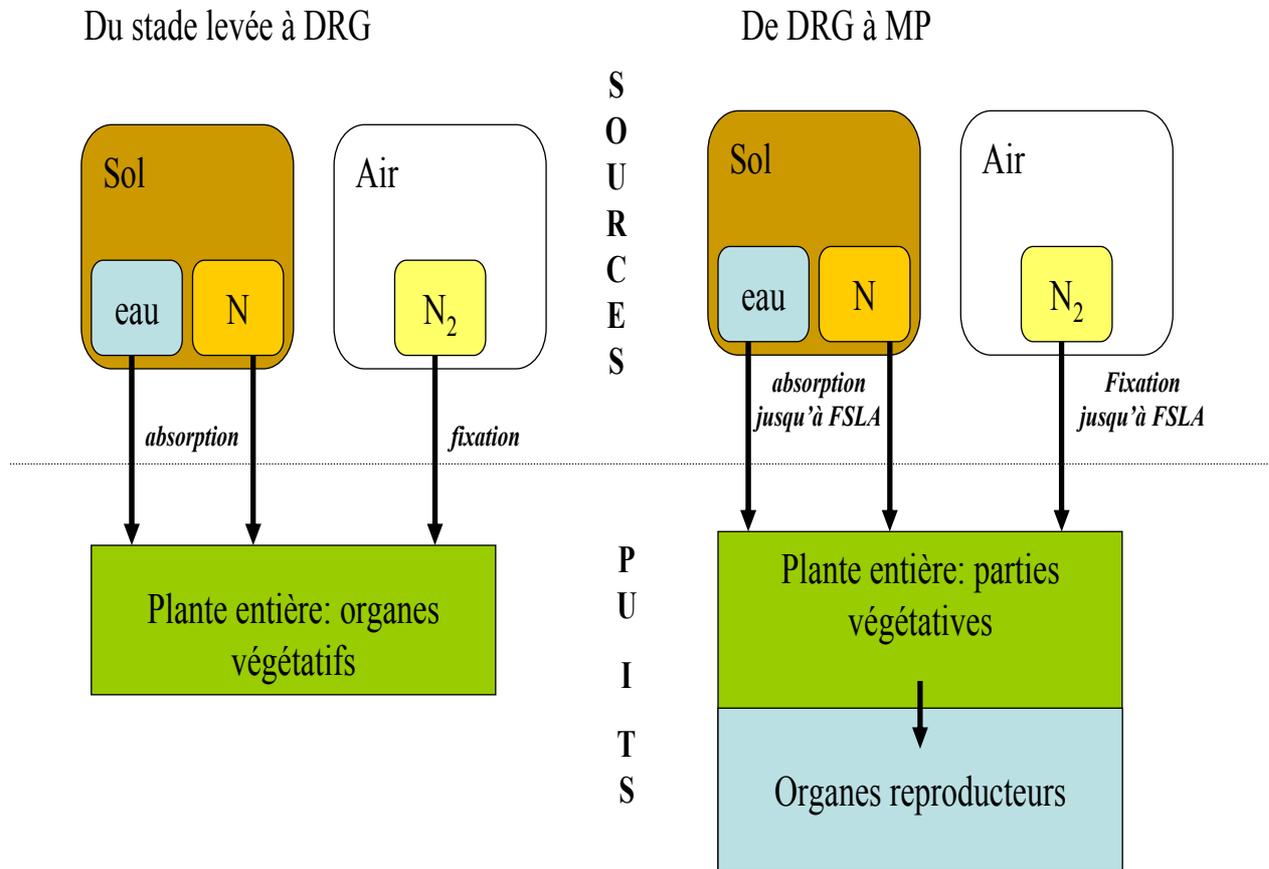


Traitement tassé, semis du 30/09/02, Dove



ANNEXE 5

Sources et les puits de carbone, d'azote et d'eau, en fonction du stade de développement de la culture



ANNEXE 6
Sous-module hydrique AFILA/AFISOL

1. Présentation générale

Le sol est divisé en trois compartiments :

- épaisseur du lit de semence : els,
- horizon avec racines : C1,
- horizon sans racine : C2.

Les données d'entrée de ce module sont :

- els,
- la profondeur maximale d'enracinement : profmax,
- RUm_{ax} : quantité d'eau du sol à la capacité au champ (en mm),
- RUse_{mis} si valeur existante, sinon calculé par bilan hydrique initialisé le 01/09

D'après AFILA, les racines de pois peuvent absorber de l'eau jusque 200 mm en dessous de profmax. Comme dans AFILA, le paramètre Profbil=profmax + 200 a donc été ajouté.
Comme dans AFILA, tout le bilan est initialisé à la levée.

2. Description des équations

Les paramètres sont signalés en gras

Détermination des jours sans apport d'eau : Valeur(j)

Si date < levée,

Alors Valeur(j)=0,

Sinon si $P(j)+I(j)>4$;

Alors Valeur(j)=0,

Sinon Valeur(j)=1

Somme des jours sans apport d'eau : JSA(j)

$JSA(j)=\text{valeur}(j)+JSA(j-1)$

Transpiration journalière (mm) : TR(j)

Si date < levée,

Alors TR(j)=0,

$\text{Sinon } TR(j) = \max(0 ; \min(\text{stockC1apdrainage}(j-1) ; \epsilon_i(j) \times 1.2 \times ETP(j) \times 1.05 / (1 + 4.5 \times \exp(-9 \times (\text{ftsw}(j-1) - 0.085))))))$

Evaporation journalière (mm) : EV(j)

Si date < levée,

Alors EV(j)=0,

$\text{Sinon } EV(j) = \max(ETP(j) \times ((JSA(j) + 1)^{0.5} - JSA(j)^{0.5}) \times (1 - \epsilon_i(j)) ; 0)$

Teneur en eau du 2nd compartiment mm eau/mm sol : TER2(j)

Si date < levée,

Alors TER2(j)=0,

$\text{Sinon } TER2(j) = \text{stockC2apdrainage}(j-1) / (\text{profbil} - \text{profrac}(j-1))$

Drainage quotidien de els vers C1 : Dels(j)

Si date < levée,

Alors Dels(j)=0,

$\text{Sinon } Dels(j) = \max(\text{stockelsavdrainage}(j-1) - \text{stockelscc}(j-1) ; 0)$

Drainage quotidien de C1 vers C2 : D1(j)

Si date < levée,

Alors D1(j)=0,

$\text{Sinon si } \text{stockC1avdrainage}(j-1) - \text{stockC1cc}(j-1) > 0 ;$

Alors $D1(j) = \text{stockC1avdrainage}(j-1) - \text{stockC1cc}(j-1)$;
sinon $D1(j)=0$

Drainage quotidien de C2 : $D2(j)$

Si $\text{date} < \text{levée}$,

Alors $D2(j)=0$,

Sinon si $\text{stockC2avdrainage}(j-1) - \text{stockC2cc}(j-1) > 0$;

Alors $D2(j) = \text{stockC2avdrainage}(j-1) - \text{stockC2cc}(j-1)$;

sinon $D2(j)=0$

stock à la capacité au champ dans els : $\text{stockccels}(j)$

Si $\text{date} < \text{levée}$,

Alors $\text{stockccels}(j)=0$,

Sinon $\text{stockccels}(j) = \text{els} \times \text{RUmax} / \text{profmax}$

stock avant drainage dans els : $\text{stockelsavdrainage}(j)$

Si $\text{date} < \text{levée}$,

Alors $\text{stockelsavdrainage}(j)=0$,

Sinon si $\text{date}(j) = \text{levée}$, $\text{stockelsavdrainage}(j) = \text{els} \times \text{RUsemis} / \text{profmax}$

Sinon $\text{stockelsavdrainage}(j) = \max(\text{stockelsapdrainage}(j-1) + P(j) + I(j) - EV(j) ; 0)$

stock après drainage dans els : $\text{stockelsapdrainage}(j)$

$\text{stockelsapdrainage}(j) = \text{si}(\text{stockelsavdrainage}(j) > \text{stockccels}(j) ; \text{stockccels}(j) ; \text{stockelsavdrainage}(j))$

stock à la capacité au champ dans C1 : $\text{stockccC1}(j)$

Si $\text{date} < \text{levée}$,

Alors $\text{stockccC1}(j)=0$,

Sinon $\text{stockccC1}(j) = \max(0 ; (\text{profrac}(j) - \text{els}) \times \text{RUmax} / \text{profmax})$

stock avant drainage dans C1 : $\text{stockC1avdrainage}(j)$

Si $\text{date} < \text{levée}$,

Alors $\text{stockC1avdrainage}(j)=0$,

Sinon si $\text{date}(j) = \text{levée}$, $\text{stockC1avdrainage}(j) = (\text{profrac}(j) - \text{els}) \times \text{RUsemis} / \text{profmax}$

Sinon $\text{stockC1avdrainage}(j) = \max(\text{stockC1apdrainage}(j-1) + D\text{els}(j) + (\text{Profrac}(j) - \text{Profrac}(j-1))$

$\times \text{TER2}(j) - \text{EVbis}(j) - \text{TR}(j) ; 0)$

stock après drainage dans C1 : $\text{stockC1apdrainage}(j)$

$\text{stockC1apdrainage}(j) = \text{si}(\text{stockC1avdrainage}(j) > \text{stockccC1}(j) ; \text{stockccC1}(j) ; \text{stockC1avdrainage}(j))$

Evaporation dans C1 si stock d'eau pas suffisant dans els : $\text{EVbis}(j)$

Si $\text{date} \leq \text{levée}$,

Alors $\text{EVbis}(j)=0$,

Sinon $\text{EVbis}(j) = - \min(\text{stockelsapdrainage}(j) + P(j) + I(j) - EV(j) ; 0)$

stock à la capacité au champ dans C2 : $\text{stockccC2}(j)$

Si $\text{date} < \text{levée}$,

Alors $\text{stockccC2}(j)=0$,

Si $\text{date} = \text{levée}$

alors $\text{stockccC2}(j) = (\text{profbil} - \text{els}) \times \text{RUmax} / \text{profmax}$,

sinon $\text{stockccC2}(j) = (\text{profbil} - \text{profrac}(j)) \times \text{RUmax} / \text{profmax}$

stock avant drainage dans C2 : $\text{stockC2avdrainage}(j)$

Si $\text{date} < \text{levée}$,

Alors $\text{stockC2avdrainage}(j)=0$,

Sinon si $\text{date}(j) = \text{levée}$, $\text{stockC2avdrainage}(j) = (\text{profbil} - \text{els}) \times \text{RUsemis} / \text{profmax}$

Sinon si $\text{profrac}(j) \geq \text{profmax}$,

$\text{stockC2avdrainage}(j) = 0$,

sinon $\text{stockC2avdrainage}(j) = \max(\text{stockC2apdrainage}(j-1) + D1(j) - (\text{Profrac}(j) - \text{Profrac}(j-1)) \times$

$\text{TER2}(j) ; 0)$

Ftsw

Si date <levée,
Alors fsw(j)=0,
 Sinon si stockccC1(j) >0 ;
 Alors fsw(j)= stockC1apdrainage(j)/ stockccC1(j) ,
 Sinon fsw(j)=0

stock après drainage dans C2 : stockC2apdrainage(j)
stockC2apdrainage(j) = si(stockC2avdrainage(j)> stockccC2(j) ; stockccC2(j) ; stockC2avdrainage(j))

ANNEXE 7
Sous-module Azote-sol

CL est l'épaisseur de la couche labourée (donnée d'entrée)
els est l'épaisseur du lit de semence (donnée d'entrée)
profmax est la profondeur maximale d'enracinement (donnée d'entrée)

La quantité d'azote minérale disponible le jour j pour la racine : Nmin(j) et sert à déterminer l'effet de l'azote du sol sur la fixation.

Si profrac(j) < CL,
Nmin(j) = QN1(j) x CL / profrac(j)
Sinon = QN1(j) + QN2(j) x (profrac(j)-CL)/(profmax-CL)

QN1(j) est la quantité d'azote dans C1 : calcul plus loin dans le doc
QN2(j) est la quantité d'azote dans C2 : calcul plus loin dans le doc

Le facteur de variation de la minéralisation du sol en fonction de l'humidité du sol est calculé par :

Etape 1

Si profrac(j) > CL
Hurm(j) = (stockelsapdr(j) + stockC1apdr(j) + (stockC2apdr(j) x (CL - profrac(j))/(profmax-profrac(j)))) / CL
Sinon
Hurm(j) = (stockC1apdr(j) x (CL - els)/(profrac(j) - profmax)) + stockelsapdr(j) / CL

Etape 2

si date(j) < datemesureNminsol
alors fhum(j) = 0
sinon fhum(j) = MAX(0; (fhum + ((1-fhum)*(Hurm(j) - Rumini) / Rumax)))
fhum est un paramètre = 0.2 (feuille param)
Rumini sont les réserves utiles min et max, données d'entrée.

Calcul de dMh : minéralisation de l'humus

Si T°(j) < 0 alors dMh(j) = 0
Sinon dMh(j) = $(f(SDC) * \text{coeff formule du } K2 / (((\text{teneur en argile}/10) + \text{coeff argile formule } K2) * (\text{coeff CaCO3 formule } K2 + (\text{teneur en CaCO3}/10))) * \text{EXP}(\text{coeff temp formule } K2 * (T^\circ(j) - \text{Tref}(\text{minréalisation}H))) * (\%N/10) * \text{daCL} * \text{épaisseur CL} * 10000 * \text{beta coeff formule } K2)$
Les éléments en gras sont dans la feuille entrée (caractéristiques du sol) et ceux soulignés sont des paramètres

Calcul de f(T)(j) : action de la température sur les différents processus de minéralisation :

Si T°(j) < 0 alors f(T)(j) = 0
Sinon f(T)(j) = $\exp((0.115 * (T^\circ(j) - \text{Tref}))$
Avec Tref = 15°C

Calcul de dMa : minéralisation des amendements organiques :

Si T°(j) < 0 alors dMa(j) = 0
Si date(j) > levée et date(j) < 30/06 de l'année de récolte
Sinon dMa(j) = **Amendts orga** * fhum(j) * f(T)(j) / **f(T)printemps**
Sinon dMa(j) = 0

Amendts orga est issu des tables

f(T)printemps est la valeur du calcul (f(T)printps(j)) le 30/06 de l'année de récolte

Si date(j) > levée et date(j) < 30/06 de l'année de récolte

Sinon dMa(j) =

f(T)printps(j) = f(T)printps(j-1) + f(T)(j)

Calcul de dMr(j) : minéralisation des résidus de récolte :

Si T(j)>0

Si date(j)>levée et date(j)<30/06 de l'année de récolte

Si semis d'automne

dMr(j) = f(T)(j) x **précédent automne** / f(T)automne

sinon dMr(j) = f(T)(j) x **précédent printps** / f(T)printps/

précédent automne et printps sont issus des tables

f(T)automne est la somme des f(T(j))entre levée et le 02/02 de l'année de récolte

f(T)printps est la somme des f(T(j)) entre le 03/02 et le 30/06 de l'année de récolte

Dans C1, la quantité d'N minéralisée (dM1(j))est calculée par :

Si profrac(j)<CL

Alors

dM1(j)=(dMr(j) + dMa(j) + dMh(j)) x profrac(j) / (**épaisseur CL** x 100)

sinon dM1(j)= dMr(j) + dMa(j) + dMh(j)

et dans C2 (dM2(j)):

Si profrac(j)<CL

Alors

dM2(j)= (dMr(j) + dMa(j) + dMh(j))*(**épaisseur CL** *100-profrac(j))/(**épaisseur CL** *100)

sinon dM2(j)= dMr(j) + dMa(j) + dMh(j)

La fraction d'eau drainée de C1 vers C2 est estimée par Eaudr1(j):

Si date(j)>levée

Eaudr1(j) = PUISSANCE(drainage1vers2(j)/(stoccc1(j)/10+ drainage1vers2(j));profrac(j)/20)

Sinon Eaudr1(j) =0

drainage1vers2(j) est la quantité qui draine de C1 vers C2 (module hydrique) et stoccc1(j) est la quantité d'eau dans C1 à la capacité au champ (module hydrique)

et de C2 vers les horizons inférieurs : Eaudr2(j) :

si profrac(j)>profmax

Eaudr2(j) = 0,

Si date(j)<levée

Eaudr2(j) =0

Sinon Eaudr2(j)=PUISSANCE(drainage2versinf(j)/(drainage2versinf(j) + stoccc2(j)//10);(**profmax**-profrac(j)/20))

Drainage2versinf(j) est la quantité qui draine de C2 vers les horizons inférieurs (module hydrique) et stoccc2(j) est la quantité d'eau dans C2 à la capacité au champ (module hydrique)

Les pertes d'N de C1 vers C2 sont calculées par Npertes1(j) :

Si date(j)<levée

Npertes1(j) = Eaudr1(j) x QN1(j)

Sinon Npertes1(j) =0

et de C2 vers les horizons inférieurs : Npertes2(j) :

Npertes2(j) = Eaudr2(j) x QN2(j)

La quantité d'azote dans C1 est estimée par QN1(j) :

Si date(j)>levée

QN1(j) = QN1(j-1)+**Napp**+dM1(j-1)+(profrac(j)-profrac(j-1)) x %N2(j)-Nabs(j-1)-Npertes1(j-1)

Sinon QN1(j)=0

Napp sont les éventuels apports d'engrais N

%N2(j) est la teneur en N de C2 : =QN2(j)/(**profmax**-profrac(j))

Nabs(j-1) est la quantité d'N absorbée par la culture

Et dans C2 : $QN2(j)$:
 Si $\text{profrac}(j) < \text{profmax}$
 $QN2(j) = QN2(j-1) + \text{reliq} + dM2(j-1) - N\text{pertes}2(j) - (\text{profrac}(j) - \text{profrac}(j-1)) \times \%N2(j)$
 Sinon $QN2(j) = 0$
 Reliq est le reliquat d’N de la culture précédente

La quantité d’N disponible $QN\text{dispo}(j)$:
 Si $\text{date}(j) < \text{levée}$
 $QN\text{dispo}(j) = 0$
 Sinon $QN\text{dispo}(j) = \max(0; QN1(j) - QN\text{nondispo} * (\text{profrac}(j) - \text{els}))$

$QN\text{lessivée}(j) = \%N2(j) \times \text{drainage}2\text{versinf}(j) \times \text{daCL}$
daCL est la densité apparente de la couche labourée

d’où en cumulé : $QN\text{cumlessivée}(j) = QN\text{lessivée}(j) + QN\text{cumlessivée}(j-1)$
 la valeur prise à MP est une variable de sortie à valeur environnementale

et pour estimer le reliquat après récolte à MP $RAR(j)$::
 si $\text{date}(j) \geq \text{MP}$
 alors $\text{rar}(j) = QN1(j) + dM1(j)$
 sinon $\text{rar}(j) = QN1(j)$

ANNEXE 8

Effet des différents facteurs pris en compte dans le modèle AFISOL (état structural, période de semis, variété) sur les paramètres des équations de chaque sous-module.

Sous module	Effet	Etat structural	Période de semis	Variété
MODULE PLANTE				
Développement	Levée	non	oui	non
	IF	non	oui	non
	DF	non	oui	oui
	DRG	non	oui	non
	FSLA	non	non	oui
	MP	non	non	oui
Croissance	$\varepsilon_i : LAI = f(QNc)$	non	non	non
	$\varepsilon_i = f(LAI)$	non	oui	non
	ε_{bpot}	non	non	non
	RH	non	non	non
	RT	non	non	non
	Stress N	non	non	non
Azote	Besoins quotidiens (Vmax)	non	non	non
	%Nmax	non	non	non
	Fixation (%Nfixé et Nfixémax)	non	non	non
	Localisation nodules	oui	non	non
	N accumulé	non	non	non
Rendement et qualité	NGM ²	non	non	oui
	DGC	non	non	oui
	N1Gfsla	non	non	non
	QNG	non	non	oui
Enracinement	Vitesse d'enracinement	non	non	non
	Profondeur maximale	oui	non	non
MODULE SOL				
Minéralisation		oui	non	non
Hydrique		oui	non	non

ANNEXE 9 Calcul de la durée du jour

La durée du jour (DJ(j), en heures) est calculée par :

$$DJ(j) = (24/\pi) \times \arccos((-0.01453808 - \sin(\text{lati})) \times \sin(\text{decli}(j))) / (\cos(\text{lati}) \times \cos(\text{decli}(j)))$$

Avec lati, la latitude en radian

$$\text{Lati} = \text{lat} \times \pi / 180$$

Avec lat, la latitude en degré

Et decli(j), la déclinaison du soleil journalière en radian

$$\text{decli}(j) = -23.45 \times (\pi/180) \times \cos(360 \times (\pi/180) \times (t+10)/365)$$

avec t le nombre de jours depuis le 1^{er} janvier de l'année de récolte

Pour le modèle de Summerfield and Roberts (1988), la photopériode moyenne depuis levée (Pm(j), en heures) est calculée par :

$$Pm(j) = \sum_j (DJ(j))/(t - DL)$$

Avec DL la date de levée en nombre de jours depuis le 1^{er} janvier de l'année de récolte

La température moyenne depuis levée (Tm(j), en °C) est calculée par :

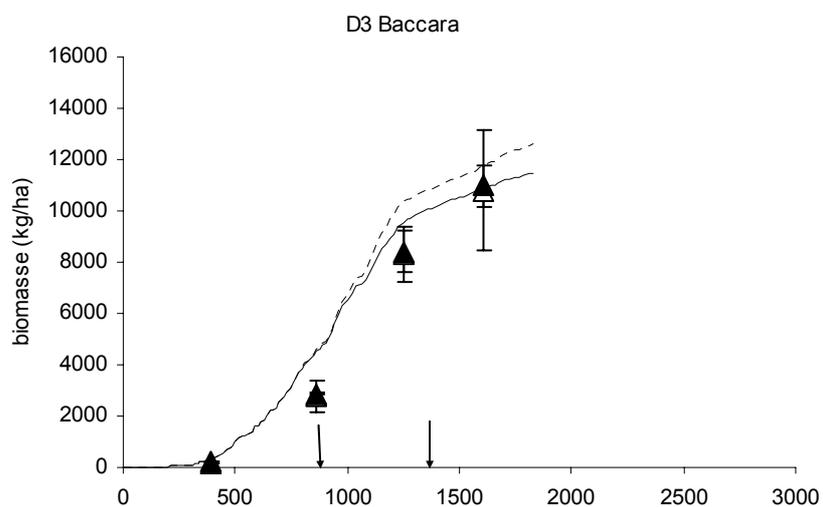
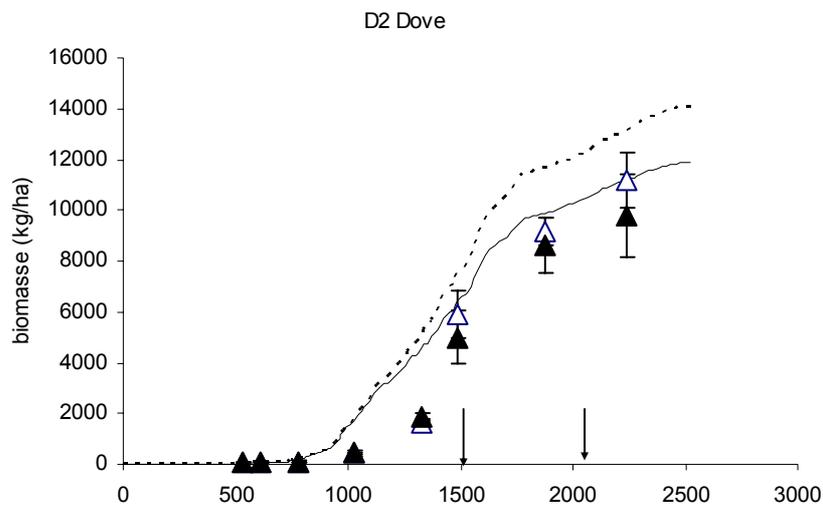
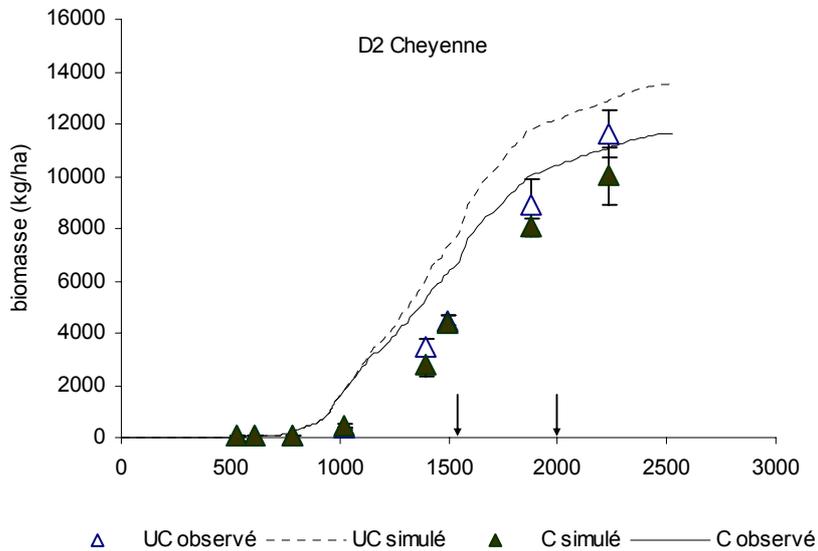
$$Tm(j) = \sum_j (T(j))/(t - DL)$$

Avec T(j) la température aérienne journalière en °C.

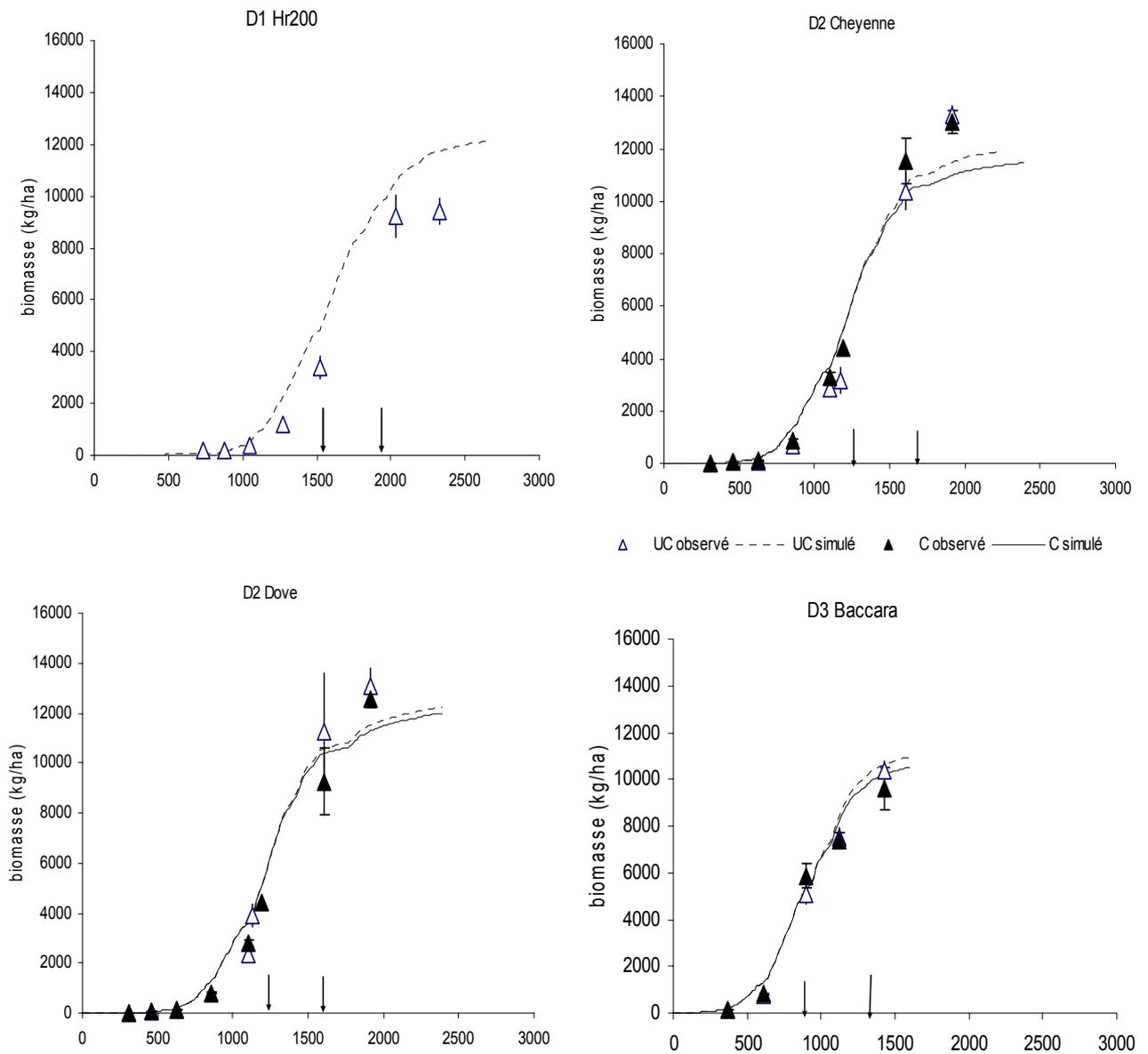
ANNEXE 10

Evaluation de la simulation de la dynamique d'accumulation de biomasse aérienne

Comparaison des valeurs observées et simulées par AFISOL de dynamiques d'accumulation de biomasse (kg ha^{-1}) dans les parties aériennes au cours du cycle de la culture (exp.3). Les deux flèches indiquent respectivement la date de début floraison et de la fin du stade limite d'avortement. Les barres verticales sont les écart-types des valeurs mesurées.



Comparaison des valeurs observées et simulées par AFISOL de dynamiques d'accumulation de biomasse (kg ha^{-1}) dans les parties aériennes au cours du cycle de la culture (exp.4). Les deux flèches indiquent respectivement la date de début floraison et de la fin du stade limite d'avortement. Les barres verticales sont les écart-types des valeurs mesurées.



ANNEXE 11

RMSEP et RRMSEP(entre parenthèses, %) totales des principales variables de sorties d'AFISOL pour les effets de l'état structural, la période de semis et la variété.

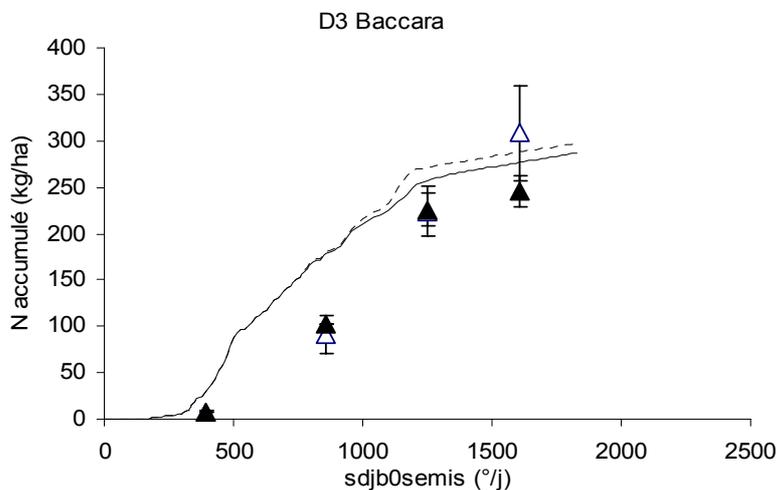
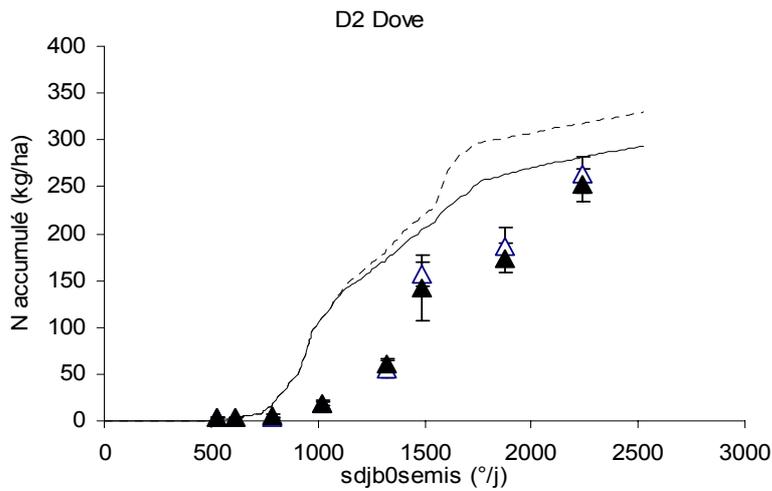
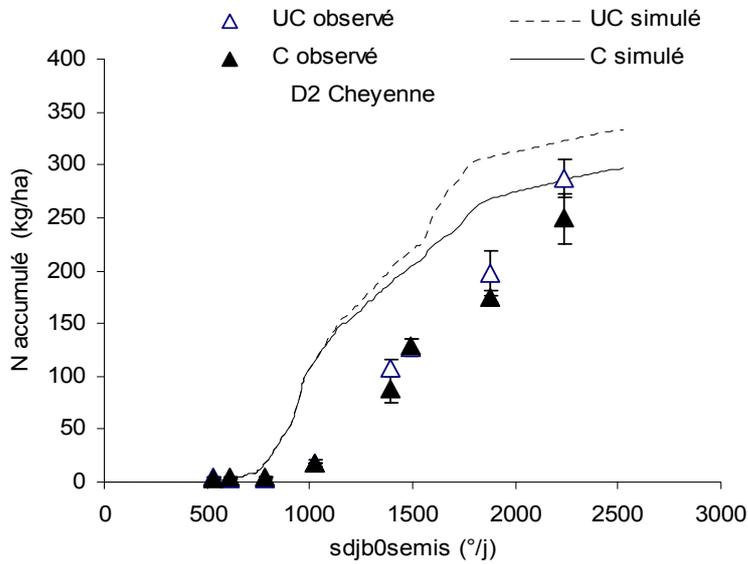
Pour l'effet de l'état structural, les valeurs du traitement D1 Hr200 n'ont pas été incluses dans les traitements tassés. Pour l'effet de la date de semis, pour D1, seuls les résultats de l'exp.4 ont été pris en compte (absence de valeurs pour l'exp.3 par perte de la culture), D2 est la moyenne des valeurs obtenues pour Cheyenne et Dove et D3 représente celles mesurées pour Baccara. Pour l'effet variété, seuls les traitements non tassés ont été considérés pour chaque variété.

	Etat structural	Date de semis			Variété		
	UC	C	D1	D2	D3	Cheyenne	Dove
Rdt	10 (13)	11 (16)	23 (48)	10 (13)	9 (14)	13 (17)	5 (6)
PIG	0.020 (9)	0.025 (12)	0.039 (28)	0.012 (6)	0.030 (11)	0.013 (7)	0.010 (6)
NGM²	510 (14)	388 (13)	1023 (28)	573 (13)	350 (15)	732 (18)	349 (8)
NET	1.80 (32)	1.90 (35)	0.28 (4)	2.08 (33)	2.90 (23)	0.8 (17)	2.8 (37)
HI	0.08 (13)	0.11 (19)	0.28 (56)	0.07 (12)	0.09 (15)	0.09 (15)	0.05 (8)
MStot	1340 (11)	1232 (11)	1773 (18)	1611 (11)	440 (4)	1617 (13)	1605 (13)
TP	2.6 (12)	2.2 (10)	4.2 (17)	1.8 (8)	3.7 (16)	1.4 (6)	2.1 (10)
QNG	46 (19)	38 (17)	73 (39)	50 (20)	35 (15)	58 (23)	41 (17)
QNveg	30 (37)	23 (33)	67 (75)	29 (30)	32 (65)	21 (25)	35 (32)
QNtot	38 (13)	28 (10)	6 (2)	49 (15)	13 (4)	48 (15)	44 (15)
RAR	26 (47)	48 (63)	62 (73)	36 (65)	34 (62)	35 (63)	36 (66)

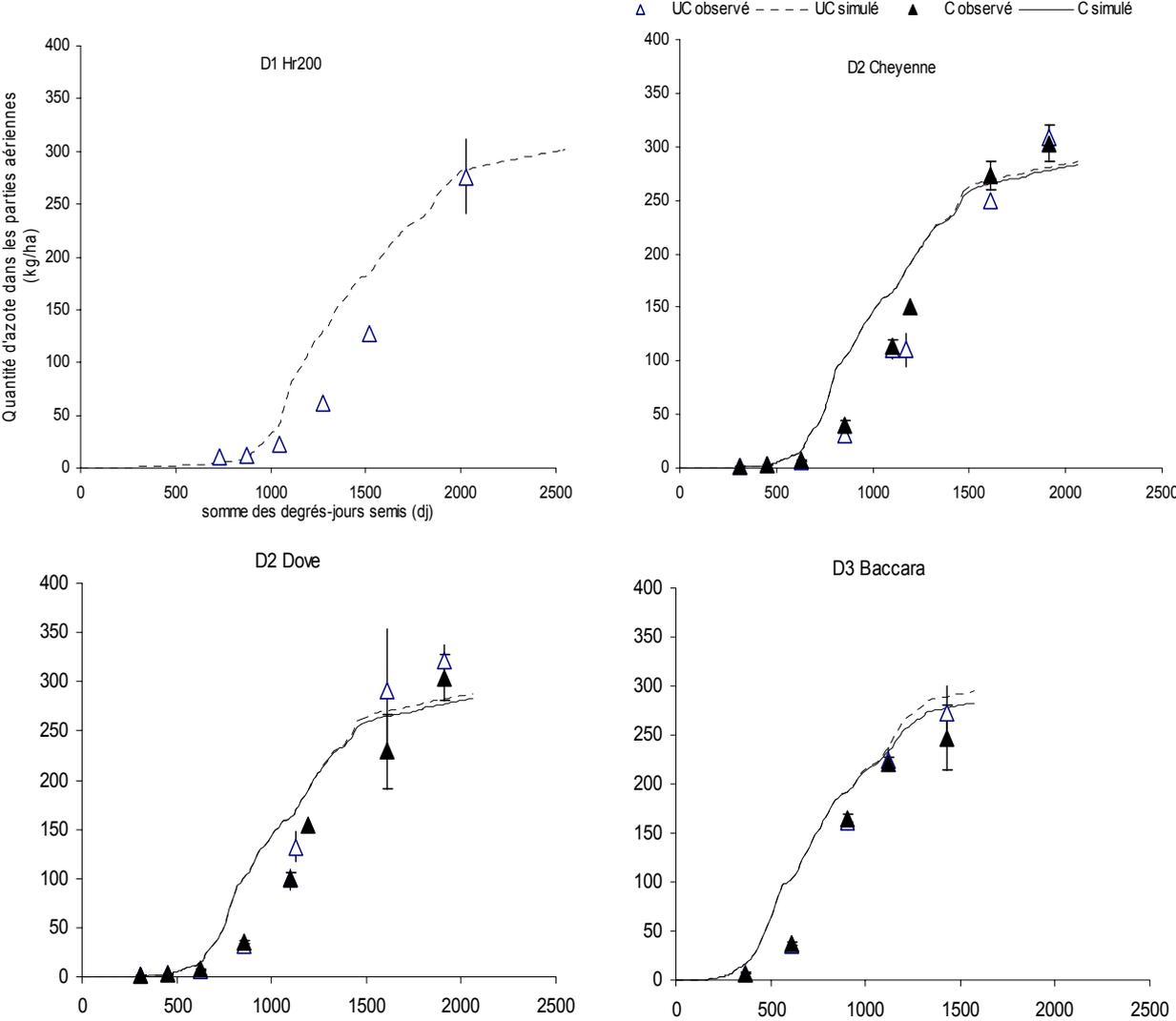
ANNEXE 12

Evaluation de la simulation de la dynamique d'accumulation d'azote dans les parties aériennes

Comparaison des valeurs observées et simulées par AFISOL de dynamiques d'accumulation d'azote (kgN ha^{-1}) dans les parties aériennes au cours du cycle de la culture (exp.3). Les barres verticales sont les écart-types des valeurs mesurées.

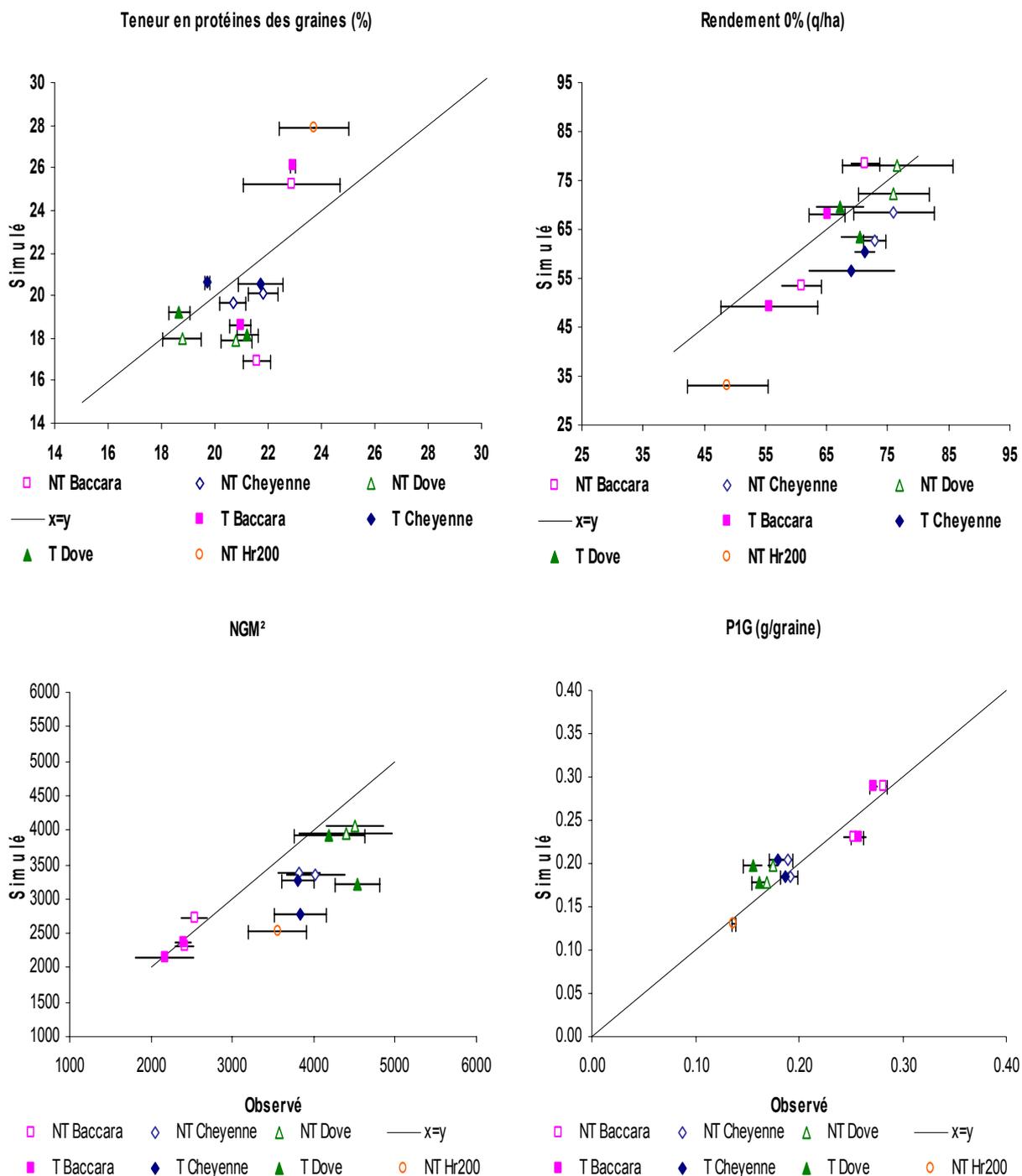


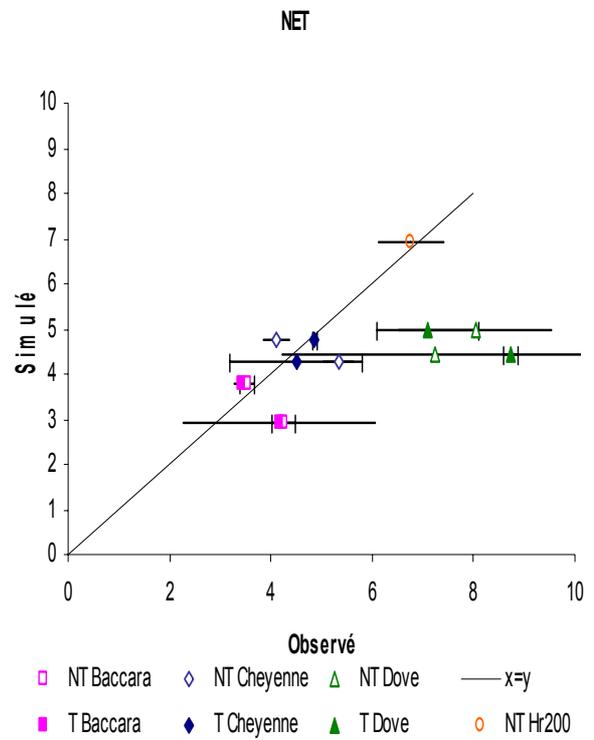
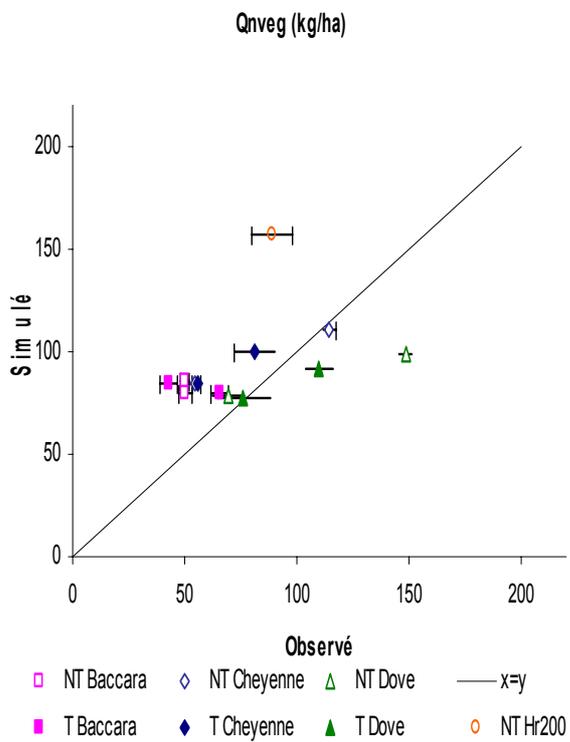
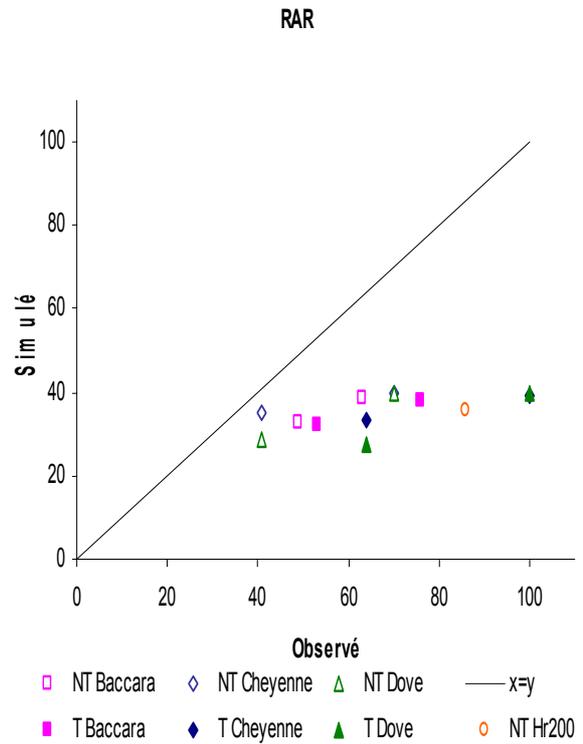
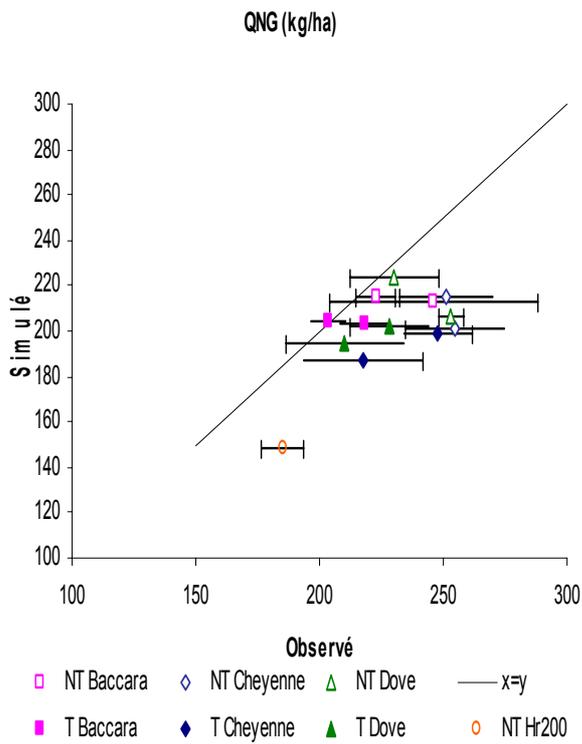
Comparaison observé/simulé de la dynamique d'accumulation d'azote (kg ha^{-1}) dans les parties aériennes au cours du cycle de la culture (exp.4). Les barres verticales sont les écart-types des valeurs mesurées.

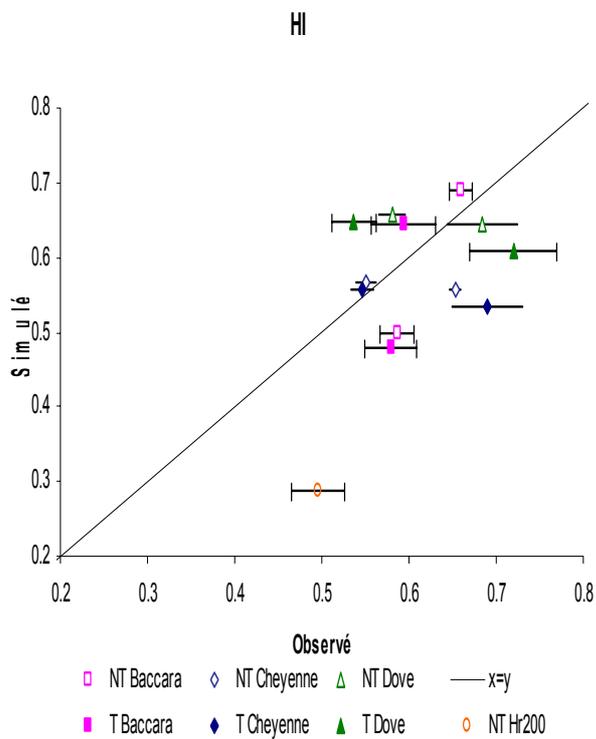
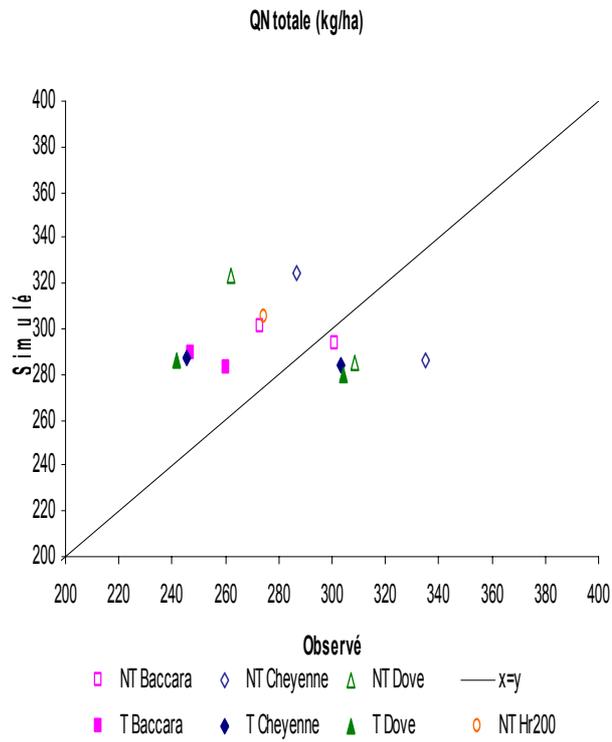
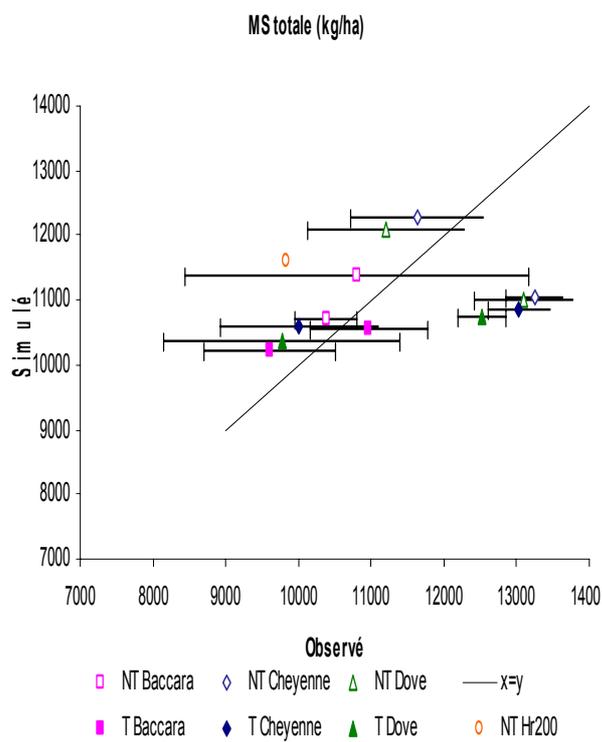


ANNEXE 13
Evaluation d'AFISOL sur quelques variables de sortie

Comparaison des valeurs observées et simulées par AFISOL de la teneur en protéines des graines, du rendement sec, du nombre de grains par m², du poids moyen sec d'une graine (PIG), de la quantité d'azote végétatif (QNveg), dans les graines (QNG) et total (QNtotal) à maturité, du nombre d'étages reproducteurs, de la quantité de biomasse totale (MStotale), de l'indice de récolte (HI) et du reliquat d'azote minéral dans le sol après récolte (RAR). Les barres horizontales représentent les écart-types des valeurs mesurées.

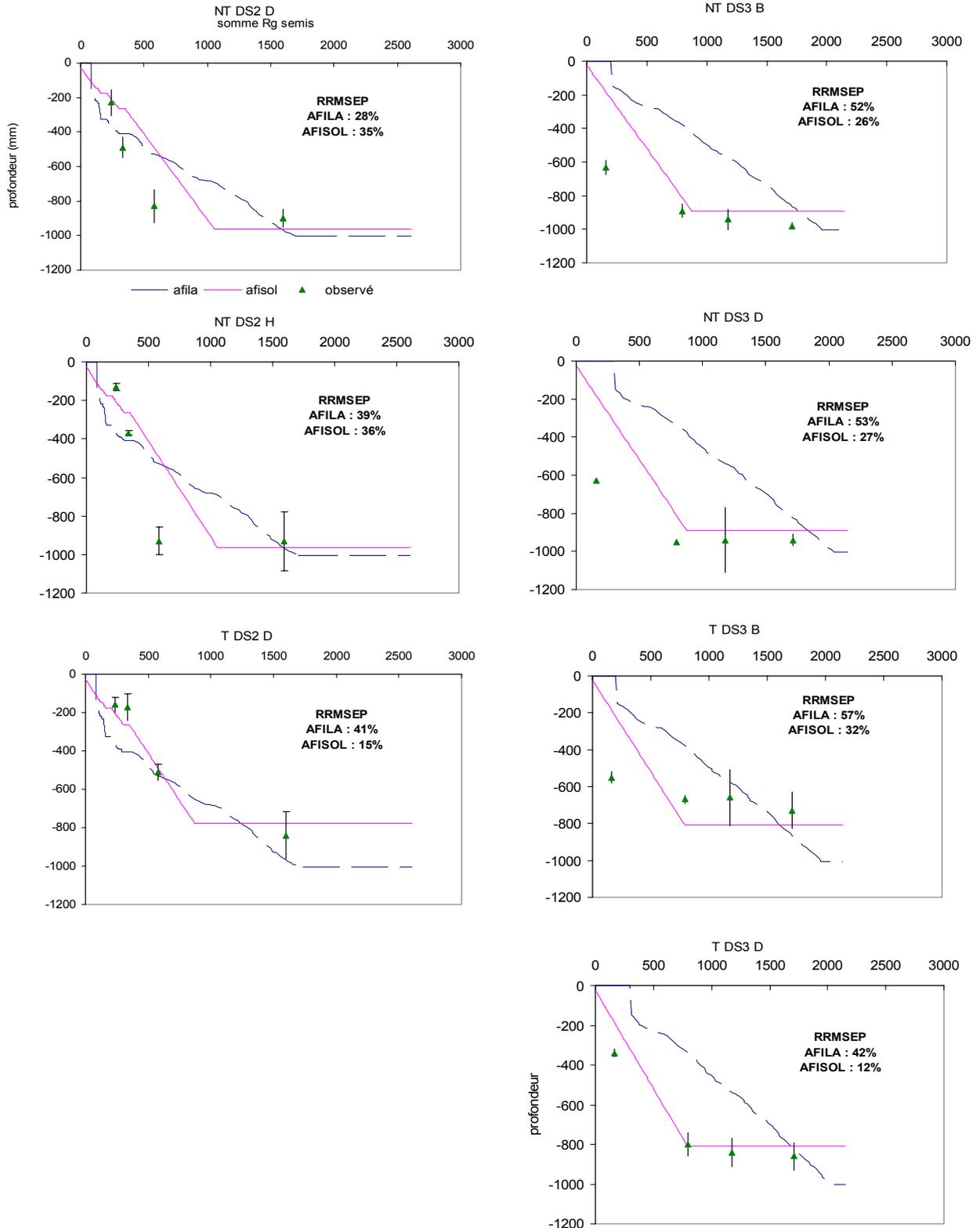






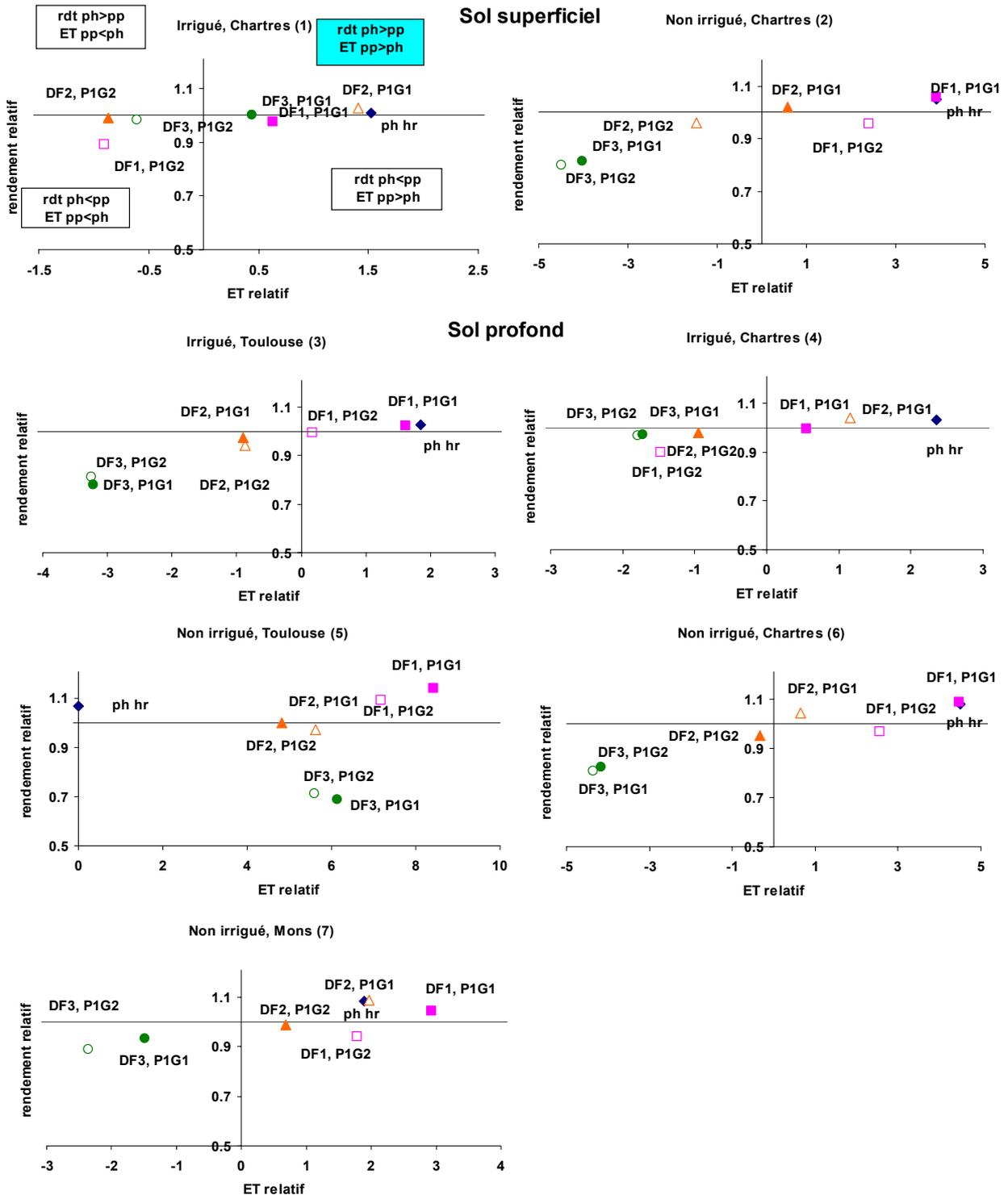
ANNEXE 14 Evaluation de simulation de la dynamique d'enracinement

Comparaison des valeurs observées et simulées par AFISOL (trait plein) et AFILA (trait pointillé) de la dynamique d'enracinement (exp.4). Les barres verticales représentent les écart-types des valeurs mesurées.

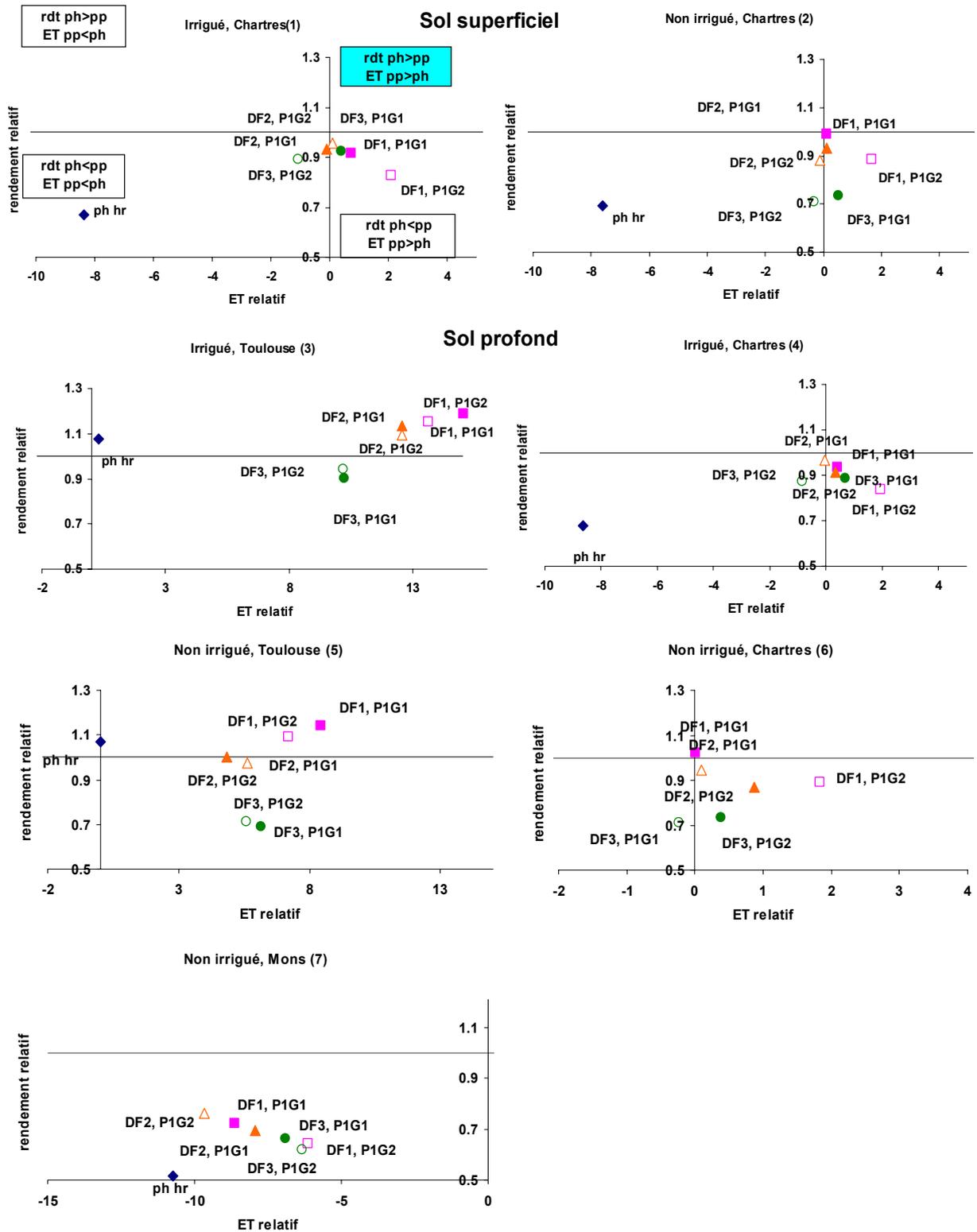


ANNEXE 15

Comparaison du rendement relatif (ratio du rendement du ph hr ou Hr / rendement du pp) et écart-type relatif (ET, différence des écarts types entre pp et ph hr ou Hr) des variétés virtuelles (DF x P1G) et de ph hr par rapport à pp en fonction des milieux pour un semis tardif, sans prise en compte des risques de gel. Les droites d'abscisse ET=0 et d'ordonnée rdt relatif = 1 permettent de séparer les situations selon respectivement leur variabilité et leur rendement (rdt) relatif comparativement à ceux du pp.

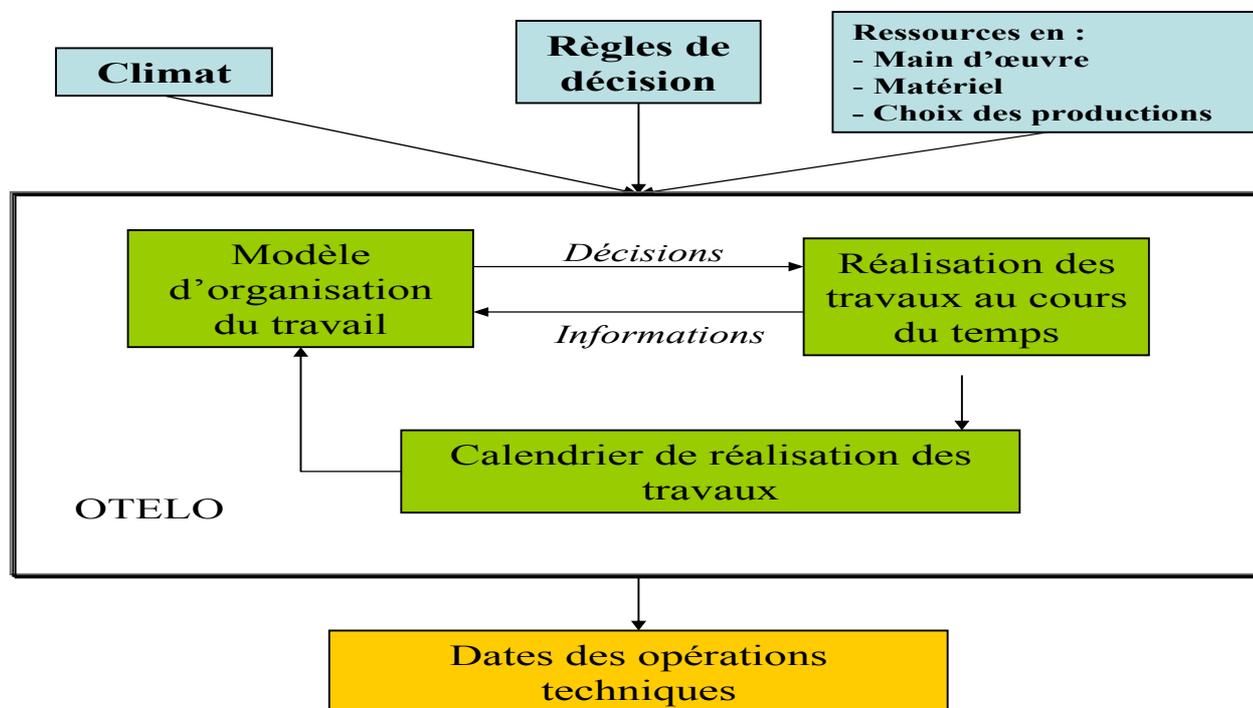


Comparaison du rendement relatif (ratio du rendement du ph hr ou Hr / rendement du pp) et écart-type relatif (ET, différence des écarts types entre pp et ph hr ou Hr) des variétés virtuelles (DF x P1G) et de ph hr par rapport à pp en fonction des milieux pour un semis tardif, avec prise en compte des risques de gel. Les droites d'abscisse ET=0 et d'ordonnée rdt relatif = 1 permettent de séparer les situations selon respectivement leur variabilité et leur rendement (rdt) relatif comparativement à ceux du pp.



ANNEXE 16
Modèle OTELO

1. Schéma de fonctionnement



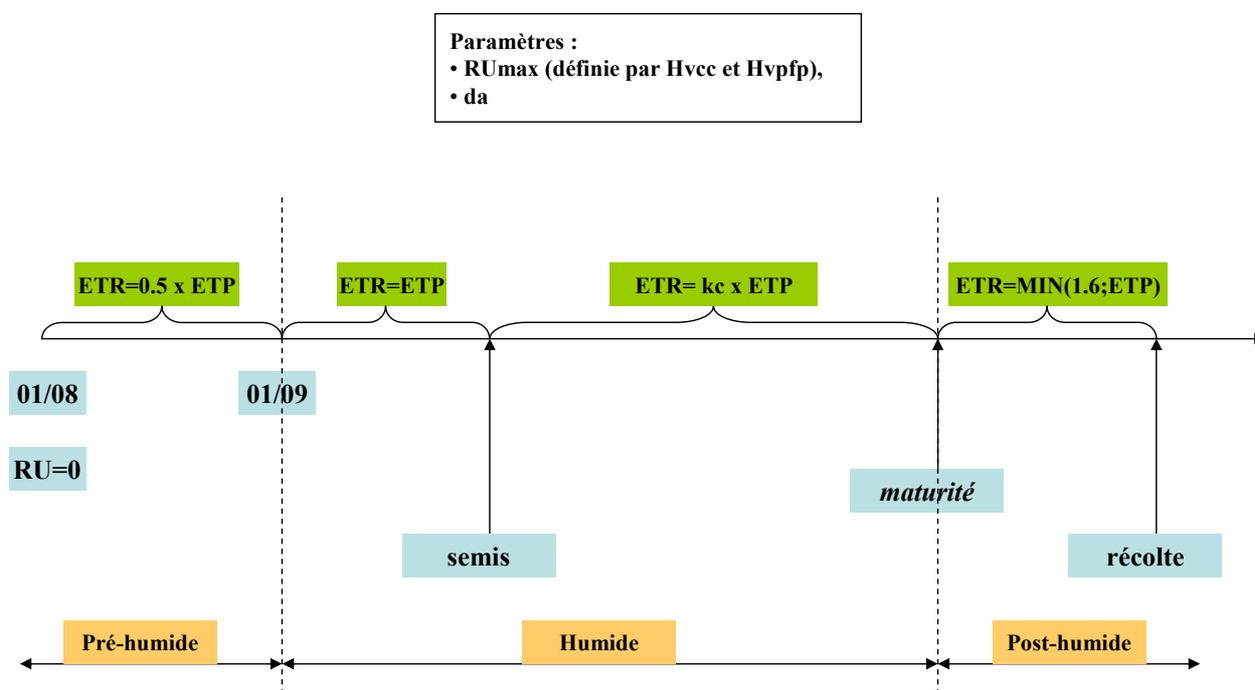
2. Exemple de questionnaire d'enquête à remplir avec l'exploitant pour la détermination de règle de décision pour OTELO

Culture : Blé tendre d'hiver

Succession des chantiers (enchaînement)	Chantiers	Conditions
semis	Matériel : t190, semoir et décompacteur	Si pas de pluie pendant 2 jours,....
	Main d'œuvre : 1 personne	
	Performance : 1.5 ha/h	
herbicide	Matériel : automoteur Matrot	Si moins de 10 mm de pluie le jour précédent,....
	Main d'œuvre : 1 personne	
	Performance : 18ha/jour	
	

ANNEXE 17

Estimation de l'évapotranspiration réelle (ETR) du modèle humidité au cours du cycle de la culture



ETP : évapotranspiration potentielle, kc : coefficient cultural, RU : réserve utile, H_{vcc} et H_{vpfp} : humidité volumique à la capacité au champ et au point de flétrissement permanent, respectivement.

ANNEXE 18
Modèle de bilan hydrique :

1. Valeurs du coefficient cultural kc en fonction de la culture et de son stade

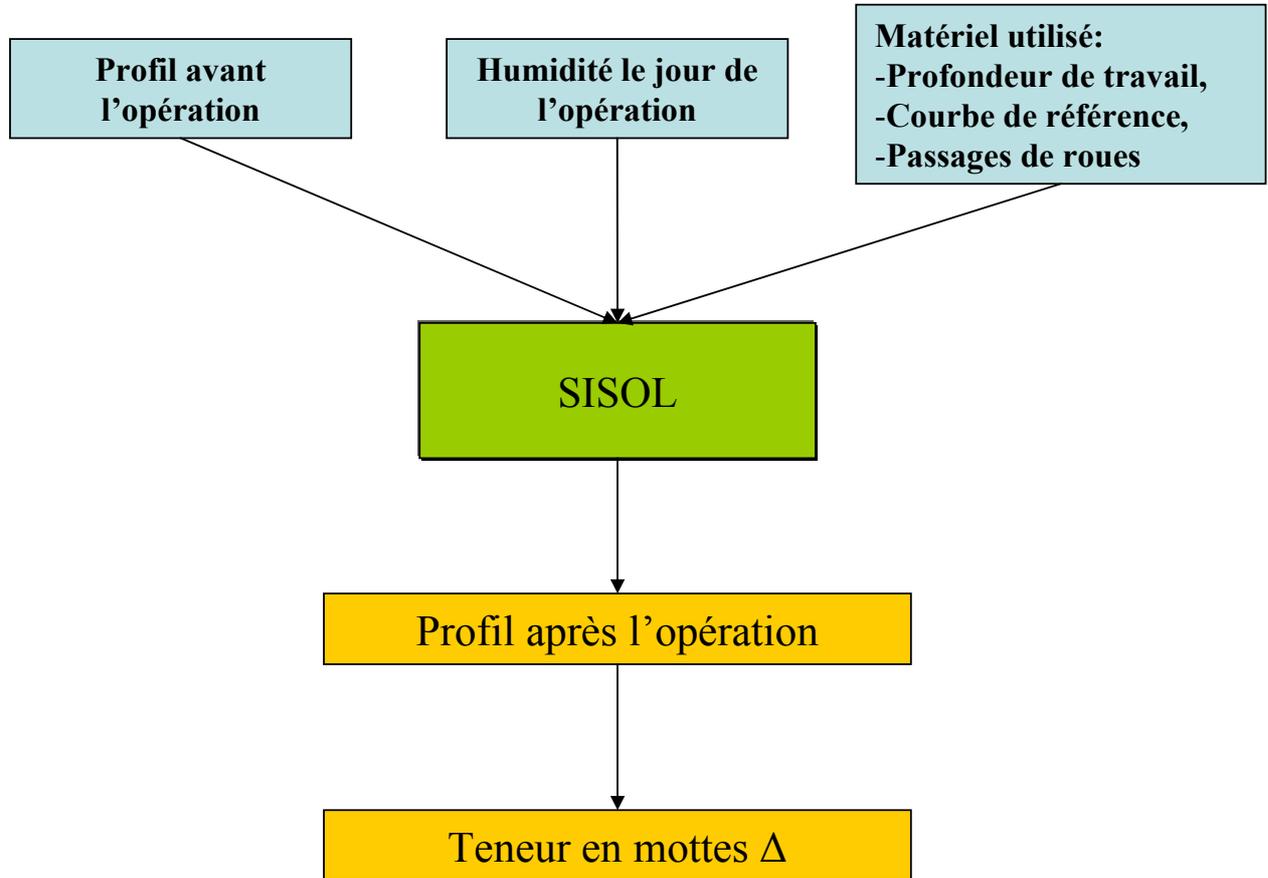
BLE TENDRE ET DUR D'HIVER	kc	date		
semis		<i>OTELO</i>		
mi-tallage	0.5	10/02		
2 nœuds	1	20/04		
épiason + 1 mois	1.2	01/06		
maturité	1	07/07		
POIS		De printemps	D'hiver hr	D'hiver Hr
semis		<i>OTELO</i>	<i>OTELO</i>	<i>OTELO</i>
5 feuilles	0.5	04/04	01/02	15/01
7 feuilles	0.7	25/04	27/02	15/02
9 feuilles	0.9	10/05	30/03	15/03
Début floraison	1	20/05	10/05	20/04
maturité	1.2	07/07	15/06	15/06
COLZA				
semis		15/08		
Avant le 01/09	0	31/08		
Du 01/09 au 15/09	0.5	15/09		
Du 16/09 au 30/09	0.6	30/09		
Du 01/10 au 10/10	0.7	10/10		
Du 11/10 au 20/10	0.8	20/10		
Du 21/10 au 31/10	0.9	31/10		
A partir du 01/11	1	15/07		
ORGE		De printemps	D'hiver	
semis		10/02	<i>OTELO</i>	
mi-tallage	0.5	10/03	20/01	
2 nœuds	1	20/05	01/04	
épiason + 1 mois	1.2	20/06	10/05	
maturité	1	30/06	15/06	

2. Dates fixées pour le modèle humidité

	Colza	Blé	Pois De printemps	D'hiver hr et Hr	Orge d'hiver
déchaumage	05/08	15/09	20/09	20/09	10/09
récolte	05/07	15/07	20/07	30/06	28/06

ANNEXE 19
Modèle SISOL

1. Schéma de fonctionnement de SISOL



2. Entrées du modèle SISOL

Opération	Cultures	Profondeur de travail (cm)	Courbe de référence¹⁵	Largeur pneus (cm)
Déchaumage	Colza, blé, pois, orge	8	3	65
Labour	Colza, pois, orge	30	-	-
Semis	Colza, blé, pois, orge	5	3	65
Récolte	Colza, blé, pois, orge	0	7	70

¹⁵ Roger-Estrade et al. (2001)

ANNEXE 20**Date de début floraison en fonction de la date de semis pour les pois d'hiver hr.**

Date de semis	Date de début floraison
Du 01 au 02/11	02/05
Du 03 au 04/11	03/05
Du 05 au 06/11	04/05
Du 07 au 08/11	05/05
Du 09 au 10/11	06/05
Du 11 au 12/11	07/05
Du 13 au 14/11	08/05
Du 15 au 16/11	09/05
Du 17 au 18/11	10/05
Du 19 au 20/11	11/05
Du 21 au 22/11	12/05
Du 23 au 24/11	13/05
Du 25 au 26/11	14/05
Du 27 au 28/11	15/05
Du 29 au 30/11	16/05

ANNEXE 21
Description de l'exploitation agricole enquêtée

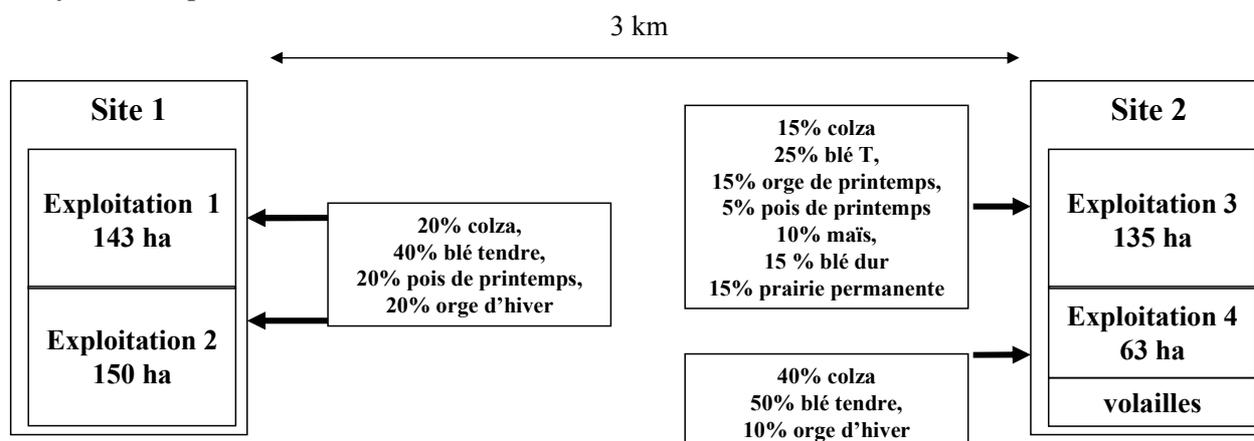
1. Main d'œuvre et horaires

Nom	Période de pointe		Période normale	
	Semaine	Samedi	Semaine	Week-end
Agriculteur 1	7h-12h/13h-19h	8h-12h/13h-19h	8h-12h/14h-18h	-
Agriculteur 2	8h-12h/14h-18h	8h-12h/13h-19h	8h-12h/14h-18h	-
Ouvrier¹⁶	8h-12h/14h-18h	-	8h-12h/14h-18h	-

2. Matériel

- Automoteur Matrot (rampe 36 m),
- 4 tracteurs de 110CV, 135CV, 165CV et 190CV,
- 1 semoir pneumatique avec herse rotative et rouleau packer (4 m),
- 1 charrue arrière 5 corps,
- 1 charrue avant 3 corps,
- 1 covercrop (5 m),
- 1 chisel (4.5 m),
- 1 canadien et rouleau spire (4 m),
- 1 décompacteur Agram (4 m).

3. Système de production



Colza	100 ha	Maïs	15 ha
Orge d'hiver	50 ha	Blé dur	20 ha
Blé tendre	205 ha	Pois printemps	60 ha
Prairie permanente	20 ha	Orge printemps	20 ha

¹⁶ Non entré pour l'extrapolation

ANNEXE 22

Description des chantiers, conditions d'intervention et enchaînements entrés dans OTELO

1. Chantiers

labour semis orge d'hiver

main d'œuvre	: agriculteurs 1 et 2
matériel	: t190 et t165 et charr5cor et chav3corps et semoir

si (condfavlab1) vitesse =1.5 ha/h
 sinon si (condfavlab2) vitesse=1.5 ha/h
 sinon vitesse=0

labour semis blé tendre (après orge)

main d'œuvre	: agriculteurs 1 et 2
matériel	: t190 et t165 et charr5cor et chav3corps et semoir

si (condfavlab1 et J<=01_11) vitesse =1.5 ha/h
 sinon si (condfavlab2 et J>02_11) vitesse=1.5 ha/h
 sinon vitesse=0

labour semis blé dur (après orge)

main d'œuvre	: agriculteurs 1 et 2
matériel	: t190 et t165 et charr5cor et chav3corps et semoir

si (condfavlab3 et J<=15_11) vitesse =1.5 ha/h
 sinon si (condfavlab2 et J>16_11) vitesse=1.5 ha/h
 sinon vitesse=0

semis blé tendre (après colza ou pois)

main d'œuvre	: agriculteurs 1 ou 2
matériel	: t190, semoir et décompacteur

si (condfavsemis1 et J<=01_11) vitesse=1.5 ha/h
 sinon si (condfavsemis2 et J>2_11) vitesse=1.5 ha/h
 sinon vitesse=0

semis blé dur (après colza ou pois)

main d'œuvre	: agriculteurs 1 ou 2
matériel	: t190, semoir et décompacteur

si (condfavsemis3 et J<=15_11) vitesse=1.5 ha/h
 sinon si (condfavsemis2 et J>16_11) vitesse=1.5 ha/h
 sinon vitesse=0

herbicide sur céréales

main d'œuvre	: agriculteur 1 ou 2
matériel	: automoteur matrot

si (condefavherb) vitesse=0
 sinon vitesse=18 ha/jour

labour d'hiver pour orge de printemps et pois de printemps

main d'œuvre	: agriculteur 1 ou 2
matériel	: charr5cor et chav3corps et t190

si (condfavlabhiv) vitesse=1.5 ha/h
 sinon vitesse=0

2. Conditions d'intervention

condfavherb
pluie(j)<11.2
et
Tmoy(j)>0

condfavlab
pluie(j-2)<14.8 et pluie(j-1)<0.2
ou
pluie(j)<9.8
ou
pluie(j-1)<12

condfavsemis
pluie(j-1)<12
ou
pluie(j-2)<11.8 et pluie(j-1)<0.4

condefavherb
pluie(j)>11.2
ou
Tmoy(j)<0
ou
r1(j)=R1_max

condfavlab2
pluie(j-2)<14.8 et pluie(j-1)<0.2
ou
pluie(j)<9.8
ou
pluie(j-1)<12

condfavsemis2
pluie(j-1)<12
ou
pluie(j-2)<11.8 et pluie(j-1)<0.4

condfavlab1
(pluie(j-2)<14.8 et pluie(j-1)<0.2
ou
pluie(j)<9.8
ou
pluie(j-1)<12) et
r1(j)<=0.90*R1_max

condfavsemis1
(pluie(j-1)<12
ou
pluie(j-2)<11.8 et pluie(j-1)<0.4)
et
r1(j)<=0.90*R1_max

condfavlab3
(pluie(j-2)<14.8 et pluie(j-1)<0.2
ou
pluie(j)<9.8
ou
pluie(j-1)<12) et

$r1(j) \leq 0.95 * R1_max$

condfavsemis3

$(pluie(j-1) < 12$

ou

$pluie(j-2) < 11.8$ et $pluie(j-1) < 0.4)$

et

$r1(j) \leq 0.95 * R1_max$

condfavlabhiv

$pluie(j-2) < 9$ et $pluie(j-1) < 3.4$

ou

$pluie(j) < 4$

3. Enchaînements

Blé tendre après colza : e_col_ble

semisble

herbicide

Blé après blé : e_ble_ble

labsemisbl

herbicide

Blé dur après colza : e_col_bd

semisbd

herbicide

blé tendre après maïs : e_mais_ble

labsemisbl

herbicide

orge d'hiver après blé : e_ble_orge

labsemisor

herbicide

blé dur après blé : e_ble_bd

labsemisbd

herbicide

labour d'hiver : e_labhiv

labhiv

ANNEXE 23
Description des périodes pour l'exploitation

1. avec pois de printemps

hor_pt
SI (J>=28_09) e_ble_orge
SI (J>=01_10) e_col_ble
SI (FIN(e_col_ble) et J>=15_10) e_ble_ble
SI (J>=25_10) e_col_bd
SI (J>=25_10 et fin(e_col_bd)) e_ble_bd
SI (FIN(e_ble_ble) ET FIN(e_ble_bd))
horaire=hor_norm
SI (J>4_11 et fin (e_ble_ble) et fin(e_ble_bd)) e_labhiv

2. avec pois d'hiver hr

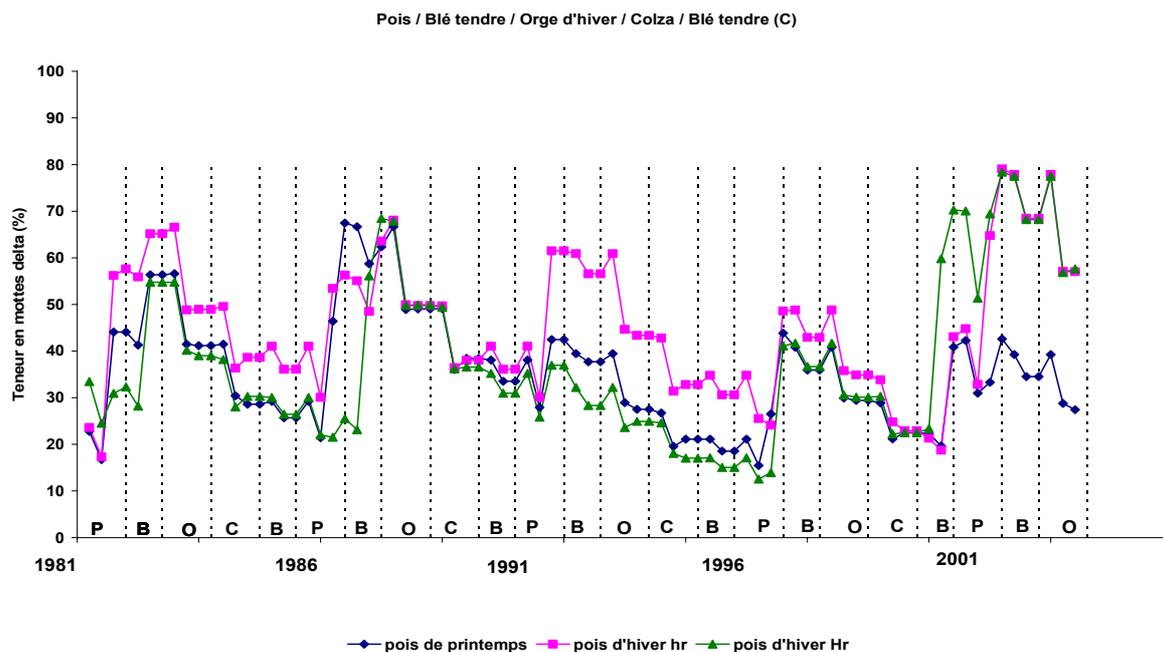
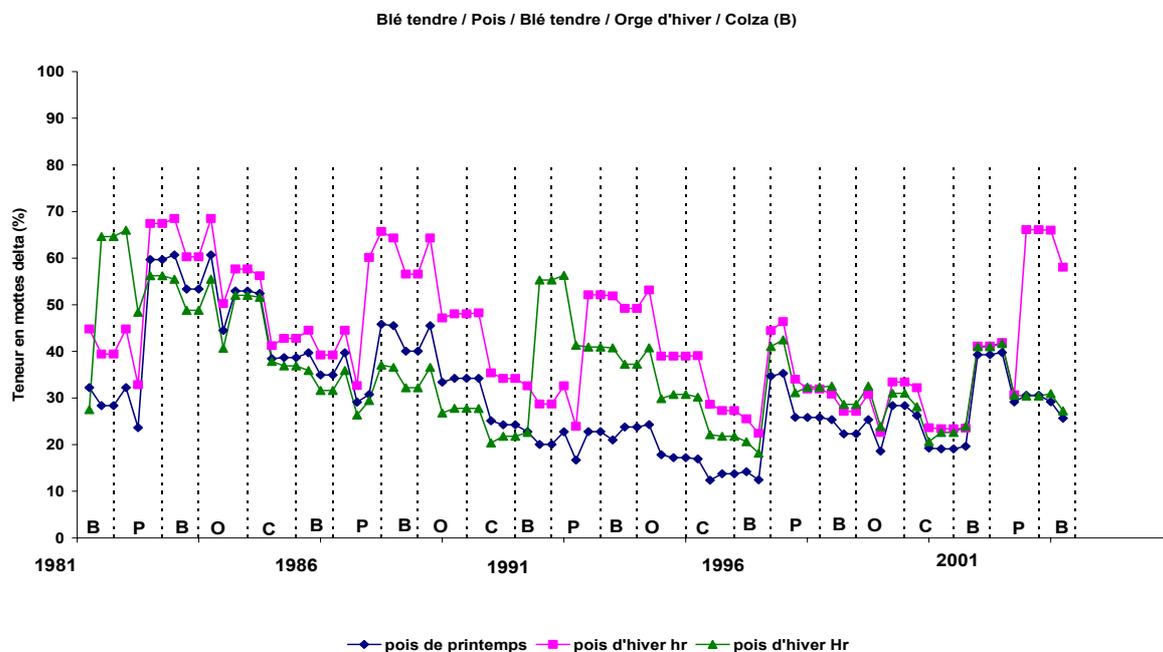
hor_pt
SI (J>=28_09) e_ble_orge
SI (FIN (e_ble_orge) ET (J>=01_10 et J<=31_10)) e_ble_pHr
SI (J>=01_10 et J<=31_10) e_pHco_ble
SI (J>=25_10 et J<=15_11) e_pHco_bd
SI (FIN(e_pHco_bd) et (J>4_11))
horaire=hor_norm
SI (J>4_11 et J<15_11 et FIN(e_pHco_bd))
e_labhiv
SI (J>15_11) e_labhiv

3. avec pois d'hiver Hr

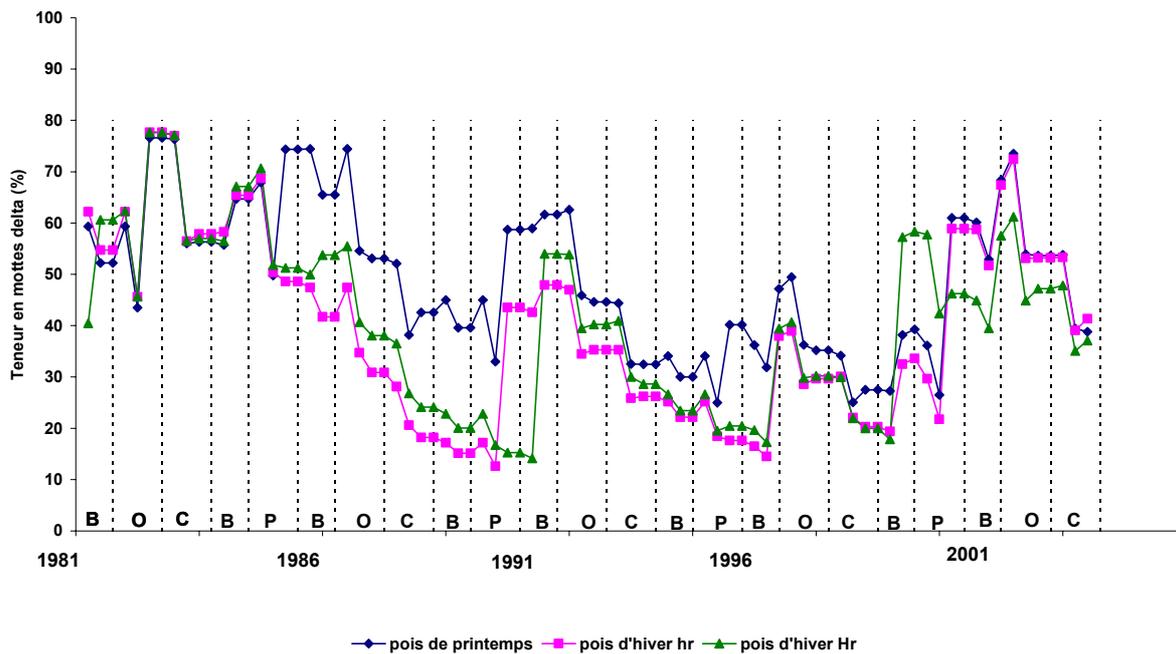
hor_pt
SI (J>=28_09) e_ble_orge
SI (J>=01_10) e_col_ble
SI (J>=01_10) e_pHr_ble
SI (J>=10_10) e_ble_pHr
SI (FIN(e_col_ble) et FIN(e_pHr_ble) et J>=25_10) e_col_bd
SI (FIN(e_col_ble) et FIN(e_pHr_ble) et J>=25_10) e_pHr_bd
SI (FIN(e_col_bd) et FIN(e_pHr_bd) et FIN(e_ble_pHr))
horaire=hor_norm
SI (J>4_11 et FIN(e_col_bd) et FIN(e_pHr_bd) et FIN(e_ble_pHr)) e_labhiv

ANNEXE 24

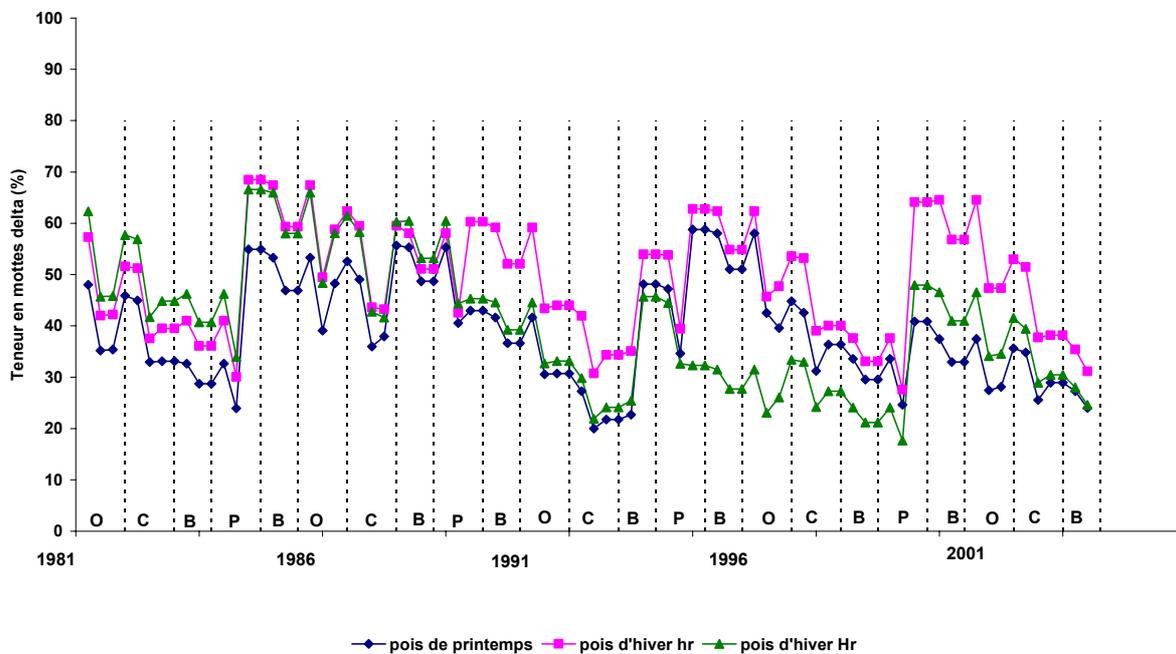
Evolution de la teneur en delta entre 1981 et 2003 pour les 4 autres assolements du système de production (B, C, D, E) en fonction du type de pois semé dans l'exploitation. Les traits verticaux en pointillés séparent chaque culture (C : colza ; B : blé tendre d'hiver ; P : pois ; O : orge d'hiver).



Blé tendre / Orge d'hiver / Colza / Blé tendre / Pois (D)

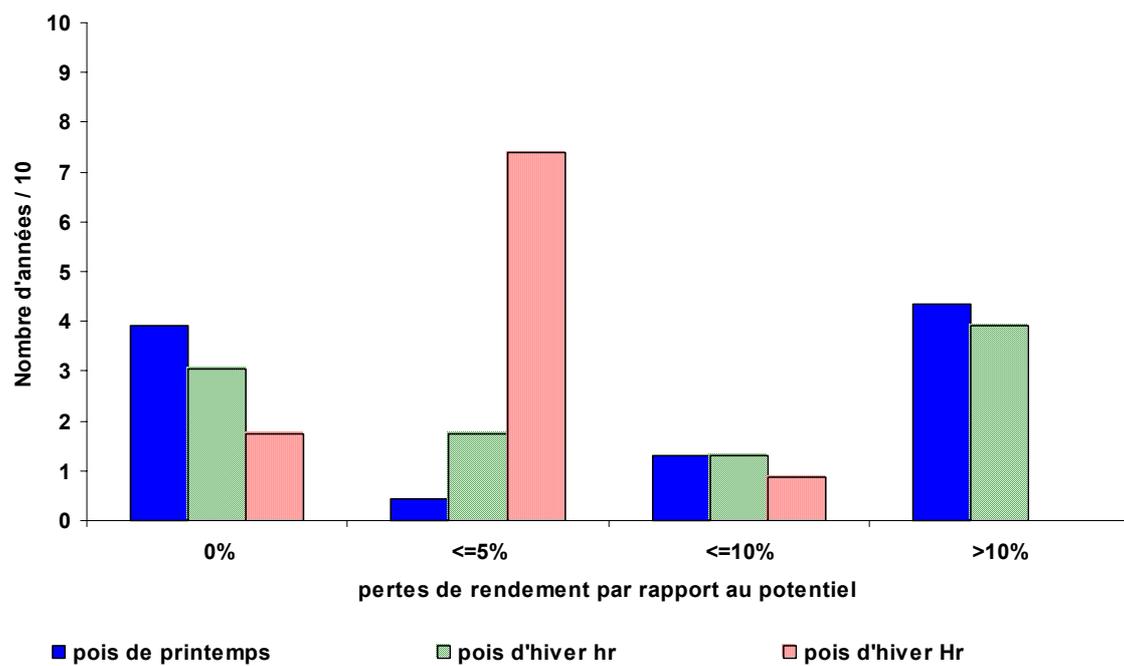


Orge d'hiver / Colza / Blé tendre / Pois / Blé tendre (E)



ANNEXE 25

Risques de pertes de rendement par rapport au « potentiel expérimentateur » en fonction du type de pois dans la rotation pour une date de semis définie lorsque 80% des surfaces totales en pois ont été semées.



SUMMARY

***Ex ante* assessment of varietal innovations in winter pea (*Pisum sativum* L.): Modelling approach at the plot and farm scales**

**Aurélie VOCANSON
Institut National Agronomique Paris-Grignon
March 2006**

In France, areas sown in pea have been significantly decreasing since 1993. This phenomenon is mainly due to the greatly yield variability of spring pea varieties (90% of pea areas), consequences of numerous limiting factors such as compacted soil structure because of high soil water content at sowing and hydric and thermic stress during yield elaboration. New winter pea cultivars – more reactive to photoperiod and with a longer duration of frost resistant – are nowadays under selection to revive the interest of this crop. These new cultivars can be sown since the beginning of October, which should contribute to decrease both the risk of both soil compaction at sowing and, hydric and thermic stress at the end of the growth cycle. *A priori*, these two characteristics are should favour yield stability. However, the beginning of autumn is a busy period in farms: these new cultivars should thus not be sown in optimal conditions, without expression of the two previous advantages. Moreover, the modification of sowing period, due to the use of these new winter pea cultivars, should have consequences on nitrogen balance and water consumption of the crop. The global aim of this work was to develop a methodology to assess the agronomic and environmental interests of these new winter pea cultivars before marketing, and to determine the characteristic it should combine to guarantee these advantages.

Three stages were conducted. Firstly, four experiments (2 years and 2 sites) were carried out to determine the effects of soil structure, sowing period and cultivar on growth (aerial and root) of a pea crop. Secondly, the results obtained – completed with other data bases – were used to complete and assess a dynamic pea crop model, which predicts yield, grain protein content, part of nitrogen derived from fixation, nitrogen balance and water consumption at the plot scale. Thirdly, this model was used to assess different potential candidate cultivars. In this last stage, the model was coupled with two main models. The first one was a model of work organisation at farm scale to determine the possible sowing periods for pea cultivars, considering the problems of tasks' competition in autumn. The second one was a model simulating soil structure evolution according to the soil water content to determine the risk of soil compaction under pea and the consequences on the yield.

This work increased the knowledge on root system development for different sowing and soil structure conditions. A crop model for spring and winter cultivars and sowing period, which takes into account the variability of nitrogen availability and soil structure, is usable. Finally, the combined used of different models showed that the results of the assessments of potential cultivars were different depending on whether constraints at farm scale were taken into account or not. The whole work proposes to breeders potential cultivars that present agronomic and environmental interests in farm.

Key words: modelling, soil structure, sowing period, cultivar, breeding, work organisation.

RESUME

Evaluation *ex ante* d'innovations variétales en pois d'hiver (*Pisum sativum* L.) : approche par modélisation aux niveaux de la parcelle et de l'exploitation agricole

**Aurélie VOCANSON
Institut National Agronomique Paris-Grignon
Mars 2006**

En France, depuis plusieurs années, la surface cultivée en pois diminue notablement. Une des causes est la forte instabilité des rendements des variétés de printemps, qui représentent 90% de la sole, liée à de nombreux facteurs limitants : état structural tassé à cause de conditions trop humides au semis et, stress hydriques et thermiques de fin de cycle. Dans l'objectif de relancer cette culture, de nouvelles variétés de pois d'hiver, très réactives à la photopériode et relativement résistantes au gel, sont actuellement en cours de sélection. Ces variétés peuvent être semées dès début octobre, ce qui devrait réduire à la fois les risques de tassement du sol lors du semis et de stress hydriques et thermiques du fait d'un avancement de la période reproductrice au printemps. Ces avancements sont *a priori* favorables à une meilleure stabilité de la production. Cependant, le début de l'automne est une période de travail chargée dans les exploitations agricoles et il est possible que les semis de ces nouvelles variétés ne soient pas réalisés dans les conditions optimales permettant d'extérioriser leurs avantages. Le changement de dates de semis, induit par l'utilisation de ces variétés, pourrait par ailleurs avoir des répercussions sur le bilan d'azote et la consommation d'eau de la culture. L'objectif général de ce travail a été de mettre au point une méthode afin d'évaluer, avant leur mise sur le marché, les intérêts agronomiques et environnementaux de ces nouvelles variétés et de déterminer les caractéristiques qu'elles devraient réunir pour garantir ces avantages.

L'étude a été conduite en trois étapes. Tout d'abord, quatre expérimentations (2 lieux x 2 années) ont été réalisées afin de déterminer les effets de l'état structural, de la période de semis et de la variété sur les fonctionnements aérien et racinaire d'une culture de pois. Dans un second temps, les résultats de ces expérimentations, associés à des jeux de données extérieurs, ont permis de compléter et d'évaluer un modèle dynamique de culture de pois simulant le rendement, la teneur en protéines des graines, la part d'azote issue de la fixation, le bilan d'azote et la consommation d'eau à l'échelle de la culture. Ce modèle a ensuite été utilisé pour évaluer différentes variétés virtuelles candidates. Dans cette dernière étape, le modèle de culture a été couplé à un modèle d'organisation du travail à l'échelle de l'exploitation agricole, afin de déterminer, en tenant compte des contraintes d'organisation du travail des chantiers d'automne, les périodes de semis possibles pour les variétés de pois. En fonction de ces périodes de semis, on a simulé, grâce à un modèle d'évolution de l'état structural du sol, les risques de tassement sous les cultures de pois et les conséquences sur la production.

Des connaissances nouvelles ont été produites sur le développement du système racinaire, pour différentes conditions de semis et de structure du sol. Un modèle de culture adapté aux variétés et aux semis d'hiver, prenant en compte la variabilité de disponibilité d'azote et de la structure du sol, est maintenant disponible. Enfin, l'utilisation combinée des modèles a permis de montrer que les résultats des évaluations des variétés virtuelles sont différentes selon que l'on prend ou non en compte les contraintes existant au niveau du système de culture. L'ensemble de ce travail permet de proposer aux sélectionneurs des idéotypes variétaux présentant un intérêt agronomique et environnemental dans des exploitations agricoles de grande culture.

Mot-clés : modélisation, état structural, date de semis, variété, sélection, organisation du travail.