

# Agrophysiologie du pois protéagineux





# Agrophysiologie du pois protéagineux

INRA  
147, rue de l'Université  
75338 Paris cedex 07

UNIP  
12, avenue Georges V  
75008 Paris

ARVALIS – Institut du végétal  
3, rue Joseph et Marie Hackin  
75116 Paris

ENSAM  
2, place Viala  
34060 Montpellier cedex 01

*avec la collaboration de la FNAMS et de l'ESA d'Angers*

© INRA, ARVALIS-Institut du végétal, UNIP, ENSAM, 2005

ISBN (INRA) : 2-7380-1182-9 ISBN (ARVALIS-Institut du végétal) : 2-86492-679-2 ISSN : 1144-7605

Le code de la propriété intellectuelle du 1<sup>er</sup> juillet 1992 interdit la photocopie à usage collectif sans autorisation des ayants droit. Le non respect de cette disposition met en danger l'édition, notamment scientifique. Toute reproduction, partielle ou totale, du présent ouvrage, est interdite sans autorisation de l'éditeur et du Centre français d'exploitation du droit de copie (CFC), 20 rue des Grands Augustins, 75006 Paris.

# Agrophysiologie du pois protéagineux

*Ouvrage coordonné par :*

Nathalie Munier-Jolain, Véronique Biarnès,  
Isabelle Chaillet, Jérémie Lecoœur, Marie-Hélène Jeuffroy

*avec la collaboration de :*

Benoît Carrouée, Yves Crozat, Lydie Guilioni,  
Isabelle Lejeune, Bernard Tivoli



## MIEUX COMPRENDRE

### **Les soutiens à l'agriculture**

Théorie, histoire, mesure

J.P. BUTAULT, éd.

2004, 316 p.

### **Viruses and virus diseases of *Poaceae* (*Gramineae*)**

H. LAPIERRE, P.A. SIGNORET, ed.

2004, 890 p.

### **Les rongeurs de France**

Faunistique et biologie

H. LE LOUARN, J.P. QUÉRÉ

2003, 260 p.

### **Quantitative genetics and breeding methods in autopolyploid plants**

A. GALLAIS

2003, 516 p.

### **Principes des techniques de biologie moléculaire**

2<sup>e</sup> édition revue et augmentée

D. TAGU, C. MOUSSARD (éds.)

2003, 180 p.

### **Éléments de génétique quantitative**

2<sup>e</sup> édition revue et augmentée

L. OLLIVIER

2002, 184 p.

### **Génie génétique**

Une histoire, un défi

E. HEBERLE-BORS

trad. M.L. SPIRE, R. JUDOR

2001, 304 p.

### **L'eau dans l'espace rural**

Vie et milieux aquatiques

A. NEVEU, C. RIOU, R. BONHOMME,

P. CHASSIN, F. PAPY (éd.)

2001, 300 p.

### **Principes de virologie végétale**

Génome, pouvoir pathogène, écologie  
des virus

S. ASTIER, J. ALBOUY, Y. MAURY, H. LECOQ

2001, 488 p.

### **Le grain de blé**

Composition et utilisation

P. FEILLET

2000, 310 p.

### **Biology of lactation**

J. MARTINET, L.-M. HOUDEBINE, H.H. HEAD

1999, 686 p.

### **Sol : interface fragile**

Pierre STENGEL et Sandrine GELIN

1998, 222 p.

### **Les marqueurs moléculaires en génétique et biotechnologies végétales**

Dominique DE VIENNE

1998, 200 p.

### **Assimilation de l'azote chez les plantes**

Aspects physiologique, biochimique  
et moléculaire

Jean-François MOROT-GAUDRY (éd.)

1997, 422 p.

### **L'eau dans l'espace rural**

Production végétale et qualité de l'eau

C. RIOU, R. BONHOMME, P. CHASSIN,

A. NEVEU, F. PAPY (éd.)

1997, 414 p.

### **La pomme de terre**

P. ROUSSELLE, Y. ROBERT

et J.C. CROSNIER (éd.)

1996, 640 p.

### **Vie microbienne du sol et production végétale**

Pierre DAVET

1996, 380 p.

### **Nutrition des ruminants domestiques**

R. JARRIGE, Y. RUCKEBUSH,

C. DEMARQUILLY, M.-H. FARCE

et M. JOURNET (éd.)

1995, 921 p.

### **Amélioration des espèces végétales cultivées**

Objectifs et critères de sélection

André GALLAIS et Hubert BANNEROT

1992, 768 p.

# Préface

Bertrand Ney, Benoît Carrouée

Cet ouvrage présente les travaux effectués ces dernières années en France sur le pois protéagineux en recherche pour le développement. Il est, cependant, à notre sens, plus qu'un simple descriptif de l'avancée des connaissances agronomiques sur cette espèce. Il est également le témoin d'un processus d'innovation qui a mobilisé l'ensemble des acteurs de la filière. Les années 1980 s'ouvrent avec un nouveau défi pour l'agriculture française et européenne : pallier le déficit en produits végétaux riches en protéines pour l'alimentation animale. En effet, les graines de soja et ses tourteaux monopolisent le marché mondial des protéines alors que la filière animale est en plein essor en France et que la demande croît. L'embargo sur le soja de 1973 et la crise qu'il entraîne dans le secteur animal montrent rapidement les limites de la politique agricole européenne. Le « plan protéines » destiné à promouvoir une filière française de production de matières végétales riches en protéines est alors décidé dans le milieu des années 1970 et ouvre la voie à un règlement européen en 1978. Parmi les cultures candidates figurent la féverole, seul protéagineux traditionnellement cultivé en France pour l'alimentation des animaux, le soja, le pois et, un peu plus tard, le lupin. Le soja restera confiné aux conditions favorables du sud de la France. Le lupin blanc, limité par sa sensibilité au calcaire et la féverole, limitée par sa sensibilité aux fortes températures, restent cantonnés à l'ouest et au nord de la France. C'est le pois, cultivé jusqu'alors en France comme fourrage pour les bovins ou comme légume vert pour l'alimentation humaine, grâce à son fort potentiel de rendement et son cycle court, qui sera le principal support d'une nouvelle filière de matières riches en protéines non issues de tourteaux d'oléagineux.

Dès lors, une nouvelle culture va émerger, rendue possible par la mobilisation de tous les acteurs de la filière : Instituts techniques (FNAMS, UNIP et ITCF devenu aujourd'hui ARVALIS – Institut du végétal), recherche (INRA) et Écoles d'agronomie (INA PG, ENSAM, ESA Angers, ISA Beauvais...), sélectionneurs publics et privés, coopératives, Chambres d'Agriculture. Dès 1985, ces partenaires sont réunis pour réfléchir ensemble au sein du Groupe Agrophysiologie du pois, à l'initiative de l'UNIP. Les résultats des dix premières années de travail seront consignés dans le premier ouvrage en 1994 qui présente l'état des connaissances sur le développement végétatif et reproducteur du pois protéagineux et leur utilisation pour la production. Les efforts importants des sélectionneurs ont fait passer la plante d'une architecture fourragère

préexistante (plante haute, très sensible à la verse, avec une production végétative importante et une production grainière indéterminée) à une structure courte et ramifiée, afile (les folioles étant remplacées par des vrilles), permettant de résister à la verse et de permettre une récolte mécanique aisée, des graines de taille et de qualité plus importante. La culture reste cependant sensible aux maladies surtout dans le Nord et l'Ouest, où sa production végétative importante crée des conditions de milieu favorables à l'expression des maladies, notamment l'anthracnose (*Mycosphaerella pinodes*), et aux stress hydriques et thermiques dans les régions plus continentales ou méridionales. On constate alors avec les premiers outils de diagnostic mis au point par le groupe que, contrairement aux idées reçues, une culture de pois pourtant fixatrice peut souffrir d'un déficit de nutrition azotée, sous l'effet de stress hydriques précoces, des sitones dont les larves détruisent les nodosités, ou de pratiques culturales conduisant à un sol tassé. De même, son faible système racinaire, dont on sait maintenant que la concurrence des racines et des nodules pour les produits de la photosynthèse est importante, accentue des stress hydriques en fin de cycle qui peuvent limiter les rendements. Ces points identifiés comme pouvant pénaliser la culture ont été largement étudiés au cours des dix dernières années et constituent des contributions très significatives de cette nouvelle édition. Malgré ces caractéristiques parfois défavorables, Solara, variété phare inscrite en 1986 et idéotype moyen convenant à la majeure partie des situations, conquiert très rapidement les champs cultivés. La surface cultivée en pois culmine alors à près de 750 000 ha au début des années 1990. Dans le même esprit, pour promouvoir la culture à l'échelle européenne, se crée dès 1992 l'Association européenne des plantes riches en protéines qui rassemblera les acteurs européens de la filière sous l'instigation de l'UNIP.

Toutefois, à partir de 1988 et de la mise en place de stabilisateurs budgétaires, les réformes successives de la Politique agricole commune abandonnent toute volonté de développement ciblé des protéagineux : au contraire, elles visent – et parviennent – à la stabilisation des surfaces au niveau atteint à la fin des années 1980 dans l'UE. Les surfaces de pois se concentrent alors dans les régions où le climat et la réglementation le rendent le plus compétitif. Le retour fréquent du pois dans les mêmes parcelles de ces régions au cours des années 1990 entraîne le développement de maladies racinaires, en particulier *Aphanomyces* dont les dégâts sur pois sont redoutables. Beaucoup de producteurs de pois expérimentés de ces régions doivent alors abandonner cette culture pendant plusieurs années, le temps d'assainir la situation, ce qui entraîne un recul marqué des surfaces.

Pour faire face à ces problèmes, les acteurs de la filière française se sont mobilisés depuis la fin des années 1990 autour de deux objectifs finalisés majeurs :

- augmenter les surfaces de protéagineux en diversifiant les cultures avec un fort investissement sur le pois d'hiver et la féverole ;
- développer les projets intégrés, combinant agronomie, génétique, pathologie, zootechnie et économie, afin d'une part de développer des idéotypes de pois productifs, de qualité, mais aussi plus résistants aux maladies en particulier racinaires, et d'autre part d'évaluer l'impact environnemental de ces innovations.

Les efforts consentis pour l'émergence de cette filière nouvelle en Europe ne seront pas vains si l'on considère les nouvelles contraintes qui vont certainement peser sur



l'agriculture de demain et les atouts d'une culture comme le pois. Celui-ci reste une bonne réponse aux problèmes environnementaux et à la nécessaire diversification des cultures pour un meilleur contrôle des agents pathogènes, ravageurs et mauvaises herbes sans recours excessif aux produits phytosanitaires. La mise en place de la fixation symbiotique de l'azote atmosphérique dès le début du cycle, rend la culture indépendante des engrais azotés, forts consommateurs en énergie fossile et émetteurs de gaz à effet de serre. Ces atouts environnementaux ne peuvent s'exprimer qu'en assurant une gestion optimale de la fertilisation azotée et de la protection phytosanitaire dans toute la rotation et en introduisant éventuellement une culture intermédiaire avant ou après le pois dont le cycle de culture est très court.

La somme des travaux contenus dans cet ouvrage en font le droit fil de son prédécesseur de 1994 et montrent le dynamisme des différents partenaires de la recherche et du développement agricole. Les nouveaux enjeux assignés à l'agriculture poussent à la mobilisation de tous ses acteurs. Les travaux présentés ici et ce qu'ils représentent en sont un témoignage exemplaire.



# Table des matières

<b>Analyse du fonctionnement d'un peuplement de pois</b> .....	19
Choix de la démarche .....	19
Un cadre d'analyse simple et générique :	
l'approche énergétique de la production de biomasse .....	20
Mode de représentation de la plante et du couvert de pois .....	22
Pois de printemps et pois d'hiver .....	23

## I. FONCTIONNEMENT D'UN PEUPEMENT DE POIS ET COMPOSANTES DU RENDEMENT

<b>1. Développement de la plante</b> .....	27
Développement végétatif .....	27
Organisation d'une tige de pois .....	27
Fonctionnement du méristème caulinaire et de l'extrémité apicale .....	30
Modélisation du développement foliaire .....	31
<i>Modélisation en fonction du temps thermique</i> .....	31
<i>Développement foliaire, de l'initiation à la fin d'expansion</i> .....	31
<i>La feuille, du déploiement à la sénescence</i> .....	32
Expansion des organes végétatifs .....	33
<i>Division puis expansion des cellules</i> .....	33
<i>Taille finale des organes végétatifs</i> .....	34
<i>Arrêt de production de nouveaux phytomères</i> .....	36
Conclusion .....	36
Initiation florale et début de floraison .....	36
Définitions et observations .....	37
<i>Initiation florale</i> .....	37
<i>Début de floraison</i> .....	37
Passage à l'état reproducteur chez le pois .....	37
<i>Effets de la photopériode</i> .....	39
<i>Effets de la température</i> .....	41
<i>Effets de l'interaction photopériode × température</i> .....	41

Modélisation des stades « initiation florale » et « début floraison » .....	41
Utilisation de la date de floraison pour repérer la réactivité à la photopériode .....	42
Variabilité génétique de la durée de la période initiation florale-début floraison .....	42
Conclusion .....	44
Développement reproducteur .....	45
Les grandes étapes du développement de la graine .....	45
La caractérisation des stades reproducteurs .....	46
<i>Quels indicateurs ?</i> .....	46
<i>Le début du remplissage des graines ou le stade limite d'avortement</i> .....	47
<i>La fin du remplissage ou la maturité physiologique</i> .....	47
L'intégration du développement reproducteur à l'échelle de la plante ....	48
<i>La vitesse de progression des stades</i> .....	48
<i>Le nombre d'étages florifères</i> .....	49
<i>La durée des phases de développement</i> .....	49
Intérêt de la formalisation du développement reproducteur .....	50
Développement des ramifications .....	51
Rappel sur les caractéristiques architecturales .....	51
La mise en place et l'activité des bourgeons .....	53
<i>Le nombre de bourgeons, une caractéristique variétale</i> .....	53
<i>Le rythme d'émission des méristèmes latéraux</i> .....	53
<i>L'initiation de phytomères</i> .....	53
<i>L'initiation florale</i> .....	54
<i>Modéliser l'architecture potentielle</i> .....	54
La croissance des axes latéraux .....	54
<i>La position des ramifications</i> .....	55
<i>Le nombre de ramifications</i> .....	55
<i>Peu d'effet de la date de semis sur le type de ramifications présentes</i> .....	56
<i>R1 : une ramification atypique</i> .....	57
<i>Un phyllochrone peu différent de celui de la tige principale</i> .....	57
<i>La floraison</i> .....	57
Conclusion .....	58
Fiche méthodologique : mesures des stades de développement .....	58
Mesures des stades à l'échelle de la tige .....	58
Mesures des stades à l'échelle du peuplement .....	62
Positionnement indicatif des stades dans le temps .....	63
<b>2. Acquisition du carbone à l'échelle du peuplement</b> .....	65
Présentation de l'approche énergétique de la croissance .....	65
Termes de l'équation énergétique de la production de biomasse .....	66
Bilan radiatif solaire d'un couvert végétal .....	66
Efficience biologique $\epsilon_p$ .....	67
Méthodes d'estimation des termes de l'équation de production de biomasse .	68
Détermination de la biomasse .....	68

Détermination des efficacités d'absorption ou d'interception du rayonnement .....	68
<i>A partir de mesures des différentes composantes du bilan radiatif solaire ...</i>	68
<i>A partir de la loi de Beer et de l'indice foliaire .....</i>	69
<i>Estimation du LAI .....</i>	70
<i>Estimation du coefficient d'extinction du rayonnement .....</i>	72
<i>Correspondance entre <math>\epsilon_a</math> et <math>\epsilon_i</math> .....</i>	72
<i>A partir de mesures de caractéristiques structurales ou optiques du couvert .....</i>	72
Efficience biologique .....	72
Sources de variabilité de l'efficience d'interception et d'absorption .....	73
Évolution au cours du cycle .....	73
Effet de la date et de la densité de semis .....	73
Variabilité génétique .....	74
Sources de variabilité de l'efficience biologique .....	75
Variation au cours du cycle .....	75
Effet de la date et de la densité de semis .....	77
Variabilité génétique .....	78
Effets des conditions environnementales .....	78
Conclusion .....	80
<b>3. Nutrition azotée .....</b>	<b>81</b>
Courbe de dilution .....	81
Les variations de teneurs en azote selon les stades de développement .....	81
Détermination de la teneur en azote critique chez le pois .....	83
Détermination d'une courbe maximale .....	84
Hypothèses sur le contrôle du prélèvement de l'azote par la plante .....	86
Mise en place des racines et des nodosités, coûts associés .....	86
Mise en place des racines et des nodosités .....	87
<i>Mise en place du système racinaire .....</i>	87
<i>Mise en place des nodosités et sa modulation .....</i>	88
Coûts en carbone associés à la mise en place des structures, à leur entretien et à leur fonctionnement .....	91
<i>Flux de carbone associés à la mise en place et au fonctionnement     du système racinaire nodulé .....</i>	91
<i>Utilisation du carbone au sein du système racinaire selon le mode     de nutrition azotée .....</i>	92
Perspectives .....	93
Efficience de la nutrition azotée .....	94
Contribution des deux voies d'alimentation en azote à son acquisition au cours du cycle .....	94
<i>Complémentarité entre fixation symbiotique et absorption racinaire .....</i>	94
<i>Une cinétique et une sensibilité différentes aux facteurs     de l'environnement .....</i>	96
Activité fixatrice : modulation par la croissance, la phénologie et les nitrates .....	98

<i>Modulation de l'activité fixatrice par les nitrates</i> .....	98
<i>Évolution de l'activité fixatrice au cours du cycle</i> .....	99
<i>L'activité fixatrice dépend de la biomasse des nodosités</i> .....	100
Optimiser et stabiliser l'alimentation azotée des légumineuses .....	101
Fiche méthodologique : mesure de la fixation symbiotique au champ .....	101
Rappel des méthodes de mesure en champ .....	101
Trois méthodes isotopiques de calcul du %Ndfa .....	102
<i>Principe des méthodes isotopiques</i> .....	102
<i>Méthodes utilisant une plante de référence non fixatrice</i> .....	102
<b>4. Répartition des assimilats carbonés et azotés</b> .....	107
Flux de carbone et d'azote au sein de la plante .....	107
Rappel sur le transport du carbone et de l'azote dans la plante .....	107
Généralités sur le chargement des composés dans les voies de transport .....	107
<i>Chargement des sucres et des acides aminés dans le phloème</i> .....	107
<i>Chargement des composés azotés dans le xylème</i> .....	108
Transport .....	108
<i>Flux de xylème</i> .....	108
<i>Flux de phloème</i> .....	109
Flux de carbone et d'azote et répartition des assimilats .....	109
Flux phloémien et xylémien de carbone et d'azote .....	110
<i>Rapport C/N des sèves et des organes en fonction de leur position         intra-plante</i> .....	110
<i>Transport de carbone associé aux composés azotés, conséquences         sur le flux de l'azote</i> .....	110
Caractéristiques des flux de carbone et d'azote selon les organes .....	111
<i>Racines et nodosités</i> .....	111
<i>Tiges et pétioles</i> .....	111
<i>Apex</i> .....	111
<i>Feuilles selon leur stade de développement</i> .....	111
<i>Gousses et graines</i> .....	112
Répartition de la biomasse et de l'azote au cours du cycle .....	113
Les bilans de masse .....	114
<i>Allocation de biomasse aux différents organes végétatifs         et reproducteurs</i> .....	114
<i>Répartition du carbone et de l'azote au cours du cycle</i> .....	116
Règles de répartition des assimilats carbonés entre organes en période reproductrice .....	118
Indice de récolte de la biomasse (HI) et de l'azote (NHI) .....	118
<i>Indices de récolte mesurés à la récolte</i> .....	119
<i>Indices de récolte mesurés au cours du remplissage</i> .....	120
<b>5. Élaboration des composantes du rendement</b> .....	123
Nombre de graines .....	123
Déterminisme du nombre de graines à l'échelle du peuplement .....	123
Dynamique de répartition des assimilats carbonés .....	125

Un modèle statique de répartition des graines entre étages .....	126
Conclusion .....	127
Poids d'une graine .....	129
Déterminisme de la vitesse de croissance des graines .....	129
<i>Vitesse de croissance et nombre de cellules cotylédonaire</i> s .....	129
<i>Variations du nombre de cellules cotylédonaire</i> s .....	130
<i>Variations de la durée de la période de divisions cellulaires</i> .....	132
Déterminisme de la durée du remplissage des graines .....	133
<i>Limitation intrinsèque : poids maximal d'une graine</i> .....	133
<i>Épuisement des ressources carbonées et azotées</i> .....	134
Conclusion .....	135
Teneur en protéines des graines .....	135
Régulation différentielle des vitesses d'accumulation d'azote et de croissance d'une graine .....	137
Caractérisation de la quantité d'azote disponible pour le remplissage des graines .....	137
<i>Azote exogène accumulé pendant le remplissage des graines</i> .....	138
<i>Azote remobilisé</i> .....	139
<i>Effet de la température sur l'azote disponible</i> .....	139
Déterminisme de la vitesse d'accumulation d'azote d'une graine .....	140
Conclusion .....	141
Qualité germinative : déterminisme de la fragilité des graines .....	141
Les composantes de la qualité germinative .....	142
<i>La qualité physique</i> .....	142
<i>La qualité sanitaire</i> .....	142
<i>La qualité physiologique</i> .....	143
Déterminisme de la fragilité des graines .....	143
<i>Mesure et définition de la fragilité des semences</i> .....	143
<i>Teneur en eau à la récolte : une forte incidence sur la fragilité</i> .....	143
<i>Autres facteurs agissant sur la fragilité</i> .....	144
<i>Sensibilité variétale à la fragilité</i> .....	144
<i>Fragilité et caractéristiques physiques des graines</i> .....	145
<i>Étude du déterminisme agro-climatique de la fragilité par voie   d'enquête en culture</i> .....	147
<i>Effet de pluies en fin de cycle et des conditions de dessiccation</i> .....	147
Conclusion .....	148

## II. EFFETS DES STRESS ABIOTIQUES ET BIOTIQUES

<b>6. Stress abiotiques</b> .....	153
Déficit hydrique et fonctionnement d'un couvert de pois .....	153
Caractérisation du déficit hydrique et de sa perception par la plante .....	153
<i>Notions de déficit hydrique, contrainte hydrique et stress hydrique</i> .....	153
<i>Une réponse progressive de la plante à un dessèchement du sol</i> .....	154
<i>Occurrence de déficits hydriques en France</i> .....	156

Effet sur le développement .....	157
<i>Initiation florale et début de la floraison</i> .....	157
<i>Vitesse de progression des stades</i> .....	157
<i>Durée de production d'organes végétatifs et reproducteurs</i> .....	158
Effet sur la croissance .....	158
<i>Expansion des organes végétatifs</i> .....	158
<i>Photosynthèse et production de biomasse</i> .....	160
Effet sur le rendement et la qualité .....	161
<i>Nombre de graines par plante</i> .....	161
<i>Répartition des graines sur les différents phytomères reproducteurs</i> .....	161
<i>Poids d'une graine</i> .....	161
<i>Teneur en protéines</i> .....	163
<i>Qualité germinative</i> .....	163
Conclusion .....	163
Fortes températures et fonctionnement d'un couvert de pois .....	164
Caractérisation des contraintes thermiques .....	165
<i>Températures de plantes et d'air</i> .....	165
<i>Définition d'un seuil de température stressante</i> .....	166
<i>Occurrence de contraintes thermiques en France</i> .....	166
Effets des contraintes thermiques .....	168
<i>Des effets différents selon la position des contraintes thermiques dans le cycle</i> .....	168
<i>Effet sur la mise en place de la surface foliaire et sur l'interception du rayonnement</i> .....	169
<i>Effet sur la vitesse d'accumulation de biomasse</i> .....	170
<i>Effet sur la durée de cycle</i> .....	170
<i>Effet sur le nombre de graines</i> .....	172
Conclusion .....	172
Carence azotée .....	173
Caractérisation d'une carence azotée .....	173
<i>Indice de nutrition azotée</i> .....	173
<i>Existence de carences azotées pour une culture de pois</i> .....	174
Effets sur le développement .....	174
Effet sur la croissance aérienne .....	175
Effet sur le rendement et la qualité .....	177
Conclusion .....	177
État structural du sol .....	178
Effets sur le développement .....	178
Effets sur la croissance aérienne .....	178
Effets sur le système racinaire et le système fixateur .....	179
<i>Effet sur la profondeur des racines</i> .....	179
<i>Effet sur la colonisation des racines</i> .....	180
<i>Effet sur les nodosités</i> .....	181
Effets sur la nutrition azotée .....	182
Effets sur le rendement et la qualité.....	183
Conclusion .....	183



Températures froides et fonctionnement d'un couvert de pois .....	184
Définition d'une contrainte thermique froide .....	185
<i>Températures de l'air et de la plante</i> .....	185
<i>Définition d'un seuil de température stressante</i> .....	186
<i>Occurrence de températures froides en France</i> .....	187
Effet des températures froides sur le fonctionnement du couvert .....	187
<i>Effet de températures basses positives</i> .....	187
<i>Dégâts de gel</i> .....	190
Adaptation du pois aux conditions hivernales .....	191
<i>Évaluation de la capacité d'endurcissement</i> .....	191
<i>Accumulation et répartition de la matière sèche entre les organes</i> .....	192
<i>Accumulation de différents composés carbonés au cours</i> <i>de l'acclimatation</i> .....	193
Conclusion et perspectives .....	193
Fiche méthodologique : échelle de notation des dégâts de gel .....	194
<b>7. Stress biotiques</b> .....	197
Impact de l'antracnose sur le fonctionnement d'un couvert de pois et sur le rendement au champ .....	197
Le pathosystème .....	198
<i>La plante et le peuplement</i> .....	198
<i>Le parasite et la maladie</i> .....	198
<i>Le climat</i> .....	201
Action globale de l'antracnose sur le rendement et sur ses composantes	201
Processus physiologiques de l'hôte affectés par le pathogène .....	202
<i>L'activité photosynthétique</i> .....	202
<i>La remobilisation des éléments carbonés et azotés</i> .....	203
Rôle du stade de la plante et de la localisation de la maladie sur la nuisibilité .....	204
<i>Le stade de la plante</i> .....	204
<i>La localisation de la maladie sur la plante</i> .....	205
Utilisation des connaissances pour la prédiction du fonctionnement du couvert végétal .....	205
<i>Construction d'un modèle de fonctionnement d'un couvert malade</i> .....	205
<i>Rôle du cultivar dans la nuisibilité</i> .....	206
Prise en compte de la nuisibilité dans la conduite raisonnée des itinéraires techniques .....	207
Sitones .....	208
Cycle biologique, appréciation des infestations et des dégâts, effets des systèmes de culture .....	208
Effets sur la nutrition azotée et l'élaboration du rendement .....	209
Adventices .....	211

### III. INTÉGRATION DES CONNAISSANCES DANS UN MODÈLE GLOBAL ET EXEMPLES D'UTILISATION

<b>8. Un modèle pour l'intégration des connaissances et le diagnostic agronomique</b> .....	217
Pourquoi développer un modèle de culture pour le pois protéagineux ? .....	217
Structure générale des modèles de culture et données minimales requises .....	218
Description des modules .....	219
Module de phénologie .....	219
<i>La date de levée</i> .....	219
<i>La date de début de floraison</i> .....	220
<i>Le début de remplissage des graines (DRG)</i> .....	220
<i>La date de fin de franchissement du stade limite d'avortement (FSLA)</i> ....	220
<i>La date de maturité physiologique</i> .....	221
Module de croissance .....	221
Module de mise en place des capteurs aériens .....	221
Module de production de biomasse .....	221
Module d'élaboration des composantes du rendement .....	222
Module de bilan hydrique .....	223
Module de bilan azoté .....	224
Module de répartition de l'azote dans la plante .....	225
Perspectives .....	226
<b>9. Proposition d'une démarche de diagnostic pour analyser les variations de rendement</b> .....	227
Objectif et présentation générale .....	227
Description de la démarche de diagnostic .....	227
Exemples d'utilisation de la démarche de diagnostic .....	229
Caractérisation du milieu .....	230
Facteurs climatiques .....	230
<i>Quotient photothermique</i> .....	230
<i>Étude des températures froides</i> .....	231
<i>Étude des températures élevées</i> .....	231
<i>Bilan hydrique</i> .....	231
Facteurs biologiques .....	232
Facteurs physiques .....	232
Facteurs chimiques .....	232
Étude de l'élaboration du rendement .....	232
Bilan au stade début floraison .....	232
Étude des composantes de rendement .....	233
<i>Nombre de graines/m<sup>2</sup></i> .....	234
<i>Profils de graines et profils simplifiés</i> .....	235
<i>Poids de 1 000 graines (PMG)</i> .....	236
<i>Teneur en protéines</i> .....	236
<i>Indice de récolte</i> .....	237
<i>Des rendements équivalents avec des architectures très différentes</i> .....	237

<i>Utilisation de la modélisation pour l'amélioration des itinéraires techniques</i> .....	238
Utilisation des outils de caractérisation du milieu et de la culture .....	238
Vers une typologie régionale française .....	238
<i>Quotient photothermique</i> .....	239
<i>Fortes températures</i> .....	239
<i>Une analyse des potentiels de rendements</i> .....	240
Un exemple de comparaison entre années : bilan au stade début floraison .	241
Typologie des zones de production à l'échelle européenne .....	242
Conclusion .....	242
Fiche méthodologique : mesures des profils de graines et profil simplifié .....	243
Profil de graines par étage .....	243
Mesure de la structure verticale (ou profil simplifié) .....	244
<b>10. Interactions génotype × milieu pour le rendement et la teneur en protéines</b> .....	245
Importance des interactions génotype × milieu pour le rendement .....	246
Interactions entre variétés et milieux .....	246
Interactions des variétés avec les lieux et les années .....	247
Caractères pouvant induire des comportements variétaux particuliers .....	247
Des interactions génotype × milieu faibles pour la teneur en protéines .....	249
Interactions entre variétés et milieux .....	249
Interactions des variétés avec les lieux et les années .....	249
Caractères pouvant induire des comportements variétaux particuliers .....	250
Possibilité d'avoir des variétés à rendement et à teneur en protéines élevés et stables .....	250
Conclusion .....	251
<b>Perspectives pour la culture du pois protéagineux en France et en Europe</b> .....	253
Des produits de qualité pour l'alimentation humaine et animale .....	254
Une culture économe .....	254
Une solution indispensable pour la diversification des cultures .....	254
Des risques maîtrisables de transfert des nitrates dans les nappes phréatiques .....	255
Conclusion .....	256
<b>Références bibliographiques</b> .....	259
<b>Liste des auteurs</b> .....	279

