



HAL
open science

Early assessment of organic winter wheat performances (yield and grain protein content): a combination of regional agronomic diagnosis, modelling with weed indicators and analysing information sampled by farmers to manage their technical practices.

Marion Casagrande

► **To cite this version:**

Marion Casagrande. Early assessment of organic winter wheat performances (yield and grain protein content): a combination of regional agronomic diagnosis, modelling with weed indicators and analysing information sampled by farmers to manage their technical practices.. Life Sciences [q-bio]. AgroParisTech, 2008. English. NNT : 2008AGPT0052 . pastel-00004736

HAL Id: pastel-00004736

<https://pastel.hal.science/pastel-00004736>

Submitted on 9 Apr 2009

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.

THÈSE

pour obtenir le grade de

Docteur

de

**l'Institut des Sciences et Industries du Vivant et de l'Environnement
(Agro Paris Tech)**

*présentée et soutenue publiquement
par*

Marion CASAGRANDE

le 25 novembre 2008

**EVALUATION PRECOCE DES PERFORMANCES DU BLE BIOLOGIQUE
(RENDEMENT ET TENEUR EN PROTEINES) : UNE APPROCHE COMBINEE
DE DIAGNOSTIC AGRONOMIQUE, DE MODELISATION A L'AIDE
D'INDICATEURS DE NUISIBILITE ET D'ETUDES DES PRATIQUES DANS
LES EXPLOITATIONS AGRICOLES.**

Directeur de thèse : Marie-Hélène JEUFFROY

Codirecteur(s) de thèse : Christophe David, Muriel Valantin-Morison

UMR 211 Agronomie INRA/AgroParisTech, F-78850 Thiverval-Grignon

Devant le jury :

M. Thierry DORE, Professeur, **AgroParisTech**
M. Sylvain PLANTUREUX, Professeur, **ENSAIA-INPL**
M. Jacques WERY, Professeur, **SupAgro**
Mme Nathalie COLBACH, Chargée de Recherche, **INRA**.
M. Christophe DAVID, Enseignant-Chercheur, **ISARA**
Mme Claire LAMINE, Ingénieur de Recherche, **INRA**
M. Daniel NEUHOFF, Lecturer, **University of Bonn**

Président
Rapporteur
Rapporteur
Examineur
Examineur
Examineur
Examineur

Avant-propos

Je tiens à remercier en premier Christophe David, Marie-Hélène Jeuffroy et Muriel Valantin-Morison qui ont encadré, durant trois ans, ce travail de thèse et qui se sont toujours montrés disponibles. Leurs qualités scientifiques autant qu'humaines m'ont permis de mener à bien mon projet dans un cadre de travail stimulant et agréable.

Je remercie également Nathalie Joly de sa collaboration. Elle a su m'orienter dans mes lectures et a contribué efficacement à la réalisation et la valorisation des entretiens menés auprès des agriculteurs. Un grand merci à David Makowski pour son aide et sa collaboration sur les aspects statistiques de mes travaux. Ses passages impromptus dans mon bureau ont toujours été l'occasion de discussions fructueuses.

Je remercie Sylvain Plantureux et Jacques Wéry d'avoir accepté d'être rapporteurs de ce travail ainsi que Nathalie Colbach, Thierry Doré, Claire Lamine et Daniel Neuhoff, d'avoir accepté d'en être les rapporteurs.

Les membres de mon comité de pilotage, par leurs critiques toujours constructives ont largement participé à l'avancée de mes travaux. Je leur en suis très reconnaissante. Merci à Bruno Chauvel, Thierry Doré, Philippe Girardin, Alain Rodriguez et Laëtitia Willocquet.

Je remercie également Yvan Gautronneau et Joséphine Peigné pour leur aide sur le terrain en tant qu'« experts » du profil cultural. Merci aussi à Thomas Lhuillery pour sa présence sur le terrain lors de mes passages dans la Drôme.

Un grand merci encore à toute l'équipe technique de l'UMR d'Agronomie de Grignon sans qui ce travail n'existerait pas : combien d'heures passées à compter des pieds, des épis, des grains de blé ! Et une pensée toute particulière pour Mathieu Bazot, Dominique Le Floch et Richard Gosse qui ont eu le bonheur de connaître des conditions ventées, pluvieuses, enneigées et ensoleillées lors de nos déplacements sur le terrain drômois. Je remercie Christine Bouchard pour sa collaboration lors des entretiens avec les agriculteurs et pour sa participation à la valorisation des données recueillies à cette occasion. Merci également à Joëlle Brun pour son appui « logistique » et à Michèle Fanucci de s'être battue pour obtenir mes deux derniers mois de contrat mais surtout de partager la même passion que moi pour Gubbio.

Merci aux stagiaires qui ont croisé ma route, Adrien Rush, Emilie Lesage, Catherine Etienne et Cédric Vallée.

Je suis très reconnaissante aux agriculteurs investis dans ce travail de m'avoir fait confiance, de m'avoir accordé du temps, permis de travailler sur leurs parcelles et de leur poser mille questions. Ils m'ont énormément appris, tantôt au bord du champ, tantôt devant un jus de fruits bio... Un grand merci donc à Mr. Barbet, Mr. Baude, Mr. Breyton, Mr. Brun, Mr.

Cheva, Mr. Comte, Mr. Cormorèche, Mr. Douillet, Mr. Gautronneau, Mr. Géry, Mr. Grève, Mr Valentin et Mr. Vallet.

Je remercie Patrice Morand de la Chambre d'Agriculture de la Drôme pour ses « coups de main » sur le terrain. Merci à Michel Mangin d'Arvalis d'avoir mis à notre disposition les équipements de la station d'Etoile-sur-Rhône. Merci également à Rémy Laliche du groupement Cap Bio d'avoir facilité mes rencontres avec les agriculteurs.

Je remercie également tous les thésards et CDD qui m'ont entourée durant ces trois années. Sans nos débats de fond (!) à la cantine, nos pauses thé et café, nos trajets en train et parfois il faut l'avouer, nos échanges scientifiques, l'ambiance n'aurait pas été la même. Elise, Claire, Adrien, Cécile, Arnaud, Lorène, Cédric, Edouard, Nathalie, Inès, Anne-Claire, Baptiste et Mathieu se reconnaîtront. J'ai bien évidemment une pensée particulière pour ma Pélosi, qui m'a fait découvrir le coupé-décalé et les galettes de pommes de terre berrichonnes, et qui a eu le mérite de cohabiter dans le même bureau que moi pendant cette thèse. Ce fût une très belle rencontre.

Merci également à Thierry Doré, Florent Maraux et François Papy, précieux et disponibles « conseillers scientifiques » pour avoir répondu à mes interrogations sur mes orientations professionnelles.

Enfin je remercie profondément mes amis et ma famille. Merci à Stef pour son amitié sans faille et son hospitalité lors de mes passages dans la région lyonnaise (on peut dire que tu as suivi mon terrain de près !). Merci à Thomas pour son soutien et ses conseils avisés de thésard transatlantique aguerri. Merci à ceux qui ont rendu le quotidien plus léger et qui ont su me soutenir : Claire, Marianne, Béné, Alice, Marion, Eloïse et Barbara (ma presque sœur !). Merci aux Zarbi et Orbi pour ces espaces de liberté d'expression offerts lors de nos entraînements et représentations : ces bons moments ont largement contribué au maintien de ma santé mentale ! Merci à François, Annabelle, Béné, Charlotte et Eloïse pour leurs relectures en anglais et en français. Un grand merci à mes parents qui m'ont toujours encouragée et soutenue dans mes choix (même si mon sujet de thèse reste un mystère pour certains !), et qui ont toujours été persuadés que je mènerais à bien tout ce que j'entreprenais : merci pour votre optimisme et votre soutien sans faille.

Ce travail a été réalisé grâce à un financement du projet européen Quality Low Input Food (Sixth Framework Programme for Research, Technological Development and Demonstration Activities)

Table des matières

Introduction générale	1
Chapitre 1. Problématique.....	6
1. Facteurs explicatifs de la variabilité de la teneur en protéines et du rendement du blé et méthodes d'analyse	6
1.1. Les facteurs ayant un effet sur la teneur en protéines et le rendement du blé.....	6
1.1.1. La nutrition azotée.....	7
1.1.2. Les adventices	7
1.1.3. Les maladies	8
1.1.4. La température et le rayonnement	9
1.1.5. Le stress hydrique.....	10
1.1.6. Le tassement du sol	10
1.1.7. La variété.....	10
1.2. La hiérarchisation des facteurs limitants des performances du blé biologique en parcelles agricoles	12
1.2.1. Hiérarchisation des facteurs limitants du rendement	12
1.2.2. Hiérarchisation des facteurs limitants de la teneur en protéines	12
1.3. Les méthodes d'identification et de hiérarchisation des facteurs limitants en parcelles agricoles	13
1.3.1. La méthode de diagnostic agronomique régional.....	13
1.3.2. Les limites des méthodes statistiques mises en œuvre dans les démarches de diagnostic agronomique	14
2. Analyse de l'effet des adventices sur les performances du blé biologique	16
2.1. Effet des adventices sur les performances des cultures.....	17
2.1.1. Les adventices dans les systèmes biologiques : populations et moyens de lutte	17
2.1.2. Modélisation de l'effet des adventices sur les performances des cultures	18
2.2. Une méthode adaptée aux conditions d'agriculture biologique : la régression quantile	21
3. Vers un indicateur d'alerte pour aider les agriculteurs à prendre des décisions techniques.....	22
3.1. L'adéquation entre la proposition du chercheur et les pratiques de l'agriculteur	22
3.2. Les emprunts aux autres disciplines : étude des processus de prises de décision des agriculteurs pour déclencher des pratiques	24
3.2.1. Le modèle d'action.....	24
3.2.2. L'étude de l'activité dans les environnements dynamiques : un cadre méthodologique pour la mise en évidence des indicateurs des agriculteurs	27
4. Conclusion : la démarche de thèse adoptée	29

4.1. Première question de recherche.....	29
4.2. Seconde question de recherche	29
4.3. Troisième question de recherche.....	30

Chapitre 2. Identification des facteurs et des pratiques limitant les performances du blé biologique 32

I - Identification des facteurs et des pratiques limitant la teneur en protéines du blé biologique d’hiver 33

Identification of the factors limiting grain protein content of organic winter wheat using a mixing-model approach 33

1. Résumé / Abstract	33
1.1. Résumé.....	33
1.2. Abstract	34
2. Keywords.....	34
3. Introduction	34
4. Material and Methods.....	36
4.1. Data	36
4.2. Grain yield and grain protein content.....	37
4.3. Indicators of limiting factors	38
4.3.1 Water balance	38
4.3.2. Photothermal quotient and thermal stress	38
4.3.3. Soil compaction.....	38
4.3.4. Nitrogen nutrition.....	39
4.3.5. Weeds	39
4.3.6. Foliar Diseases	39
4.4. Statistical analysis	39
5. Results and discussion.....	40
5.1. Variation in grain yield and Grain Protein Content	40
5.2. Characteristics of the limiting factors	41
5.2.1. Abiotic factors	41
5.2.2. Biotic factors	41
5.3. Identification of the limiting factors of the Grain Protein Content.....	42
5.3.1. Identification and ranking of the limiting factors.....	42
5.3.2. Baking quality grade	42
5.3.3. Nitrogen nutrition.....	42
5.3.4. Weed competition	43
5.3.5. Climatic limiting factors: radiation, temperature and water availability.....	43
5.4. Effect of crop management and environmental conditions on limiting factors	44

5.4.1. Effect of crop management and environmental conditions on the indicators of climatic limiting factors	44
5.4.2. Effect of crop management and environmental conditions on Nitrogen Nutrition Index.....	44
5.4.3. Effect of crop management and environmental conditions on weed density.....	45
6. Conclusion.....	46

II - Identification des facteurs et des pratiques limitant le rendement du blé biologique d'hiver à l'aide d'une méthode statistique innovante..... 47

1. Matériels et méthodes	47
1.1. Base de données	47
1.1.1. Caractéristiques du réseau de parcelles	47
1.1.2. Caractéristiques des cultivars	48
1.1.3. Diversité des pratiques agricoles sur le réseau.....	48
1.2. Facteurs limitants testés	48
1.2.1. Les caractéristiques de cultivars.....	48
1.2.2. Stress hydrique	49
1.2.3. Quotient photothermique et températures	49
1.2.4. Tassement du sol	49
1.2.5. Nutrition azotée du blé	49
1.2.6. Adventices	50
1.2.7. Maladies foliaires	50
1.3. Méthodes statistiques	50
1.3.1. Identification des facteurs limitants	50
1.3.2. Identification des pratiques agricoles.....	51
2. Résultats	51
2.1. Variation du rendement, de ses composantes et des facteurs limitants.....	51
2.2. Les facteurs limitants identifiés.....	51
2.3. Les pratiques agricoles et les conditions environnementales responsables des variations des facteurs limitants	52
2.4. Comparaison des méthodes statistiques utilisées	52
2.4.1. Comparaison des résultats obtenus : facteurs identifiés et classement de ces facteurs	52
2.4.2. Comparaison des performances des deux méthodes	53
3. Discussion.....	54
3.1. Interprétation des effets des facteurs limitants identifiés	54
3.2. Interprétation des effets des pratiques et des conditions environnementales identifiées	54
3.2.1. Effet des pratiques et des conditions environnementales sur les facteurs abiotiques	54

3.2.2. Effet des pratiques et des conditions environnementales sur les facteurs biotiques	55
3.3. Comparaison des méthodes statistiques	57
3.4. Comparaison avec les résultats obtenus dans le diagnostic précédent.....	58
3.4.1. Cas du nombre de grains par m ² (NG)	58
3.4.2. Cas du poids de mille grains (PMG)	59

III - Mise en regard des résultats obtenus sur le rendement et la teneur en protéines	60
1. Les facteurs limitants des performances du blé biologique.....	60
2. Les pratiques à préconiser pour une amélioration des performances du blé biologique	60

Chapitre 3. Estimation des distributions du rendement, de la teneur en protéines et de la densité d'adventices en blé biologique à l'aide d'un indicateur précoce de la compétition des adventices

Estimation of yield, grain protein content and late weed density distributions from early weed measurement in organic winter wheat.....

1. Résumé / Abstract	64
1.1. Résumé	64
1.2. Abstract	64
2. Keywords.....	64
3. Introduction	65
4. Material and Methods.....	66
4.1. Data	66
4.2. Fitted models	67
4.3. Statistical analysis	69
5. Results	69
5.1. Variation in grain yield, grain protein content, Shannon index and weed density ...	69
5.2. Prediction of yield distribution of organic winter wheat.....	70
5.2.1. Prediction of yield distribution using early Shannon index as a predictor.....	70
5.2.2. Prediction of yield distribution using early weed density as a predictor.....	70
5.3. Prediction of grain protein content distribution of organic winter wheat	70
5.3.1. Prediction of grain protein content distribution using early Shannon index as a predictor	70
5.3.2. Prediction of grain protein content distribution using early weed density as a predictor	71
5.4. Prediction of late weed density distribution with weed control effect.....	71

5.4.1. Prediction of late weed density distribution using early Shannon index as a predictor	71
5.4.2. Prediction of late weed density distribution using early weed density as a predictor	71
6. Discussion.....	72
6.1. Using early weed density and Shannon index as predictors	72
6.1.1. Early weed density	72
6.1.2. Shannon index	72
6.2. Mechanical weed control effectiveness on grain yield	73
6.3. Using crop yield and late weed density predictions to manage cropping techniques.....	74
6.3.1. Managing mechanical weed control.....	74
6.3.2. Managing fertilization	74
6.4. Benefits of using quantile regression	75

Chapitre 4. Identification des informations sur les adventices mobilisées par les agriculteurs et comparaison avec les indicateurs identifiés à partir de nos travaux de recherche..... 77

1. Introduction	78
1.1. La gestion des environnements dynamiques	78
1.2. La prise d'information.....	79
1.3. De la difficulté d'accéder aux connaissances, représentations et informations mobilisées par les agriculteurs	80
1.4. Cas d'étude et questions de recherche.....	82
2. Matériels et méthodes	83
2.1. Le recueil des informations : deux séries d'enquêtes auprès des agriculteurs	83
2.1.1. Le choix des agriculteurs.....	83
2.1.2. La première série d'enquêtes : entretiens « en salle ».....	84
2.1.3. La seconde série d'enquêtes : entretiens « sur la parcelle ».....	85
2.2. L'analyse des données recueillies	86
3. Résultats	88
3.1. Les résultats des premières enquêtes : caractéristiques des exploitations et itinéraires techniques types	88
3.2. Diversité des valeurs prises par les arguments.....	89
3.2.1. Zone de prélèvement de l'information et procédure spatiale	89
3.2.2. Objet et procédure sensorielle	91
3.2.3. But, type de gestion et condition	91
3.2.4. Les informations prélevées.....	92
3.3. Comment les informations prélevées sont-elles associées aux différents arguments ?	93
3.3.1. Procédures spatiales et conditions de prélèvement des informations.....	93

3.3.2. Informations prélevées en fonction des buts	94
3.3.3. Informations prélevées en fonction des agriculteurs	95
3.4. Les informations les plus mobilisées par les agriculteurs : la quantité et la diversité	96
3.4.1. La quantité	96
3.4.2. La diversité des espèces	97
3.4.3. Comparaison quantité et diversité des espèces	97
4. Discussion	98
4.1. Surveiller, alerter, agir : quelles compétences développées et quelles informations prélevées dans l'action ?	98
4.2. Relation entre les informations prélevées et les caractéristiques des exploitations agricoles	99
4.3. Intérêts et limites de la méthode retenue	100
4.3.1. Limites des enquêtes réalisées.....	100
4.3.2. Intérêts d'utiliser les concepts et méthodes d'analyse des environnements dynamiques.....	101
4.4. Mise en regard des informations prélevées par les agriculteurs avec les indicateurs mis en évidence dans le chapitre 4	102
Chapitre 5. Discussion générale, perspectives et conclusion.....	105
1. Retour sur les objectifs et bilan du travail réalisé.....	105
2. Retour sur la démarche et les méthodes mobilisées	107
2.1. Retour sur la démarche.....	107
2.2. Changements d'échelle et extrapolation des résultats.....	108
2.3. Prise en compte de l'interaction des adventices avec les autres facteurs limitants et les pratiques agricoles	111
2.4. Modélisation de l'effet des adventices	114
2.4.1. Effet des adventices sur le taux de protéines.....	114
2.4.2. Effet de la diversité des adventices sur les performances du blé	114
3. Vers un outil d'aide à la décision	117
3.1. Evaluation de la population d'adventices.....	117
3.1.1. Vers un indicateur défini collectivement	117
3.1.2. Traduction de la notion de « quantité ».....	118
3.2. Vers un outil d'aide à la décision pour gérer les pratiques de désherbage.....	120
3.3. Vers un outil d'aide à la décision pour gérer les pratiques de fertilisation azotée..	121
3.4. Vers un outil pour faciliter la collecte	122
4. Conclusion générale	123
Références	124
Annexes	137

INTRODUCTION GENERALE

Encadré 1.1. Définitions de l'agriculture biologique

Définition internationale de l'agriculture biologique

D'après l'IFOAM (International Federation of Organic Agriculture Movements), l'agriculture biologique est basée sur quatre principes : 4 principes

- *Le principe de santé* : « L'agriculture biologique devrait soutenir et améliorer la santé des sols, des plantes, des animaux, des hommes et de la planète, comme étant une et indivisible. »
- *Le principe d'écologie* : « L'agriculture biologique devrait être basée sur les cycles et les systèmes écologiques vivants, s'accorder avec eux, les imiter et les aider à se maintenir »
- *Le principe d'équité* : « L'agriculture biologique devrait se construire sur des relations qui assurent l'équité par rapport à l'environnement commun et aux opportunités de la vie. »
- *Le principe de précaution* : « L'agriculture biologique devrait être conduite de manière prudente et responsable afin de protéger la santé et le bien-être des générations actuelles et futures ainsi que l'environnement. »

Ces principes guident les prises de position, les programmes et les règles élaborées par IFOAM et sont ensuite déclinés dans les différents pays.

Source : site de l'IFOAM

Définition française de l'agriculture biologique

Même si les principes de l'agriculture biologique ont été introduits en France après la Seconde Guerre Mondiale, sa première officialisation remonte à la loi d'orientation agricole (LOA) de 1980. Le terme « agriculture biologique » apparaît pour la première fois en 1991 dans un règlement européen qui reconnaît officiellement ce mode de production (règlement CEE du Conseil n°2092/91 du 24 juin 1991 pour les productions végétales).

D'après le Ministère de l'Agriculture et de la pêche, l'agriculture biologique est un mode de production qui a recours à des pratiques culturelles soucieuses du respect des équilibres naturels. Ce mode de production exclut l'usage des produits chimiques de synthèse, des OGM et limite l'emploi d'intrants.

D'après l'Institut Technique de l'Agriculture Biologique (ITAB), ce mode de production suit plusieurs principes agronomiques. La fertilisation doit permettre le maintien ou l'augmentation de la fertilité et de l'activité biologique du sol par l'utilisation notamment d'engrais verts ou de compost. La lutte contre les adventices peut être réalisée grâce à de nombreuses techniques de lutte telles que la gestion des rotations ou le désherbage mécanique. La lutte contre les maladies et les ravageurs est principalement assurée par des pratiques préventives telles que l'utilisation de variétés résistantes ou des dates de semis raisonnées.

Source : sites du ministère de l'agriculture et de l'ITAB

Introduction générale

En ce début de 21^{ème} siècle, l'agriculture mondiale fait face à de nouveaux enjeux. D'une part, la demande en céréales va doubler d'ici 2050, en lien avec l'accroissement des besoins de l'alimentation humaine, mais aussi de l'alimentation du bétail (Trewavas, 2002). D'autre part, les nouvelles exigences de la société imposent une production agricole garantissant la sécurité sanitaire, la qualité nutritionnelle et le respect de l'environnement. Ces nouveaux enjeux impliquent un accroissement de la production et de la qualité des produits agricoles tout en évitant les risques environnementaux liés à l'agriculture tels que les pollutions liées à l'usage intensif de produits phytosanitaires et d'engrais azotés ou la diminution de la biodiversité (Trewavas, 2002 ; Tilman *et al.*, 2002). Pour atteindre ce double objectif, il convient de mettre en œuvre des pratiques agricoles qui garantissent la préservation des ressources naturelles tout en maintenant un haut niveau de performances.

L'agriculture biologique, en excluant l'utilisation d'engrais minéraux et de produits phytosanitaires de synthèse (voir encadré 1.1. ci-contre), offre l'opportunité d'une production agricole plus respectueuse de l'environnement mais aussi économiquement viable (Reganold *et al.*, 2001). Les systèmes conduits en agriculture biologique améliorent la fertilité des sols et limitent la consommation d'énergie fossile en limitant le recours aux produits de synthèse et en limitant l'utilisation des engins agricoles. (Mäder *et al.*, 2002). Cependant, Trewavas (2001) souligne que certains produits autorisés en agriculture biologique tels que la roténone sont instables et dangereux pour la santé humaine. De plus, le lessivage de nitrates n'est pas forcément réduit dans les systèmes biologiques utilisant des matières organiques en excès (Trewavas, 2001 ; Macilwain, 2004). Par ailleurs, l'agriculture biologique est reconnue comme un mode de production ayant généralement un impact positif sur la richesse et l'abondance des espèces (Bengtsson *et al.*, 2005 ; Hole *et al.*, 2005). Selon Lamine et Bellon (2008), la conversion à l'agriculture biologique peut passer par trois étapes : d'abord, une substitution des intrants chimiques, puis une augmentation de l'efficacité des intrants et enfin une modification complète du système de culture¹. Toutefois, ces trois étapes ne sont pas nécessairement atteintes par tous les agriculteurs, certains se contentant de la première étape, sans aller jusqu'à l'optimisation du système de culture. L'agriculture biologique est alors essentiellement appréhendée comme un mode de production reposant sur une obligation de moyens (soit le respect de la réglementation) et non pas sur une obligation de résultats telle

¹ **Système de culture** : ensemble des modalités techniques mises en œuvre sur des parcelles traitées de manière identique. Un système de culture est donc caractérisé par la nature des cultures et leur ordre de succession, et par les itinéraires techniques appliqués à ces différentes cultures, incluant le choix des variétés (Sebillotte, 1990). L'itinéraire technique est une combinaison logique et ordonnée des techniques mises en œuvre sur une parcelle en vue d'en obtenir une production (Sebillotte, 1978).

Encadré 1.2. Les aides à l'agriculture biologique

Il existe différents types d'aide à l'agriculture biologique. Ce sont principalement des aides à la conversion. Les aides de soutien à l'agriculture biologique restent rares.

Le dispositif Mesures Agroenvironnementales (MAE)

Ce dispositif existe depuis 2007 et a remplacé les CTE et les CAD. Ce sont des dispositifs engagés pour 5ans, de deux types :

- *Conversion à l'Agriculture Biologique (CAB)* : rémunération annuelle par hectare engagé (ex : 200 €/ha/an pour les cultures annuelles), le total des aides ne doit pas dépasser 7600 € par exploitation agricole.
- *Maintien de l'Agriculture Biologique (MAB)* : rémunération annuelle par hectare engagé (ex : 100 €/ha/an pour les cultures annuelles), le total des aides ne doit pas dépasser 7600 € par exploitation agricole.

Bien qu'établi au niveau national, ce dispositif est géré par les régions. Celles-ci choisissent les montants alloués pour chacune des deux enveloppes. De ce fait, toutes les régions ont choisi de garder le volet CAB, alors que seules 2 régions ont conservé le volet MAB (qui se révèle trop coûteux dans les régions comptants trop d'agriculteurs biologiques)

Le crédit d'impôt

Le crédit d'impôt est cumulable avec le volet CAB mais pas avec le volet MAB. Pour en bénéficier, il suffit de respecter le cahier des charges de l'agriculture biologique sur au moins 50 % de la surface totale de l'exploitation agricole. Ces surfaces ne doivent pas être aidées par ailleurs et doivent permettre de produire plus de 40 % du chiffre d'affaire de l'exploitation agricole. C'est un forfait de 1200 € auquel s'ajoutent 200 € par hectare avec un plafond à 2000 €.

Les aides à la certification

Ce sont des dispositifs régionaux qui prennent en charge une partie des coûts de certification. En région Rhône-Alpes par exemple, 50 % du coût de la certification est pris en charge dans la limite de 450 € par an et par exploitation. Pour les surfaces en conversion, l'Europe peut financer 30 % supplémentaires.

Les aides à l'investissement

Certains départements peuvent proposer des aides à l'investissement. De plus, le Plan Végétal Environnement (PVE) a pour objectif de promouvoir les techniques alternatives qui répondent aux 3 enjeux suivants : conservation de la biodiversité, limitation de l'utilisation des pesticides et limitation du lessivage des nitrates. Les producteurs dont le siège d'exploitation se trouve sur une commune qui répond à un ou plusieurs des enjeux (le classement des communes est diffusé par la DDA) peuvent bénéficier d'aide au financement d'investissements en matériel (de 20 à 40 % du montant hors taxe de l'investissement). Cette aide est valable pour des investissements de 4000 € minimum, et parmi une liste de matériel prédéfinie.

que l'obtention de produits de qualité et de moindre empreinte écologique. La conversion de l'ensemble des surfaces agricoles mondiales à l'agriculture biologique afin de répondre aux objectifs de limitation des impacts environnementaux de l'agriculture et de satisfaction des besoins alimentaires mondiaux fait actuellement débat (Gewin, 2004 ; Badgley *et al.*, 2007).

En France, afin d'accroître la durabilité de l'agriculture, le Grenelle de l'Environnement a récemment défini des objectifs d'augmentation des surfaces agricoles cultivées en agriculture biologique, en incitant notamment à les localiser de préférence dans les zones de captage d'eau potable. L'objectif est d'atteindre 6 % de la SAU² d'ici 2010, 15 % en 2013 et 20 % d'ici 2020 (Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'Aménagement du Territoire, MEDDAT, 2007). Bien que ces objectifs soient peu réalistes au regard de la part actuelle d'agriculture biologique en France (soit 2 % de la SAU (Agence BIO, 2007)), des mesures de soutien financier ont été mises en place aux échelles européenne, nationale et régionale, dans le but de favoriser la conversion mais aussi, dans certaines régions, de maintenir la production biologique (voir encadré 1.2. ci-contre). On distingue des aides à la conversion (les plus répandues), des aides au maintien (qui restent encore anecdotiques) et des aides à l'investissement et à la certification. Malgré la mise en place d'un premier plan de développement de l'agriculture biologique dès 1997 (Riquois, 1997), les objectifs d'augmentation de surfaces cultivées en agriculture biologique n'ont pas été atteints. En 1997, l'objectif était de « parvenir à 25 000 exploitations et 1 million d'ha en 2005 ». Or en 2005, seulement 11 400 exploitations, représentant 550 500 ha (soit 1,99 % de la SAU nationale), étaient certifiées en agriculture biologique ou en conversion (Agence BIO, 2007). Bien que les intentions politiques en faveur de l'agriculture biologique soient toujours très enthousiastes, les moyens mis en œuvre ne sont pas toujours suffisants, comparativement aux mesures mises en place dans d'autres pays Européens tels que les pays scandinaves, la Suisse, l'Autriche et plus récemment le Royaume Uni (Lampkin *et al.*, 1999), et les freins à la conversion restent importants.

En effet, dans une étude réalisée auprès de céréaliers et/ou de viticulteurs autrichiens, Schneeberger *et al.*, (2002) soulignent que les principaux freins à la conversion des systèmes sont techniques (en particulier, la crainte de ne pas maîtriser les adventices et les maladies), économiques (la peur de la dépendance aux aides et de l'augmentation du temps de travail), et sociaux (le risque d'isolement). De plus, la faible structuration des marchés (marchés saturés ou filières peu organisées) et l'instabilité des prix peuvent également constituer des obstacles

² SAU : Surface Agricole Utilisée, Elle comprend les terres arables (y compris pâturages temporaires, jachères, cultures sous verre, jardins familiaux...), les surfaces toujours en herbe et les cultures permanentes (vignes, vergers...).

à la conversion (Taylor *et al.*, 2001). Enfin, la crainte de la baisse des niveaux de production est aussi un frein à la conversion (Tamm, 2000).

Au niveau mondial, les céréales représentent la part la plus importante des surfaces arables biologiques (soit 35 % des terres arables) (Willer et Yussefi, 2007). En France, elles couvrent 55 % des terres arables biologiques (Agence BIO, 2007). Les rendements des céréales biologiques sont très variables et en général inférieurs de 7 à 40 % à ceux observés dans des systèmes conventionnels (Offermann et Nieberg, 2000 ; Badgley *et al.*, 2007 ; El-Hage Scialabba, 2007). Cependant, la différence est d'autant plus élevée que le système conventionnel comparé est intensif (Zundel et Kilcher, 2007). De plus, la phase de conversion conduit à une diminution forte du niveau de production amplifiée par l'absence de maîtrise technique. A l'inverse, Badgley *et al.*, (2007) montrent à l'aide d'une méta-analyse compilant des données issues de nombreuses expérimentations que, dans les pays en voie de développement, les rendements des céréales biologiques sont peu différents voire parfois plus élevés que les rendements conventionnels.

Les rendements et la teneur en protéines des grains de blé (*Triticum aestivum* L.) conduit en agriculture biologique sont généralement très variables et inférieurs à ceux observés en agriculture conventionnelle (Samuel et East, 1990 ; Gooding *et al.*, 1993 ; Taylor *et al.*, 2001 ; David *et al.*, 2004a ; Carcea *et al.*, 2006 ; Lueck *et al.*, 2006 ; Wilkinson *et al.*, 2006).

Ces faibles rendements s'expliquent essentiellement par la présence de nombreux facteurs limitants tels que le déficit azoté (Lueck *et al.*, 2006 ; Wilkinson *et al.*, 2006), les adventices (Eisele, 1998 ; Bond et Grundy, 2001 ; Bàrberi et Bonari, 2005), les ravageurs et maladies (van Bruggen, 1995 ; Lueck *et al.*, 2006 ; Wilkinson *et al.*, 2006), le tassement du sol (Peigné *et al.*, 2007) ou le déficit hydrique (Dunbabin, 2002). De plus, les pratiques de fertilisation sont mal maîtrisées par les agriculteurs (gestion de l'efficacité des fertilisants, des dates et doses d'apport), ne permettant pas une valorisation optimale de l'azote apporté (David *et al.*, 2004a). Il y a donc un réel besoin de maîtrise technique nécessitant l'acquisition de nouvelles connaissances. Il s'agit avant tout de connaître les effets de ces facteurs limitants sur les performances du blé, mais aussi d'appréhender leur hiérarchie en fonction des conditions de production : en identifiant les facteurs les plus importants, on identifiera les leviers qui permettront d'améliorer la production. Plus particulièrement, les effets des adventices sur les performances sont complexes et mal connus (Taylor *et al.*, 2001). Un diagnostic agronomique régional (Doré *et al.*, 1997) a été réalisé sur le rendement de blés biologiques cultivés en région Rhône-Alpes afin de hiérarchiser ces facteurs limitants (David *et al.*, 2005a). Toutefois, il n'existe pas à ce jour de diagnostic établi pour la teneur en protéines. Or, d'après Taylor *et al.* (2001), identifier les facteurs qui affectent la qualité des blés biologiques est un défi à relever.

En effet, un des problèmes majeurs de la production de blé biologique en France est la qualité technologique mais aussi nutritionnelle et sanitaire des grains (David et Joud, 2008). Face à une augmentation croissante des volumes de blé biologique collectés (ONIGC, 2006), les collecteurs sont de plus en plus exigeants vis-à-vis de la qualité boulangère des céréales produites. Le seuil de teneur en protéines exigé par les minotiers et les industriels de la panification a augmenté récemment et se situe actuellement entre 10 et 11,5 % (David *et al.*, 2007). Lorsque les lots n'atteignent pas le seuil exigé (généralement 10,5 %), le blé est alors déclassé et vendu aux filières d'alimentation animale à un prix inférieur de 30% en moyenne à celui des filières de panification. De plus, les collecteurs mettent en place une politique de modulation des prix d'achat (au maximum de 25 %) en fonction de la teneur en protéines (David et Joud, 2008). Il y a donc un réel enjeu pour les agriculteurs d'arriver à produire des blés biologiques avec des teneurs en protéines suffisamment élevées afin d'avoir un accès assuré au marché de la panification. Les teneurs en protéines obtenues étant très variables, il ne s'agit pas seulement d'augmenter mais aussi de stabiliser la qualité : la maîtrise technique de la production doit permettre de limiter la variabilité d'une année à l'autre et d'une parcelle à l'autre.

Les systèmes céréaliers biologiques sans élevage, apparus depuis le milieu des années 1990, connaissent des difficultés vis-à-vis de l'approvisionnement en engrais ou amendements azotés d'origine organique. Ils ont souvent recours à des engrais organiques (farine de plumes, soies de porcs, farine de viande, guano) produits hors de leur exploitation et relativement coûteux, appliqués en couverture au printemps, associés ou non à une fertilisation d'automne à base d'amendements organiques (lisier, fumier caprin, fumier ovin, fumier bovin, fumier de volailles, composts de déchets verts). De plus, leurs rotations sont généralement courtes et contiennent peu de légumineuses fourragères (David *et al.*, 2004a), culture qui pourrait pourtant fournir de l'azote à faible coût dans le système. L'azote étant un des principaux facteurs expliquant la teneur en protéines (Lueck *et al.*, 2006), il faudrait mieux connaître l'efficacité des produits apportés et les facteurs susceptibles de limiter l'efficacité de l'azote, afin de proposer des stratégies de fertilisation optimisées. Le modèle AZODYN-ORG est un modèle dynamique journalier qui permet de prédire le rendement et la teneur en protéines du blé biologique en fonction de l'azote disponible dans le sol, des caractéristiques du sol de la parcelle, et des conditions climatiques de l'année (David *et al.*, 2004b ; David *et al.*, 2005b). Il permet également de sélectionner les meilleures stratégies de fertilisation azotée de printemps (définies par le type de produit appliqué, la date et la dose d'apport) en prenant en compte, a posteriori, les autres facteurs limitants qui ont pu limiter le rendement (David *et al.*, 2005b). Par conséquent, il serait intéressant de prédire l'effet de ces facteurs *a priori*, c'est-à-dire en cours de cycle, non plus uniquement sur le rendement mais aussi sur la teneur en protéines, afin d'adapter la stratégie de fertilisation en cours de cycle.

L'objectif de ce travail de thèse est donc d'identifier et de hiérarchiser les facteurs limitant les performances du blé biologique en parcelles agricoles et plus particulièrement ceux qui

expliquent la variabilité et les faibles teneurs en protéines. Il s'agit également de quantifier l'effet des principaux facteurs sur ces performances et de proposer des indicateurs précoces de ces facteurs, actionnables par les agriculteurs, qui leur permettent d'adapter les techniques culturales appliquées. Pour cela, le travail a été réalisé sur un réseau de parcelles agricoles situées dans la région Rhône-Alpes. Cette région est la troisième région française en terme de surfaces cultivées en agriculture biologique (Agence BIO, 2007) et la première région en terme de collecte de blé biologique (ONIGC, 2006).

Ce travail s'organise autour de cinq chapitres. Le premier présente une analyse bibliographique. Le second chapitre présente un diagnostic des facteurs limitants de la teneur en protéines et du rendement du blé biologique. Dans le troisième chapitre, on s'attachera à prédire l'effet des adventices sur les performances du blé biologique (rendement et teneur en protéines) à l'aide d'un indicateur précoce. Le quatrième chapitre étudiera les informations relatives aux adventices que prélèvent les agriculteurs sur leurs parcelles pour prendre leurs décisions au cours du cycle afin de les confronter aux indicateurs issus du quatrième chapitre. Nous concluons par une discussion générale mettant en regard les résultats obtenus dans les différents chapitres (cinquième chapitre).

CHAPITRE 1

Problématique

Chapitre 1.

Problématique

1. Facteurs explicatifs de la variabilité de la teneur en protéines et du rendement du blé et méthodes d'analyse

1.1. Les facteurs ayant un effet sur la teneur en protéines et le rendement du blé

Il existe beaucoup plus de travaux décrivant les facteurs limitants potentiels du rendement que d'études sur ceux de la teneur en protéines. Cependant, le rendement et la teneur en protéines du blé sont des variables corrélées négativement (Oury *et al.*, 2003). En effet, la teneur en protéines (TP) dépend de l'azote présent dans les grains (N_{grains}) et du rendement (Y) selon l'équation suivante :

$$TP = 5.7 \times \frac{N_{grains}}{Y} \quad (1)$$

Or, le rendement (Y) est le produit du nombre de grains par m² (NG) et du poids de mille grains (PMG) :

$$Y = NG \times PMG \quad (2)$$

Par conséquent, la teneur en protéines dépend directement des composantes du rendement :

$$TP = 5.7 \times \frac{N_{grains}}{NG \times PMG} \quad (3)$$

A même quantité d'azote contenue dans les grains, le pourcentage d'azote dans les grains est d'autant plus faible que le poids des grains est élevé et/ou que le nombre de grains augmente, par effet de dilution (cf. équation (3) ci-dessus). Les facteurs qui sont susceptibles d'affecter les composantes du rendement pourront donc également avoir un effet sur la teneur en protéines du blé. L'élaboration de ces deux composantes du rendement se réalise pendant deux phases successives du cycle de la culture, ce qui permet d'utiliser ces deux variables comme révélatrices des facteurs limitants apparus pendant chacune d'elles (Sebillotte, 1980) : on considère que le NG est caractéristique de la phase végétative du blé puisqu'il est déterminé entre le semis et la floraison, alors que le PMG caractérise la phase de remplissage des grains, qui démarre à partir de la floraison. La teneur en protéines du blé étant déterminée par l'accumulation d'azote dans les grains issue, d'une part, de l'azote accumulé dans la plante à la floraison et, d'autre part, de l'absorption d'azote post floraison, elle caractérise également la phase de remplissage des grains. Les facteurs explicatifs de la variabilité du

rendement et de la teneur en protéines seront donc étudiés conjointement. Notons que ces facteurs sont généralement identifiés indépendamment les uns des autres, et donc rarement dans une démarche de hiérarchisation prenant en compte leurs interactions éventuelles. Nous présentons dans cette partie les effets des facteurs qui peuvent expliquer les variations de rendement et/ou de teneur en protéines.

1.1.1. La nutrition azotée

L'azote disponible dans la plante va influencer à la fois le rendement et la teneur en protéines. En effet, l'Indice de Nutrition azotée (INN¹), qui caractérise le statut azoté de la plante et en particulier l'existence et l'intensité d'un déficit potentiel, est relié positivement au nombre de grains par m² et à la teneur en protéines (Debaeke *et al.*, 1996 ; Justes *et al.*, 1997). En cas de carence azotée, le nombre de grains est directement relié à l'intensité et à la durée de la carence azotée subie par la culture (Jeuffroy et Bouchard, 1999). L'amélioration du niveau et des conditions d'apport azoté permet alors d'augmenter l'azote absorbé. Selon la période du cycle pendant laquelle l'absorption d'azote est accrue, cela pourra se traduire soit par une augmentation du rendement (en cas d'absorption suffisamment précoce par rapport au stade floraison), soit par une augmentation de la teneur en protéines, en cas d'absorption tardive (Pechanek *et al.*, 1997 ; Fowler, 2003). De plus, une étude sur l'utilisation d'un apport de lisier, dans des conditions de volatilisation limitée, a montré que la teneur en protéines des grains était corrélée positivement avec la dose d'azote apportée et que les apports au printemps permettaient une meilleure efficacité de l'azote par rapport à des apports à l'automne ou en hiver (Hayward *et al.*, 1993).

1.1.2. Les adventices

A l'échelle mondiale, les pertes potentielles de rendement en blé, dues aux adventices (en absence de traitement herbicide), ont été estimées à 30 % en utilisant des données expérimentales et issues de la littérature (Oerke et Dehne, 1997). En effet, les adventices, au-delà d'un certain niveau d'infestation, limitent le rendement, du fait d'une forte compétition pour la lumière, les ressources minérales (notamment azotées) et hydriques. L'effet négatif de la densité d'adventices sur le rendement a été largement étudié et modélisé depuis les premiers travaux de Dew (1972) et Cousens (1985a).

D'une étude à l'autre, l'effet des adventices sur la teneur en protéines du blé est variable : il est parfois négatif, parfois positif, parfois non significatif. Les travaux de Palta et Peltzer

¹ INN : indice défini comme le ratio entre la teneur en azote observée dans les parties aériennes et la teneur en azote critique. La teneur en azote critique correspond à un état optimal de nutrition azotée de la plante par rapport à sa biomasse sèche déterminée par une courbe (Justes *et al.*, 1994).

(2001) montrent un effet négatif de l'ivraie raide (*Lolium rigidum* Gaudin) sur la teneur en protéines, dû à une compétition pour l'absorption de l'azote. Awan *et al.* (2001) mettent en évidence un effet négatif des populations de vulpin et de gaillet gratteron (*Alopecurus myosuroides* et *Galium aparine*) sur la teneur en protéines du blé. Cependant, une étude montre que l'effet des adventices (graminées et dicotylédones) peut être variable d'un site à l'autre : positif, négatif ou inexistant et dépend de la compétition en fin de cycle entre les adventices et la culture pour les ressources en eau et en azote (Mason et Madin, 1996). De même, Korres et Froud-Williams (2001) montrent que la compétition des adventices n'affecte pas la teneur en protéines du blé. Ces résultats contradictoires peuvent s'expliquer par le fait que la compétition entre la culture et les mauvaises herbes est dépendante des conditions climatiques (disponibilité en eau par exemple) et agronomiques (disponibilité en azote par exemple) du milieu ainsi que de l'interaction entre les deux.

En agriculture biologique, différents résultats existent également sur les effets des adventices sur ces deux variables. Dans une étude californienne comparant différents systèmes de production de tomate et de maïs, Clark *et al.* (1998) ont montré que l'abondance des adventices (caractérisée par la surface recouverte par une population plurispécifique d'adventices) était corrélée négativement au rendement de ces cultures. Ils concluent que les adventices sont au moins partiellement responsables des rendements plus bas observés dans le système biologique. De même, Welsh *et al.* (1999) ont montré que des populations d'adventices (composées principalement de vulpin et de matricaire inodore, *Alopecurus myosuroides* et *Tripleurospermum inodorum*,) avaient un effet négatif sur le rendement du blé biologique. Huxham *et al.* (2005) ont étudié l'incidence de différentes stratégies de conversion sur le blé lors de la première année de conversion à l'agriculture biologique. Contrairement à Clark *et al.* (1998), ils ne trouvent pas d'effet des adventices sur le rendement de la culture. Pour ces auteurs, les adventices sont plutôt un symptôme qu'une cause de la mauvaise implantation de la culture, qui explique alors les faibles rendements. Enfin, Wilkinson *et al.* (2007), évoquent un effet négatif de la compétition des adventices sur la teneur en protéines des grains dû à des niveaux d'infestation importants en systèmes biologiques. L'incidence des adventices sur les performances du blé est déterminée par le niveau de population des adventices, les conditions de développement du blé et le niveau des ressources pour lesquelles les adventices et la culture sont en compétition.

1.1.3. Les maladies

En parcelles agricoles, les maladies foliaires se manifestent le plus souvent après la floraison du blé. Par conséquent, elles peuvent avoir un effet principalement sur le poids de mille grains et/ou la teneur en protéines. En effet, les maladies affectent la surface verte des feuilles, et limitent par conséquent la photosynthèse (Audsley *et al.*, 2005), réduisant l'accumulation de biomasse dans les grains (van Bruggen, 1995). Le PMG, peut donc se trouver réduit, et de ce fait induire une diminution du rendement et une augmentation de la teneur en protéines. Ainsi, Debaeke *et al.* (1996) ont montré que les attaques de rouille brune augmentaient la valeur de

la teneur en protéines du blé. Toutefois, selon Rabbinge *et al.* (1990), l'effet des maladies foliaires et/ou racinaires sur l'accumulation d'azote dans la plante et le transfert vers les grains reste mal connu. Les maladies peuvent limiter l'absorption et l'accumulation de l'azote dans la plante (Schoeny *et al.*, 2003, pour le piétin-échaudage) ou encore induire un détournement des assimilats (Boote *et al.*, 1983).

Notons que la pression en maladies dans les systèmes biologiques est plus faible qu'en systèmes conventionnels en raison (i) de tallages faibles, induisant un micro-climat au sein du couvert moins favorable au développement des maladies (Savary *et al.*, 1995), (ii) de conditions azotées plus limitantes qui limitent le tallage et la création d'un micro-climat favorable aux maladies et (iii) de l'utilisation plus fréquente de variétés résistantes aux maladies. En effet, dans les situations fortement fertilisées, la culture est moins résistante aux maladies (Palti, 1981) alors qu'une fertilisation azotée réduite permet de réduire les risques de maladies (Saulas et Meynard, 1998). Enfin, la nature et la pression des maladies sont très dépendantes des conditions climatiques et, par conséquent, varient fortement entre les années et entre les régions (Zhang *et al.*, 2006).

1.1.4. La température et le rayonnement

Dans une gamme allant de 0 à 20-25°C environ, les températures sont connues pour avoir un effet positif sur l'accumulation de biomasse et d'azote dans les grains pendant la période de remplissage des grains (Sofield *et al.*, 1977). Cependant, au-delà d'un certain seuil (entre 20 et 30°C), les hautes températures limitent plus rapidement l'accumulation de matière sèche que celle d'azote, entraînant une diminution du poids de mille grains et une augmentation de la teneur en protéines (Spiertz, 1977 ; Bhullar et Jenner, 1985 ; Debaeke *et al.*, 1996 ; Gooding *et al.*, 2003). Zahedi *et al.* (2004) ont par ailleurs montré que, lorsque la disponibilité en azote augmente, la teneur en protéines augmente moins avec des températures hautes (25-30°C) qu'avec des températures basses (15-20°C).

Une diminution du rayonnement global auquel est soumise la plante affecte directement l'accumulation de matière sèche et peut donc limiter le poids moyen des grains, entraînant une augmentation de la teneur en protéines (Singh et Jenner, 1984).

Pendant la période végétative, une augmentation de la température joue directement sur la durée du cycle végétatif, puisque la durée entre deux stades de développement est très dépendante des sommes de températures. Une augmentation de la température réduit donc, en nombre de jours, la durée de la phase végétative, et conduit généralement à une réduction de la quantité de rayonnement intercepté par la culture. Ces deux effets antagonistes ont un effet sur le nombre de grains élaboré par la culture, ce dernier étant étroitement lié à la matière sèche donc à la croissance de la culture (Fischer, 1985). Ainsi, Fischer (1985) a montré que le quotient photothermique (ratio entre le rayonnement global journalier moyen et la température journalière moyenne) calculé pour les 30 jours précédents la floraison avait un effet positif

linéaire sur le nombre de grains par m² du blé. Ce critère synthétique est donc un bon indicateur de l'effet de la température et du rayonnement sur le nombre de grains.

1.1.5. Le stress hydrique

Le déficit hydrique peut avoir une incidence sur le rendement et la teneur en protéines du blé tout au long du cycle. En effet, avant la floraison, un déficit hydrique limite la production de matière sèche et l'accumulation d'azote par la culture et, par conséquent, peut limiter le nombre de grains par m² (Wardlaw, 1966). Cette limitation du nombre de grains peut entraîner ensuite une augmentation de la teneur en protéines par effet de concentration. Après floraison, le stress hydrique limite l'accumulation de biomasse par la culture et provoque une maturation précoce des grains (Kobata *et al.*, 1992), diminuant ainsi le poids de mille grains. La teneur en protéines des grains a alors tendance à augmenter puisque d'une part, l'accumulation de carbone est limitée, et d'autre part, sans augmenter l'accumulation d'azote, celui-ci est transféré plus vite vers les grains. Cette augmentation de la teneur en protéines du blé a également été observée dans une étude menée par Debaeke *et al.* (1996).

De plus, il est fréquent d'observer une combinaison entre déficit hydrique et hautes températures après floraison, qui conduit également à une augmentation de la teneur en protéines (Gooding *et al.*, 2003).

1.1.6. Le tassement du sol

Le tassement du sol, notamment dû aux passages répétés des engins agricoles dans des conditions trop humides, a des conséquences importantes sur l'implantation, le développement racinaire et la croissance des cultures. Les zones de fort tassement limitent directement, par leur effet mécanique, l'émergence et la croissance des racines (Tardieu et Manichon, 1987), ce qui conduit à une limitation de l'absorption de l'azote et de l'eau par la culture (Meynard et Aubry, 1988 ; Wibawa, 1992 ; Alakukku et Elonen, 1995). De plus, la compaction modifie les transferts d'eau et de gaz dans le sol (Roger-Estrade *et al.*, 2006) et limite la minéralisation de l'azote dans le sol (Wibawa, 1992). De ce fait, on peut supposer que le tassement du sol peut avoir un effet sur la teneur en protéines des grains puisqu'il limite à la fois l'azote disponible pour la plante, son absorption et la nutrition carbonée et hydrique du peuplement végétal (Wibawa, 1992). D'ailleurs, Le Bail et Meynard (2003) et David *et al.* (2005a) ont montré, respectivement pour l'orge et le blé, que des sols tassés peuvent limiter le poids de mille grains.

1.1.7. La variété

La variété joue un rôle important dans la détermination du rendement et de la teneur en protéines du blé. Les variétés possèdent des niveaux de potentiel de rendement et de teneur en protéines différents (Arvalis et Semences de France, 2007). Concernant la qualité des grains, on distingue quatre types de variétés de blé :

- les blés classés BAF (Blé Améliorant de Force), à haute teneur en protéines,
- les blés classés BPC (Blé Panifiable Courant) et BPS (Blé panifiable Supérieur) à teneur en protéines intermédiaires,
- les blés BAU (Blés pour Autres Usages), avec les teneurs en protéines les plus faibles.

Les variétés qui permettent d'obtenir des teneur en protéines élevées sont en général celles qui ont les rendement les plus faibles, car on observe généralement une relation négative entre teneur en protéines et rendement (Fowler, 2003 ; Oury *et al.*, 2003).

Les variétés peuvent également avoir un effet indirect, sur les performances du blé en ayant des comportements différents vis-à-vis des facteurs potentiels expliquant la variabilité du rendement et de la teneur en protéines. Ainsi, certaines variétés sont plus résistantes que d'autres aux maladies. Les variétés sont également caractérisées par des précocités différentes qui vont engendrer des décalages du cycle de la plante : à même sensibilité intrinsèque de la variété, celle-ci se trouve confrontée aux facteurs limitants à des moments différents, durant lesquels elle est plus ou moins vulnérable. Les variétés se caractérisent également par des efficacités d'absorption et d'utilisation de l'azote différentes (Le Gouis *et al.*, 2000), qui modifient la relation entre disponibilité en azote dans le sol et rendement et teneur en protéines. Enfin, en ayant des ports, des hauteurs et des capacités de tallages différentes, les variétés n'ont pas toutes la même compétitivité face aux adventices (Debaeke, 1997 ; Davies *et al.*, 2002)

Conclusion

Nous avons identifié de nombreux facteurs qui peuvent expliquer la variabilité du rendement et de la teneur en protéines du blé (nutrition azotée, adventices, maladies, conditions thermiques et hydriques, tassement du sol et variété). Ces facteurs potentiels ont principalement été mis en évidence dans des travaux qui étudiaient individuellement leurs effets sur les performances du blé. De plus, ces travaux ont été réalisés, pour la grande majorité d'entre eux, dans des conditions d'agriculture conventionnelle. Or, peu de travaux permettent d'affirmer que, en situations d'agriculture biologique, tous ces facteurs jouent également un rôle significatif sur les performances du blé. Par ailleurs, la connaissance de l'existence de l'effet de ces facteurs sur le rendement et la teneur en protéines du blé ne permet pas de conclure qu'ils sont effectivement explicatifs de la variabilité des rendements et teneurs en protéines observés en parcelles agricoles, ni d'identifier ceux qui jouent un rôle majeur.

1.2. La hiérarchisation des facteurs limitants des performances du blé biologique en parcelles agricoles

1.2.1. Hiérarchisation des facteurs limitants du rendement

Dans un rapport datant de 2001, Taylor *et al.* ont proposé une synthèse des travaux décrivant les effets de facteurs limitant le rendement du blé biologique. Néanmoins, les études citées ont généralement montré l'effet d'un ou deux facteurs sur le rendement sans considérer l'ensemble des facteurs limitants (et surtout sans hiérarchiser leur occurrence et leur importance en parcelles agricoles). L'identification des principaux facteurs et leur hiérarchisation ont, en revanche, été mises en évidence lors de la réalisation d'un diagnostic agronomique mené sur un réseau de parcelles de blé biologiques localisées en région Rhône-Alpes. Cette étude a également permis de relier ces facteurs aux pratiques agricoles (David *et al.*, 2005a), dans le but d'identifier celles qui étaient à l'origine des faibles rendements observés.

Ce diagnostic agronomique régional (David *et al.*, 2005a) a été réalisé sur les composantes du rendement du blé biologique : (i) le nombre de grains par m² fixé à l'issue de la phase végétative du cycle et (ii) le poids de mille grains fixé à l'issue de la phase de remplissage des grains. Sur la base de données considérée, constituée de 24 parcelles d'agriculteurs, David *et al.* (2005a) ont mis en évidence que le nombre de grains était significativement lié à la nutrition azotée et à la densité d'adventices à floraison. La nutrition azotée (caractérisée par l'indice de nutrition azotée à floraison) a montré un fort effet positif sur le nombre de grains, tandis que la densité d'adventices avait un effet négatif. Durant la phase de remplissage des grains, la somme de température (calculée entre floraison et récolte) avait un fort effet positif sur le poids de mille grains, alors que la compaction du sol et les fortes températures (supérieures à 25°C) avaient un effet négatif. Ce diagnostic a également permis d'identifier les pratiques agricoles expliquant la variation des facteurs limitants. Dans les conditions étudiées, les précédents légumineuses ont permis d'augmenter la nutrition azotée du blé suivant, et donc son rendement. De plus, ces précédents fourragers limitaient significativement la densité de mauvaises herbes à la récolte, alors que les sols pierreux et les semis précoces (avant le premier novembre) augmentaient la densité d'adventices.

1.2.2. Hiérarchisation des facteurs limitants de la teneur en protéines

La hiérarchisation des facteurs limitants de la teneur en protéines n'a apparemment jamais été réalisée sur blé, ni dans des situations d'agriculture biologique, ni dans des systèmes conventionnels. Cependant, Le Bail et Meynard (2003) ont réalisé un diagnostic agronomique des facteurs limitants de la teneur en protéines de l'orge de brasserie dans le Bassin Parisien.

Ils montrent que la teneur en protéines dépend principalement de l'efficacité de l'azote pour le nombre de grains (ratio entre le nombre de grains par m² et l'azote total absorbé par la plante) et du poids de mille grains. Dans les conditions étudiées, l'efficacité relative est

principalement expliquée par la quantité d'azote absorbé totale (effet négatif), le déficit hydrique avant la floraison (effet positif) et la teneur en azote de la plante après floraison (effet positif). Le poids de mille grains est expliqué par la présence de piétin échaudage (effet négatif) et les températures maximales entre floraison et maturité (effet négatif). Ainsi, ils sélectionnent, parmi une série de facteurs limitants potentiels, ceux qui jouent sur la teneur en protéines de l'orge. A la lumière de ces résultats, la nutrition azotée est un des facteurs principaux responsable de la variabilité de la teneur en protéines de la céréale étudiée.

Cependant, même si l'orge est une céréale, on peut supposer que sa physiologie diffère de celle du blé. De plus, les résultats de cette étude dépendent de la région où ont été réalisées les observations. Par conséquent, les résultats ne peuvent être directement extrapolés aux conditions de production du blé biologique produit en région Rhône-Alpes.

Conclusion

L'étude de la combinaison et du classement des facteurs potentiels expliquant les performances du blé dans un contexte d'agriculture biologique a été réalisée, dans notre région d'étude, pour le rendement mais jamais sur la teneur en protéines. Il apparaît donc nécessaire de réaliser une telle analyse sur le blé biologique produit en Rhône-Alpes. Il faut alors s'interroger sur les méthodes disponibles pour réaliser cette analyse.

1.3. Les méthodes d'identification et de hiérarchisation des facteurs limitants en parcelles agricoles

1.3.1. La méthode de diagnostic agronomique régional

La méthode de Diagnostic Agronomique Régional (DAR) permet d'identifier et de hiérarchiser les facteurs qui expliquent la variabilité d'une variable d'intérêt donnée, dans une région agricole, puis d'identifier les pratiques culturales et les conditions environnementales qui expliquent les variations de ces facteurs. Cette variable d'intérêt peut correspondre aux quantités produites (rendement par exemple), ou à un indicateur de la qualité de la production (la teneur en protéines par exemple), ou encore à un indicateur de l'effet du système sur l'environnement (les pertes d'azote par lessivage par exemple) (Loyce et Wéry, 2006 ; Doré *et al.*, 2008). La qualité du diagnostic repose sur le choix de variables pertinentes et faciles à mesurer pour caractériser les facteurs limitants potentiels du critère étudié. De même, la qualité des résultats dépend de la diversité du réseau de parcelles étudié.

La démarche démarre alors par la formulation des hypothèses sur les causes de variation du critère étudié, la teneur en protéines dans notre cas d'étude, à l'aide des connaissances existantes sur le fonctionnement du système. La seconde phase consiste à choisir un réseau de parcelles agricoles, représentatif de la variabilité de la combinaison « systèmes de culture-

milieu » dans la région d'étude (Doré *et al.*, 2008). La variabilité du milieu dépend des types de sol et des conditions climatiques. La méthode de diagnostic agronomique régional se décompose ensuite en deux étapes : (i) identifier et hiérarchiser les principaux facteurs et conditions du milieu limitant les performances et (ii) identifier les caractéristiques des pratiques culturales et de l'environnement à l'origine de ces variations du milieu (Doré *et al.*, 1997).

Cette démarche a été appliquée dans de nombreux cas d'études. Citons, pour l'analyse du rendement des céréales, les travaux de Leterme *et al.* (1994) réalisés en Eure-et-Loir et de Brancourt-Hulmel *et al.* (1999) réalisés sur cinq sites en France (Rennes, Mons, La Minière, Dijon et Ondes) sur le blé tendre conventionnel. Aubry *et al.* (1994) se sont intéressés aux facteurs expliquant le rendement du blé dur en Tunisie. David *et al.* (2005a) ont réalisé un diagnostic agronomique des facteurs limitants des composantes du rendement du blé biologique produit en Rhône-Alpes. Dans le diagnostic réalisé par Le Bail et Meynard (2003), ce sont les variations de la teneur en protéines et du rendement de l'orge de printemps dans le Bassin Parisien qui ont été mises en relation avec les facteurs limitants et les pratiques culturales présentes dans la région. L'intégration de l'utilisation de critères d'appréciation de la qualité des productions dans la démarche de diagnostic est donc relativement récente et encore peu fréquente.

L'inconvénient majeur de cette démarche est qu'elle est très coûteuse en temps (plusieurs années de suivi de parcelles sont nécessaires) et en moyens mis en œuvre pour mesurer à la fois les indicateurs des facteurs limitants (souvent à plusieurs moments du cycle de la culture) et les critères de performance.

Cependant, l'intérêt de ce type de démarche est de prendre en compte simultanément tous les facteurs limitants pouvant jouer sur un critère de performance. Elle permet de les hiérarchiser et de les relier aux pratiques culturales, afin de proposer des solutions pour améliorer les performances. Cette méthode est également plus exhaustive qu'un diagnostic reposant sur des enquêtes auprès des agriculteurs ou d'experts qui parfois peuvent sous-estimer l'effet de certains facteurs (Doré *et al.*, 2008). De plus, cette méthode est plus robuste qu'une analyse de corrélations et, en prenant les précautions nécessaires à sa mise en œuvre, limite le risque de confusion d'effets entre les facteurs (Doré *et al.*, 2008).

1.3.2. Les limites des méthodes statistiques mises en œuvre dans les démarches de diagnostic agronomique

Le diagnostic agronomique, tel que décrit précédemment, implique de définir un modèle mathématique qui relie le critère de performance aux facteurs limitants potentiels, d'estimer ensuite les paramètres du modèle à l'aide des données récoltées, et enfin de choisir un moyen de sélectionner les facteurs limitants intervenant de façon significative (Doré *et al.*, 2008). La méthode la plus fréquemment utilisée dans les diagnostics repose sur un modèle linéaire utilisé en régression stepwise, car elle permet à la fois de sélectionner les facteurs limitants

ayant un effet significatif sur la variable étudiée et d'estimer les paramètres avec la méthode des moindres carrés (Brancourt-Hulmel *et al.*, 1999 ; Le Bail et Meynard, 2003 ; David *et al.*, 2005a ; Valantin-Morison et Meynard, 2008). La méthode de sélection de facteurs limitants à l'aide de la régression stepwise est également largement utilisée en écologie (Whittingham *et al.*, 2006). Le principal intérêt de cette méthode réside dans le fait qu'elle permet de sélectionner des variables explicatives (les facteurs limitants dans le cas du diagnostic) en se basant sur un critère statistique obtenu à partir des données, tel que le critère d'Akaike (AIC, Akaike, 1974), le critère d'information Bayésien (*e.g.* Miller, 2002) ou de tests de Fisher (*e.g.* Miller, 2002). Le nombre de variables explicatives retenues dans le modèle final est en général plus faible que celui du modèle complet et le pourcentage de variance expliquée par chacun des facteurs permet de les hiérarchiser.

Cependant, plusieurs travaux ont montré les limites de la régression stepwise (Burnham et Anderson, 2002; Whittingham *et al.*, 2006). En effet, cette méthode peut aboutir à une instabilité des résultats obtenus, car les résultats sont généralement très sensibles à la base de données. Cela a d'ailleurs été mis en évidence par Prost *et al.* (2008) dans le contexte du diagnostic agronomique. Dans cette étude, une méthode de mélange de modèles (Bayesian Model Averaging, BMA) a été comparée avec une méthode de régression stepwise, en utilisant une méthode de ré-échantillonnage en bootstrap (ré-échantillonnage par tirage aléatoire avec remise) pour évaluer la sensibilité des modèles à la base de données. La méthode de bootstrap permet de générer un grand nombre de bases de données, à partir de la base de données initiale. La sensibilité des modèles aux variations de la base de données peut être ainsi testée. L'étude de Prost *et al.* (2008), qui avait pour cas d'application un diagnostic agronomique sur blé tendre, a montré que la sélection par régression stepwise était plus sensible que le BMA aux variations de la base de données. Par conséquent, l'utilisation de la régression stepwise sur des bases de données de taille relativement réduite (inférieures à 200 individus) fait prendre le risque de sélectionner des facteurs limitants ayant un faible effet ou de ne pas sélectionner ceux qui sont importants. Ce risque avait déjà été souligné par certains statisticiens qui avaient montré que dans certains cas, il était plus approprié de mélanger tous les modèles possibles définis à partir des variables explicatives que d'utiliser un modèle unique (Burnham et Anderson, 2002).

Dans le cas où l'on a k variables explicatives, on définit tous les modèles linéaires possibles qui combinent ces variables, soit 2^k modèles. Le principe de cette méthode est de pondérer chacun des modèles grâce à un critère de qualité (l'AIC par exemple) et de sommer les prédictions issues de chacun des modèles pour obtenir un modèle « mixé » unique. Cette méthode permet d'améliorer la qualité prédictive du modèle obtenu par rapport à un modèle sélectionné par régression stepwise, la précision des paramètres estimés et la qualité des intervalles de confiance. L'utilisation de ces méthodes de mélange de modèles constitue une véritable opportunité d'améliorer la qualité des résultats issus d'une démarche de diagnostic agronomique.

Pour mettre en évidence les facteurs limitants du nombre de grains par m² et du poids de mille grains, David *et al.* (2005a) ont utilisé une méthode de sélection stepwise sur des modèles linéaires. Le modèle final retient uniquement les facteurs pour lesquels les paramètres sont significativement différents de 0 (test de Fisher à 10 %). Comme nous l'avons présenté précédemment, l'utilisation de ce type de méthode de sélection présente l'inconvénient d'être très sensible à la base de données, notamment dans les cas où le nombre de données est faible par rapport au nombre de facteurs limitants candidats (Prost *et al.*, 2008).

Conclusion

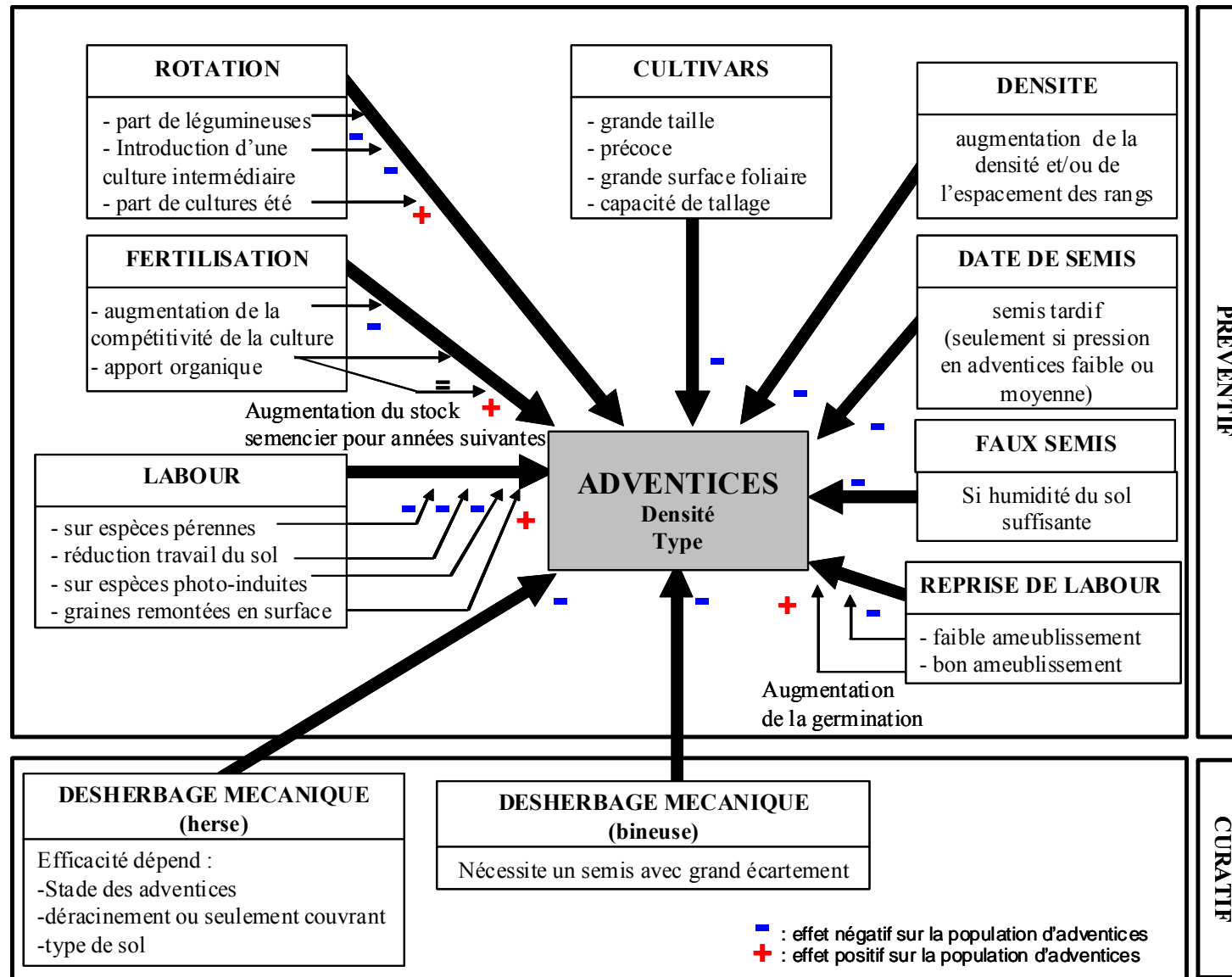
Le diagnostic agronomique régional est une méthode bien adaptée pour l'identification et la hiérarchisation des facteurs limitants du rendement et de la teneur en protéines du blé conduit dans une zone de production donnée (e.g. région pédo-climatique, bassin de production ou de collecte). Néanmoins, les méthodes statistiques habituellement employées pour réaliser les diagnostics agronomiques fournissent des résultats trop dépendants de la base de données étudiée. Pour confirmer les résultats obtenus antérieurement sur les facteurs limitants du rendement du blé biologique, il serait intéressant d'utiliser une base de données élargie et une méthode de mélange de modèles. Cette même base de données doit permettre, en utilisant les mêmes méthodes, de mettre en évidence les facteurs limitants et les pratiques agricoles expliquant la variabilité de la teneur en protéines du blé biologique. En effet, rendement et teneur en protéines étant fortement liés, il est nécessaire de les étudier conjointement (même base de données et même méthode) afin de pouvoir interpréter les résultats issus des diagnostics.

2. Analyse de l'effet des adventices sur les performances du blé biologique

Les adventices sont souvent citées comme un des problèmes majeurs de l'agriculture biologique, limitant non seulement la conversion des agriculteurs conventionnels, mais aussi les performances des productions biologiques. D'après Bond et Grundy (2001), Schneeberger *et al.*, (2002) et Walz (2004) la crainte de ne pouvoir maîtriser les adventices en l'absence d'utilisation d'herbicides est un véritable frein à la conversion des agriculteurs au Royaume-Uni, en Autriche et aux États-Unis. Cette idée est reléguée dans la littérature scientifique où les adventices sont souvent cités comme un des principaux problèmes de la production biologique (Penfold *et al.*, 1995 ; Bàrberi, 2002 ; Rasmussen, 2004).

L'effet des adventices sur les performances d'une culture peut être analysé selon deux types de nuisibilités (Caussanel, 1989). La nuisibilité primaire correspond à un effet indésirable de la population d'adventices sur le produit (rendement ou teneur en protéines par exemple). Elle s'exerce à la fois sur la qualité (nuisibilité directe) et la quantité (nuisibilité indirecte) de la récolte. La nuisibilité secondaire correspond aux dommages que la flore potentielle ou réelle

Figure 1.1. Techniques culturales préventives et curatives permettant de limiter les infestations d'adventices en céréales biologiques (Lemerle et al., 1996 ; Liebman et Davis, 2000 ; Bond et Grundy, 2001 ; Bàrberi, 2002 ; Korres et Froud-William, 2002 ; Hatcher et Melander, 2003 ; Melander et al., 2003 ; Rasmussen, 2004 ; Joulia, 2005).



peut avoir sur la capacité de production ultérieure (augmentation du stock semencier par exemple).

Il existe peu de travaux qui mettent en évidence l'effet nuisible primaire des adventices sur les performances d'une culture biologique. Par ailleurs, un certain nombre d'études s'intéressent à la nuisibilité secondaire des adventices puisqu'elles montrent que le stock semencier des adventices augmente fortement dans les systèmes biologiques au cours du temps (Bond et Grundy, 2001 ; Albrecht, 2005).

2.1. Effet des adventices sur les performances des cultures

2.1.1. Les adventices dans les systèmes biologiques : populations et moyens de lutte

En agriculture biologique, les communautés d'adventices sont plus importantes qu'en agriculture conventionnelle tant en terme de quantité que de diversité, compte tenu de l'absence d'utilisation d'herbicides. Un grand nombre de travaux montrent que la densité, la biomasse des adventices et le stock semencier sont plus importants dans les systèmes biologiques (Moreby *et al.*, 1994 ; Clark *et al.*, 1998 ; Hald, 1999 ; Bond et Grundy, 2001 ; Menalled *et al.*, 2001 ; Albrecht, 2005). De plus, cette plus forte densité d'adventices dans les parcelles biologiques s'accompagne d'une augmentation de la diversité des espèces rencontrées. De nombreux travaux ont montré que les systèmes biologiques ont une diversité supérieure aux systèmes conventionnels (Moreby *et al.*, 1994 ; Hald, 1999 ; Menalled *et al.*, 2001 ; Roschewitz *et al.*, 2005 ; Gabriel *et al.*, 2006).

A la lumière de ces résultats, on peut supposer que cette augmentation des adventices dans les systèmes biologiques, tant en quantité qu'en diversité, n'est pas sans influence sur les performances des cultures. De plus, n'ayant pas la possibilité de recourir aux herbicides pour gérer ces populations, les agriculteurs doivent employer d'autres moyens de lutte.

Afin de limiter les infestations d'adventices dans les parcelles cultivées en agriculture biologique, les agriculteurs disposent de deux types de moyens de lutte : des moyens de lutte préventive et des moyens de lutte curative (Bàrberi, 2002) (voir Fig. 1.1. ci-contre pour les céréales). La lutte préventive correspond à une optimisation du système de culture. Ainsi, une combinaison de techniques telles que la rotation culturale, le choix des cultivars, la densité de semis et l'espacement des rangs, la date de semis, le labour, la reprise de labour, les faux-semis et la fertilisation azotée (Bond et Grundy, 2001 ; Joulia, 2005) permet de limiter l'infestation par les adventices. Tout ce qui permet de diversifier le système, comme l'alternance cultures de printemps/cultures d'hiver, cultures sarclées/non-sarclées, ou l'alternance labour/non-labour, permet d'éviter l'établissement d'une flore spécialisée (Bàrberi, 2002). Les techniques curatives qui permettent de lutter contre les adventices au cours du cycle sont le désherbage mécanique par la herse-étrille ou la bineuse mais aussi le

désherbage thermique avant l'émergence de la culture dans le cas de cultures spécialisées (e.g. oignon, carotte) (Bond et Grundy, 2001 ; Hatcher et Melander, 2003 ; Joulia, 2005). Toutes les méthodes qui permettent de limiter la germination, d'augmenter la compétitivité de la culture et de contrôler les adventices doivent être combinées pour contrôler les populations au cours du cycle (Rasmussen, 2004).

De manière générale, le désherbage mécanique est moins efficace que le désherbage chimique, à la fois à court et à long terme (Bàrberi, 2002). De plus, le désherbage mécanique peut favoriser l'émergence des adventices en perturbant la couche superficielle du sol lorsque les conditions d'humidité sont favorables à la germination (Bàrberi, 2002). L'efficacité du désherbage mécanique sur la population de mauvaises herbes dépend de l'enracinement des plantules de mauvaises herbes, du type de sol et de ses conditions d'humidité, de la date d'intervention, du type d'adventices présentes et du stade relatif entre les adventices et la culture (Kouwenhowen, 1997 ; Bond et Grundy, 2001 ; Bàrberi, 2002 ; Melander *et al.*, 2003).

Le désherbage mécanique réduit la densité d'adventices présentes (Stiefel et Popay, 1990 ; Raffaelli *et al.*, 2005). Dans certains cas, il réduit également la biomasse des adventices (Tillett *et al.*, 1999 ; Reddiex *et al.*, 2001), mais il peut être sans effet sur la biomasse présente à la récolte (Raffaelli *et al.*, 2005). Malgré son efficacité pour réduire la population d'adventices pendant le cycle cultural, le désherbage n'est généralement pas accompagné d'une augmentation du rendement de la culture (Stiefel et Popay, 1990 ; Welsh *et al.*, 1996 ; Tillett *et al.*, 1999 ; Reddiex *et al.*, 2001 ; Raffaelli *et al.*, 2005). Enfin, Welsh *et al.* (1999) soulignent la nécessité d'acquérir des connaissances supplémentaires pour savoir quand et dans quel but déclencher le désherbage.

2.1.2. Modélisation de l'effet des adventices sur les performances des cultures

La compétition entre adventices et culture correspond à la concurrence entre ces populations vis-à-vis d'une ressource pour laquelle la demande globale est supérieure à la disponibilité. Les facteurs du milieu pour lesquels il peut y avoir compétition entre adventices et culture sont la lumière, les éléments nutritifs du sol (et particulièrement l'azote) et l'eau (Caussanel, 1989). Cette compétition pour les ressources peut être représentée dans des modèles mécanistes qui prennent en compte la dynamique des interactions entre culture et adventices (Kropff *et al.*, 1995). Il existe également des modèles empiriques, qui sans décrire la nature des relations entre culture et adventices, permettent de prédire les pertes de rendement des cultures dues aux adventices. Parmi ces modèles empiriques, certains relient la densité d'adventices (Dew, 1972 ; Cousens, 1985a ; Cousens, 1985b ; Doyle *et al.*, 1986 ; Swinton et Lyford, 1996) ou leur surface foliaire (Kropff et Spitters, 1991 ; Lotz *et al.*, 1992 ; Ngouajio *et al.*, 1999) au rendement ou aux pertes de rendement. Notons qu'il n'existe pas de modèles prédisant l'effet des adventices sur la qualité des cultures, et notamment sur la teneur en protéines des céréales. Dans le cadre de cette étude bibliographique, nous présenterons

uniquement les modèles mis au point pour exprimer la limitation du rendement à partir de la densité d'adventices. Ces modèles ont en général pour objectif d'utilisation la prédiction de seuils d'intervention de désherbage.

Dew (1972) a établi la première relation liant la densité d'adventices (*Avena fatua* L.) au rendement de céréales :

$$Y = b_1 \sqrt{D}$$

avec Y , le rendement, b_1 , l'indice de compétition et D , la densité d'adventices.

Cousens (1985a) a amélioré la relation en utilisant une courbe hyperbolique avec deux paramètres, appliquée à diverses espèces d'adventices (*Kochia scoparia*, *Polygonum pennsylvanicum*, *Amaranthus hybridus*) pour le rendement des cultures de betterave, de maïs et de soja :

$$Y_L = \frac{iD}{1 + i \frac{D}{a}} \times 100$$

avec Y_L , la perte de rendement, D , la densité d'adventices, i , le pourcentage de pertes par plante adventice et par unité de surface quand D s'approche de 0 et a , le pourcentage de pertes quand D est proche de l'infini.

Il existe des variantes de ce modèle qui prennent en compte des variables supplémentaires comme la compétitivité de la culture vis-à-vis des adventices au travers de la densité de plantes levées (Cousens, 1985b), le niveau de compétition des adventices au travers de la production de graines des adventices (Doyle *et al.*, 1986) ou la période d'émergence des adventices (Cousens *et al.*, 1987).

Plus récemment, des modèles sigmoïdaux ont été ajustés mais leur validation nécessite une large gamme de densités (Swinton et Lyford, 1996).

$$Y = \frac{\beta\gamma + \alpha D^\delta}{\gamma + D^\delta}$$

Avec Y , le rendement, D , la densité d'adventices, β , le rendement minimum, γ , la mesure de la courbure qui détermine le taux avec lequel le rendement atteint son asymptote inférieure α et δ , la mesure de la courbure qui détermine le point à partir duquel le rendement diminue à un rythme croissant.

Ce type de relation a été utilisé dans de nombreux travaux, notamment pour mettre au point des outils d'aide à la décision permettant de déclencher des pratiques de désherbage chimique. En général, ces relations ont été établies à l'aide d'expérimentations où la densité en adventices était contrôlée (semis des adventices) et les autres facteurs pouvant limiter le rendement étaient également contrôlés. Ce type de modèles empiriques, reliant densité d'adventices et rendement, a été utilisé pour étudier l'effet d'une espèce d'adventices (Wilson

et al., 1990 ; Lotz *et al.*, 1996 ; Angonin *et al.*, 1996 ; Munier-Jolain *et al.*, 2002 ; Cowbrough *et al.*, 2003) mais elle a également été adaptée dans des situations à espèces multiples (Wilson et Wright, 1990 ; Wilkerson *et al.*, 1991 ; Kwon *et al.*, 1995 ; Berti et Zanin, 1997 ; Florez *et al.*, 1999). Dans ces situations, le modèle de Cousens a été transformé en modèle additif, suggérant qu'il n'y avait pas d'interactions entre les différentes espèces d'adventices et que leur effet sur le rendement était cumulatif. Ces modèles additifs semblent valables uniquement dans les cas où les densités totales restent faibles (Swanton *et al.*, 1999). Ils ne seront vraisemblablement pas adaptés à des situations en agriculture biologique où les densités d'adventices sont très élevées. Il n'existe pas, à notre connaissance, de travaux traitant de l'effet d'une population d'adventices avec un grand nombre d'espèces différentes sur les performances d'une culture. Même s'il existe quelques travaux sur l'effet de populations pluri-spécifiques (Swanton *et al.*, 1999), ces études ne prennent pas en compte plus de cinq espèces différentes.

Conclusion

La quantification de la nuisibilité d'une population de mauvaises herbes caractérisée par un grand nombre d'espèces différentes n'a jamais été étudiée sur le rendement ou la qualité du blé. De plus, les études utilisant des données issues de population d'adventices « naturelles », du point de vue de la densité et de la diversité observées, c'est-à-dire obtenues dans des parcelles agricoles, sont rares. Si l'effet d'une population pluri-spécifique d'adventices sur le rendement a déjà été modélisé, l'effet de la diversité (caractérisée par un indicateur) sur le rendement et la teneur en protéines n'a jamais été examinée auparavant. Dans la mesure où les gammes d'infestation sont beaucoup plus larges dans les systèmes biologiques, il serait intéressant de tester la relation entre rendement et densité d'adventices pour la vérifier sur une gamme plus large. En effet, en utilisant un des modèles de Cousens, Moffitt et Bhowmik (2006) montrent que l'utilisation de données avec des valeurs extrémisées est efficace pour estimer les paramètres du modèle par rapport à des expérimentations avec des gammes restreintes. Zoschke et Quadranti (2002) soulignent d'ailleurs le besoin d'augmenter les connaissances sur la compétitivité et les effets sur le rendement de certaines espèces ainsi que de flores mixtes dans des situations agronomiques et environnementales données. Enfin, il serait intéressant de définir des indicateurs (de la diversité et de la quantité d'adventices) qui permettent à la fois d'évaluer les dommages sur la culture et l'opportunité de désherber mécaniquement.

2.2. Une méthode adaptée aux conditions d'agriculture biologique : la régression quantile

L'adaptation des modèles vus dans la section précédente (2.1.3.) au cas de l'agriculture biologique n'est pas aisée pour deux raisons : (i) les parcelles conduites en mode biologique

présentent des populations d'adventices multi-espèces et (ii) les adventices ne constituent pas le seul facteur limitant du rendement sur les parcelles (David *et al.*, 2005a). Cette idée de multiplicité des facteurs limitants est également évoquée par Clark *et al.* (1998) qui montrent que, même dans des conditions d'agriculture biologique caractérisées par une faible densité d'adventices, les rendements sont très variables, ce qui indique que d'autres facteurs influencent le rendement.

Dans ces conditions de facteurs multiples, on ne peut associer une valeur de rendement ou de teneur en protéines directement à une valeur de l'indicateur caractérisant la population d'adventices (*e.g.* la densité) car le rendement dépend aussi des autres facteurs limitants. Il semble plus réaliste d'établir une distribution potentielle des rendements en fonction de l'infestation des adventices qui tienne compte des autres facteurs limitants présents.

Ce type d'approche a été utilisé dans le cadre de travaux en écologie et en agronomie où une variable d'intérêt Y est soumise à d'autres facteurs que le facteur limitant X que l'on mesure (Cade et Guo, 2000 ; Cade and Noon, 2003 ; Makowski *et al.*, 2007). La régression quantile est une méthode qui permet d'estimer les paramètres d'une fonction reliant Y à X pour différentes parties de la distribution, c'est-à-dire pour différents quantiles de Y conditionnellement à X . Généralement, on s'intéresse aux quantiles les plus élevés, c'est-à-dire les points de la courbe-enveloppe de la distribution qui correspondent a priori aux valeurs de Y pour lesquelles seul le facteur X est responsable des variations. C'est notamment le cas lorsqu'on cherche à estimer les paramètres de courbe-enveloppes en agronomie (Makowski *et al.* 2007).

Dans notre cas, il sera plus intéressant de considérer la distribution de Y dans sa globalité. Prenons un exemple où Y est le rendement et X la densité d'adventices. Pour une densité donnée x , on pourra associer la distribution de rendement correspondante et connaître, par exemple, le rendement que l'on a 80 % de chance d'atteindre pour cette valeur de densité x . Cela peut ensuite permettre d'ajuster une pratique de fertilisation puisqu'on dispose d'un rendement objectif, prenant en compte la contrainte des adventices, qui permet de calculer une dose d'azote à apporter (COMIFER, 1996). On peut également envisager d'intégrer à ce modèle la pratique de désherbage mécanique afin de prendre en compte son effet potentiel sur le rendement.

Ce type de méthode peut aussi être utilisé pour évaluer l'efficacité du désherbage sur l'évolution de la densité de mauvaises herbes au cours du cycle cultural. De la même manière, on pourra prédire une distribution de densités tardives d'adventices Y (représentative d'un potentiel d'infestation pour l'année suivante) qui dépend d'une densité observée plus précocement X en fonction du désherbage mécanique. Cela peut permettre de juger de l'opportunité de désherber pour réduire la densité d'adventices.

Conclusion

En parcelles agricoles conduites en agriculture biologique, la multiplicité des facteurs limitants en présence et les populations plurispécifiques d'adventices ne permettent pas de déterminer des valeurs fixes de rendement ou de teneur en protéines associées à un niveau donné d'infestation en adventices. La méthode de régression quantile semble être bien adaptée à l'estimation des paramètres de modèles simulant l'effet des adventices dans les conditions de l'agriculture biologique. En quantifiant l'effet des adventices sur les performances de la culture, on peut prédire une distribution de rendement potentiel qui peut ensuite servir à ajuster des pratiques de fertilisation ou à juger de l'opportunité de désherber.

3. Vers un indicateur d'alerte pour aider les agriculteurs à prendre des décisions techniques

Dans les sections précédentes (2.1. et 2.2.), nous avons évoqué l'intérêt d'utiliser un indicateur de présence des adventices pour aider à la prise de décision des pratiques de désherbage et de fertilisation azotée de couverture. Notre objectif final est de proposer des connaissances et des outils pour aider les agriculteurs à améliorer leurs pratiques agricoles en vue d'accroître et de stabiliser les performances qualitatives et quantitatives du blé biologique. On pourra donc considérer la construction de cet indicateur comme une première étape pour la mise au point d'un outil d'aide à la décision.

3.1. L'adéquation entre la proposition du chercheur et les pratiques de l'agriculteur

En général, les outils issus de travaux de recherche, ayant pour objectifs d'aider au raisonnement des pratiques, sont, soit peu utilisés, soit les utilisateurs leur confèrent des usages différents de ceux pour lesquels ils ont été conçus, car ils sont mal adaptés aux usages anticipés par les chercheurs (Cerf et Meynard, 2006). Les auteurs mettent alors en évidence l'intérêt qu'il y aurait à « co-construire » les outils avec leurs futurs utilisateurs. Une étude bibliométrique réalisée par Prost (2008) sur des articles publiés entre 1996 et 2006 a montré que, dans les dispositifs de conception de modèles en agronomie, seulement un tiers des auteurs identifient un usage ou des utilisateurs, et parmi ces derniers, seuls 34 % affichent dans leurs objectifs une utilisation du modèle. Il y a donc très souvent une déconnexion entre les propositions émanant des chercheurs et l'activité des utilisateurs potentiels.

Cerf *et al.* (1990) soulignent également que, pour créer des outils d'aide à la décision, il ne suffit pas de connaître le fonctionnement des processus biologiques, il faut également connaître les processus de décision, les contraintes, les objectifs et la manière de penser des utilisateurs. Nous cherchons à mettre au point des indicateurs qui, observés à un stade précoce de la culture, doivent permettre de mieux ajuster les pratiques de désherbage et de

fertilisation. Par conséquent, pour proposer un outil adapté, nous faisons l'hypothèse qu'il faudra analyser les processus de décision, et notamment la nature des informations que les agriculteurs recueillent et utilisent pour prendre des décisions sur leurs parcelles.

Comme le suggère Darré (2001), si les prescriptions des agronomes et des conseillers sont relativement peu ou mal suivies, c'est parce que les praticiens élaborent une autre forme de connaissance. Nous nous référons donc au postulat suivant : les utilisateurs pour lesquels on conçoit détiennent une connaissance, un savoir-faire, une expertise dont il faut tenir compte pour concevoir les outils qui leur sont destinés (Prost, 2008). En effet, l'univers conceptuel de l'agriculteur est directement relié à des finalités professionnelles, familiales, sociales et à des domaines de pratiques à partir desquelles ils élaborent leur expérience et leurs propres références. D'après Landais et Deffontaines (1988), les pratiques ne peuvent être considérées comme « des avatars localisés de la technique ». Elles résultent, selon les auteurs, « d'un processus structuré de décision, d'appropriation et d'adaptation » dont l'exploration apparaît cruciale pour le progrès technique en agriculture : « pour s'incarner dans le réel, la technique va devoir s'insérer dans un système que sa complexité rend unique ».

Enfin, comme le rappelle Papy (2001) dans une discussion sur les systèmes de cultures, l'une des finalités de l'agronomie est de produire des systèmes d'aide au diagnostic des situations culturales et à la conception d'innovations. Mais, l'auteur souligne immédiatement, que « si l'on veut que la reconstitution du concept de système de culture, essentiellement théorique, serve aux agriculteurs à renouveler leurs conceptions, encore faut-il que la démarche intègre ces dernières. Pour y avoir accès, il a fallu emprunter des démarches et concepts à d'autres disciplines» (Papy, 2001).

Conclusion

Afin de proposer un outil d'aide à la décision adapté, nous proposons d'analyser les processus de décision des agriculteurs, pour mettre en évidence les connaissances qu'ils détiennent et mobilisent, et leurs façons de raisonner. L'idée ici n'est pas d'étudier les règles de décision des agriculteurs en finesse mais d'identifier précisément les informations qu'ils mobilisent pour déclencher leurs pratiques culturales au cours du cycle. Nous cherchons à saisir des informations relatives aux adventices susceptibles de déclencher des micro-décisions (fertilisation, désherbage) en faisant l'hypothèse que ces informations seront certainement différentes des indicateurs mis au point par les chercheurs. On suppose que l'analyse des processus de décision qui déclenchent les pratiques est un moyen d'accéder à ces indicateurs.

3.2. Les emprunts aux autres disciplines : étude des processus de prises de décision des agriculteurs pour déclencher des pratiques

Pour analyser les processus de prises de décisions des agriculteurs, on peut distinguer deux types d'approches. D'une part, le concept de « modèle d'action » renvoie à des emprunts faits à la fois aux « sciences de gestion » et à un des courants des sciences cognitives, qualifié de courant « mentaliste » ou « symboliste », parce que les auteurs s'intéressent aux représentations mentales que les individus se font du réel pour agir. D'autre part, nous distinguons les théories de l'activité qui concernent les environnements dynamiques et renvoient à un courant plus récent des sciences cognitives. Nous n'évoquerons pas ici l'approche initiée par Darré (1985), qui s'intéresse aux façons dont les agriculteurs parlent de la technique pour accéder à leurs conceptions des processus techniques puisque nous avons fait le choix de nous centrer sur « ce que fait l'agriculteur » et non pas « ce qu'il en dit ».

3.2.1. Le modèle d'action

Le courant de recherche connu sous le nom de « Farming Systems Research » apparu dans les années 1970 dans les centres de recherche internationaux agronomiques (CGIAR), a trouvé écho dans les travaux d'agronomes français dans la fin des années 1970 (in Aubry, 2007). Pour ces agronomes, le champ cultivé doit faire l'objet d'un double regard, celui de son fonctionnement systémique interne et celui des logiques d'action de ceux qui interviennent sur cet objet (Gras *et al.*, 1989 ; Biarnès, 1998). La description des pratiques agricoles est notamment fondée sur le concept de fonctionnement technique de l'exploitation agricole, correspondant à « l'enchaînement des prises de décisions de l'agriculteur et de sa famille dans un ensemble de contraintes et d'atouts, en vue d'atteindre des objectifs qui régissent des processus de production » (Sebillotte, 1979, cité par Aubry, 2007). Cette description des pratiques a ensuite été complétée par une volonté de compréhension des processus de décision des pratiques agricoles, des « moteurs des pratiques » (Papy, 1994). Cela a donné lieu à la définition de « modèle de l'agriculteur pour l'action » (ou « modèle d'action ») qui rend compte du processus décisionnel dans le cas de décisions techniques cycliques et récurrentes.

D'après Duru *et al.*, (1988), Sebillotte et Soler, (1990) et Papy (1994), le modèle d'action se définit de la manière suivante (in Aubry, 2007) : c'est « un cadre de représentation des décisions techniques comprenant (i) un ou plusieurs objectifs généraux qui définissent le terme vers lequel convergent les décisions de l'agriculteur, (ii) un programme prévisionnel et des états objectifs intermédiaires qui définissent des points de passage obligés et des moments où l'agriculteur pourra faire des bilans pour mesurer où il en est de la réalisation de ses objectifs généraux : se trouvent ainsi fixés des indicateurs qui serviront aux décisions, (iii) un corps de règles de décision qui, en vertu d'un champ d'évènements perçus comme possibles par l'agriculteur, définit pour chaque étape du programme la nature des décisions à prendre pour parvenir au déroulement souhaité des opérations et la nature des solutions de rechange à mettre en œuvre si, à certains moments, ce déroulement souhaité n'est pas réalisable ».

Encadré 1.3. Concepts d'ergonomie et de psychologie cognitive utilisés dans les travaux de Cerf (1997)

La tâche : elle est définie par un but et sa décomposition éventuelle en sous-buts, les moyens pour atteindre ces buts, et les caractéristiques des objets qui conditionnent la mise en œuvre de ces moyens.

La situation : elle est définie par l'interaction entre un individu « générique » et une tâche. Elle se caractérise par les contraintes sur les opérations de recueil et de traitement des informations nécessaires à la réalisation de la tâche.

L'activité : elle est le résultat de l'actualisation, pour un individu, d'une situation. Elle peut être abordée au niveau du comportement de l'individu ou au niveau des activités cognitives qui engendrent ce comportement.

Les travaux d'Aubry (2000) utilisent le concept de « modèle d'action » et cherchent à mettre en évidence les déterminants des décisions techniques dans les exploitations agricoles au niveau (i) de l'allocation des ressources productives et (ii) de la conduite technique des cultures. Pour cela, elle a emprunté des concepts aux sciences de gestion afin de mieux décrire un modèle conceptuel de gestion technique d'une sole. Elle constate également que les informations que mobilisent les agriculteurs dans leurs règles de décision sont de nature très variée (Aubry, 2007) : des dates calendaires, des événements liés au peuplement végétal comme l'atteinte d'un stade physiologique ou l'observation d'un état d'infestation, ou l'avancée du travail sur une autre production présente sur l'exploitation. Néanmoins, elle ne précise pas la façon dont les informations sont prélevées ni ce qu'elle représentent exactement. En revanche, elle montre que le fait que les agriculteurs cultivent une sole d'une part, et réalisent d'autres pratiques simultanément d'autre part, interfère dans la façon dont les informations sont recueillies et traitées (Aubry, 1995).

Ce type d'approche offre un cadre théorique et un support d'analyse des processus de décision dans les exploitations agricoles. Cependant, il reste centré sur l'explicitation des enchaînements de décisions et des contraintes prises en compte, sans offrir d'étude approfondie des informations prélevées par les agriculteurs pour alimenter leur référentiel et prendre leurs décisions. Enfin, ces études ne s'intéressent à l'information qu'au travers de son traitement, c'est-à-dire au travers de la pratique qu'elle déclenche et non pas à la façon dont l'information est collectée et fixée en mémoire avant d'être ensuite transformée en données qui font sens et qui sont intégrées à un raisonnement. Cela sous-entend qu'elle n'est prélevée qu'en cas de besoin de déclenchement de pratiques.

Des travaux menés sur l'implantation de la betterave sucrière ont servi de cadre à l'appréhension des « modèles d'action » par une approche cognitive (Cerf 1996a ; 1996b). L'approche cognitive s'appuie sur « l'observation de ce que font les acteurs et sur le discours que ces acteurs tiennent à propos de ce qu'ils font » (Cerf, 1996b). Cette approche utilise donc des concepts d'ergonomie et de psychologie cognitive comme la tâche, la situation et l'activité (voir encadré 1.3.). L'analyse de ce cas d'étude se décompose en deux parties : (i) l'analyse de la tâche, c'est-à-dire la caractérisation des buts, des sous-buts, des moyens disponibles et des objets sur lesquels on agit, et (ii) l'analyse de l'activité c'est-à-dire la description de l'organisation des connaissances mobilisées lors des opérations cognitives de diagnostic et de planification. Dans ce cadre, l'auteur précise que les informations recueillies servent à la fois à construire une représentation de chaque parcelle mais aussi de l'état de l'ensemble des parcelles. Elle identifie des « procédures de routine » qui orientent la façon dont les agriculteurs réalisent les diagnostics sur leurs parcelles, et a fortiori les informations prélevées pour renseigner les variables qui leur apparaissent pertinentes pour prendre leurs décisions. Dans ce travail, les informations utilisées par les agriculteurs sont précisées (humidité du sol, résistance des mottes, mauvaises conditions de labour par exemple) et les combinaisons établies pour la prise de décision de chaque agriculteur sont explicitées mais la

variabilité de la manière de prélever l'information n'est pas abordée. On accède donc à la gamme et à la diversité des informations prélevées mais pas aux modes opératoires mis en œuvre. Néanmoins, ces travaux montrent que le choix des indicateurs de diagnostic des agriculteurs est lié au matériel disponible pour l'agriculteur et souligne l'intérêt qu'il y aurait pour les agronomes à tenir compte de cette démarche dans leur proposition d'indicateurs de diagnostic. Notons que l'auteur précise dans ce travail que « la conduite des cultures s'apparie à des situations de gestion d'environnements dynamiques » (Cerf, 1996a). On appelle environnement dynamique « des situations qui évoluent en l'absence d'action de l'opérateur » (Samurçay et Hoc, 1989), bien que ces situations puissent aussi évoluer du fait de l'intervention de l'opérateur : par exemple, irriguer, désherber ou fertiliser sont des moyens d'accélérer ou d'amplifier des processus naturels.

Plus récemment, Jaunereau (2005) évoque le fait que dans le domaine agricole « les situations [...] évoluent en l'absence de l'action des opérateurs (caractéristique propre aux environnements dynamiques) » car le peuplement végétal d'une parcelle cultivée a, d'une part, une évolution propre qui ne peut pas être toujours être anticipée et, d'autre part, il dépend de conditions non prévisibles et non maîtrisables telles que les conditions climatiques. Cela pose alors des problèmes de compréhension et de gestion du système. L'objectif de son travail est d'utiliser le raisonnement des agriculteurs pour élaborer un simulateur de mise en culture du colza : il analyse d'abord la tâche et la structure conceptuelle de la situation par trois séries d'entretiens. Comme dans les travaux de Cerf (1996a ; 1996b), l'étude révèle le type d'informations prises en compte pour l'action et le lien qui existe entre les différentes variables (ici l'humidité du sol est centrale) mais il n'y a pas de détails sur les informations réellement prélevées et la façon dont l'agriculteur évalue l'état de son sol ou l'infestation en limaces. Ici encore, on s'attache à déceler les liens entre les variables et les décisions qui en découlent sans s'attacher à décrire précisément la façon dont l'agriculteur juge d'un état du milieu.

Comme le souligne Magne (2007) à propos des systèmes d'élevage, les études des pratiques, qu'elles se fassent en lien avec l'élaboration de la performance de production ou en lien avec l'élaboration des décisions, ne tiennent compte qu'en filigrane de l'information, et la gestion que font les agriculteurs de cette information n'est pas abordée. Elle souligne que l'information est généralement « une donnée construite par le chercheur pour relier les pratiques aux performances » et « qu'en revanche, ce ne sont pas forcément sur ces indicateurs que s'appuient les agriculteurs pour conduire leur production ».

Conclusion

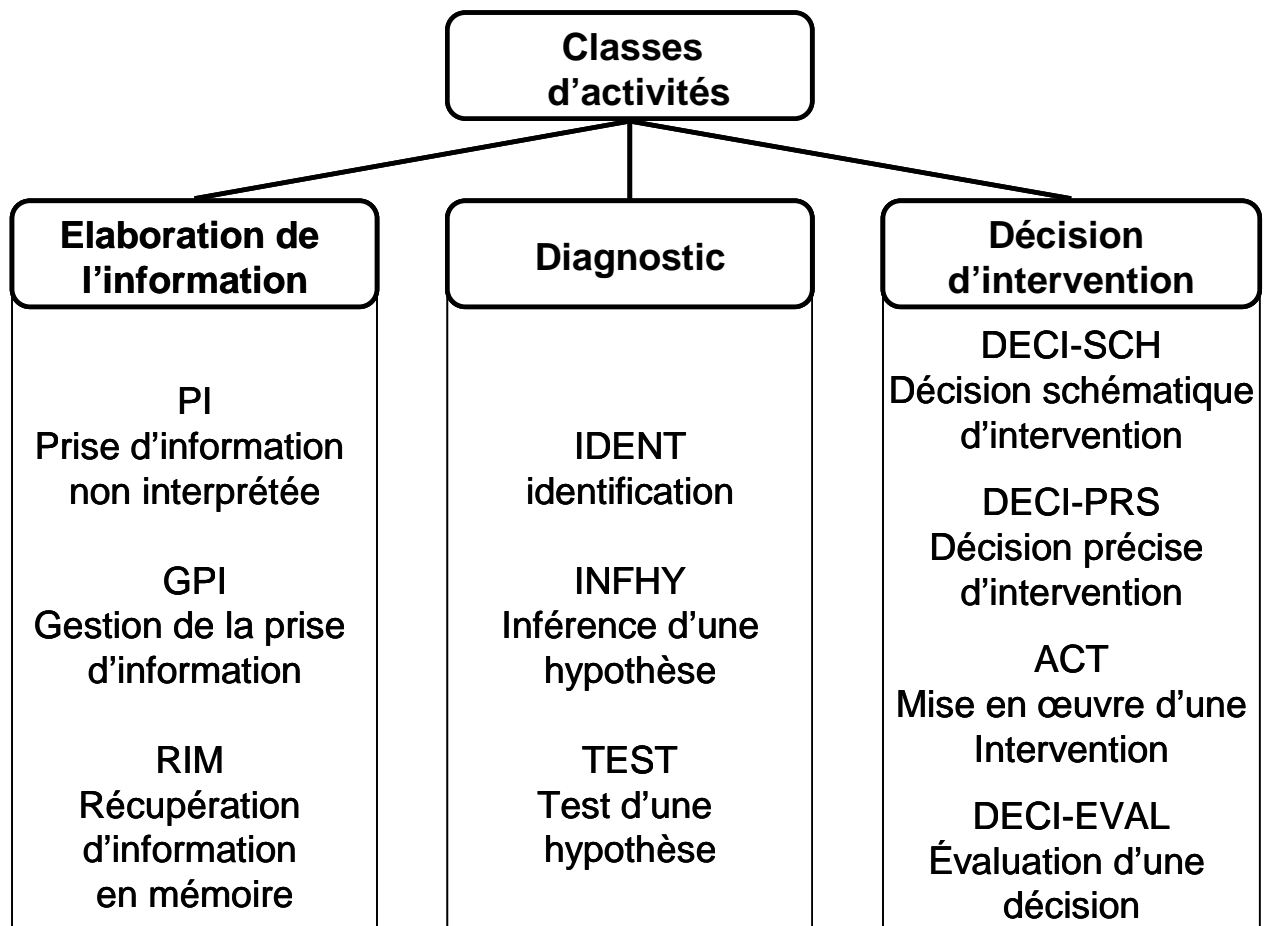
En utilisant le concept de modèle d'action, les travaux menés dans des études antérieures ont mis en évidence des processus de décision des agriculteurs mais se sont peu intéressés au mode de collecte de l'information et à la qualité de celle-ci pour déclencher les pratiques. Ces approches s'intéressent surtout au « pourquoi », alors que nous cherchons à appréhender le « comment ». Une approche récente consiste à considérer la conduite des cultures comme des situations de gestion d'environnements dynamiques. Nous nous interrogeons alors sur l'intérêt d'analyser les processus de conduite des cultures sous cet angle pour accéder aux informations mobilisées par les agriculteurs pour la prise de décision.

3.2.2. L'étude de l'activité dans les environnements dynamiques : un cadre méthodologique pour la mise en évidence des indicateurs des agriculteurs

Les environnements dynamiques ont la particularité d'évoluer en dehors de l'intervention humaine, nécessitant donc de collecter en continu des informations pour piloter les processus. On oppose généralement ces situations aux situations statiques dans lesquelles le système cognitif (humain ou artificiel) a tout son temps et toutes les informations disponibles pour réfléchir et agir.

Les environnements dynamiques se distinguent par quatre caractéristiques : (i) la complexité, (ii) le contrôle et la supervision, (iii) la vitesse du processus et (iv) l'incertitude. Les environnements dynamiques sont complexes car il y a une multiplicité de variables et d'interactions qui évoluent conjointement à prendre en considération. Dans une parcelle agricole, de nombreuses composantes telles que le climat, les adventices, la culture ou la disponibilité en azote évoluent et interagissent ensemble au cours du temps. La planification est une ressource pour l'action qui permet de réduire la complexité des systèmes par « l'élaboration et/ou l'utilisation de plans (représentations schématiques et/ou hiérarchisées) susceptibles de guider l'activité du sujet » (Hoc, 1987 ; Van Daele et Carpinelli, 2001). Cependant, la planification n'est pas une fin en soi, elle permet surtout la maîtrise du processus (Van Daele et Carpinelli, 2001). Dans le cadre de l'agriculture, la planification peut faire référence à la mise en place d'un plan d'action à la suite d'un diagnostic de la situation, après avoir observé une situation à un instant donné, l'agriculteur organise ses actions en fonction de ces informations (Cerf, 1996b). Le contrôle et la supervision sont alors nécessaires pour réactualiser la représentation de la situation et mettre en œuvre la planification. Le contrôle correspond à des actions de l'opérateur qui portent assez directement sur l'environnement (par exemple, en passant la herse étrille, l'agriculteur descend de son tracteur pour vérifier l'efficacité du réglage de son outil et éventuellement le corriger s'il estime que le résultat sur la population d'adventices n'est pas satisfaisant). La

Figure 1.2. Structure de l'analyse de l'activité en situations dynamiques (d'après Hoc et Amalberti, 1999)



supervision correspond à un niveau plus abstrait que le contrôle : elle permet la surveillance, le raisonnement, la planification ou la prise de décision (Hoc, 1996). Les informations prélevées par les agriculteurs qui nous intéressent se placent donc dans cette activité de supervision, nécessaire à l'appréhension des environnements dynamiques. En effet, une évaluation de la population d'adventices peut guider la prise de décision de désherbage, ou alimenter la représentation que l'agriculteur se fait de sa parcelle pour déclencher des pratiques plus tardivement dans le cycle, ou pour mémoriser ce niveau d'infestation pour l'année suivante. La vitesse du processus, c'est-à-dire dans notre cas, la vitesse d'évolution des processus qui ont lieu dans le champ cultivé (par exemple, l'évolution de la population d'adventices, l'évolution de l'azote disponible pour la culture, la croissance de la culture), va déterminer la fréquence des prises de décisions à effectuer pour intervenir (Cochet, 2005). La fréquence de prélèvement des indicateurs va donc être dépendante de la vitesse d'évolution des processus. Notons que, dans les situations d'environnement dynamique, le délai de réponse entre l'action et la réponse de l'environnement à cette action est peut être long (par exemple, l'effet d'un apport d'azote sur la culture n'est pas instantané), ajoutant de la complexité à la prise de décision. Enfin, l'incertitude est une caractéristique de ces environnements, pour lesquels il existe de nombreux facteurs non contrôlés comme le climat, qui influencent largement leur évolution, et donc des informations non disponibles pour prendre les décisions, qui rendent la planification difficile. Dans ces contextes, la collecte d'informations pour intervenir ensuite est très importante car elle permet de réactualiser la représentation de la situation (évaluation de l'état d'avancement du ou des processus) et donc de limiter, au moins en partie, l'incertitude.

Les travaux de Hoc et Amalberti (Amalberti et Hoc, 1998 ; Hoc et Amalberti, 1999) offrent un cadre d'analyse de ce type de situations. Ils structurent la construction de l'activité en trois phases : l'élaboration de l'information, le diagnostic et la décision d'intervention (voir Fig. 1.2. ci-contre). Afin d'étudier les informations prélevées par les agriculteurs pour leur prise de décision, il semble pertinent d'utiliser la méthode proposée par ces auteurs, en se centrant sur la phase de prise d'information et en utilisant les schèmes de codage qu'ils proposent.

Conclusion

Nous nous proposons d'emprunter principalement à l'ergonomie des concepts et des cadres théoriques pour approcher la prise de décision des agriculteurs « en situation » et les indicateurs qu'ils mobilisent pour agir ou pour différer l'action. L'utilisation du cadre conceptuel des « environnements dynamiques » et les méthodes d'analyse proposées par Hoc et Amalberti (1999) nous paraissent pertinentes pour atteindre notre objectif.

4. Conclusion : la démarche de thèse adoptée

4.1. Première question de recherche

Nous avons établi qu'il existait de nombreux facteurs susceptibles d'expliquer individuellement la variabilité du rendement et de la teneur en protéines du blé au champ. L'étude de la combinaison et du classement de ces facteurs dans des parcelles agricoles d'agriculture biologique a été réalisée pour le rendement (réalisation d'un diagnostic agronomique régional par David *et al.* (2005a)) mais jamais pour la teneur en protéines. De plus, nous avons souligné que la méthode de diagnostic agronomique régional, habituellement utilisée pour réaliser cette sélection et hiérarchisation des facteurs limitants, s'appuie sur des méthodes statistiques (régression stepwise) dont les résultats sont très dépendants de la base de données, alors que les méthodes de mélange de modèles semblent être une alternative adaptée. Cela nous amène à formuler les questions suivantes :

Quels sont les facteurs expliquant la variabilité de la teneur en protéines du blé biologique et la hiérarchie de ces facteurs, mis en évidence avec une méthode de mélange de modèles indépendante de la base de données ?

Les facteurs mis en évidence dans le diagnostic agronomique régional sur le rendement du blé biologique seront-ils les mêmes, avec la même hiérarchisation, si on réalise le diagnostic sur une base de données élargie avec une méthode de mélange de modèles ?

Pour identifier et hiérarchiser les facteurs expliquant la variabilité de la teneur en protéines du blé biologique, nous avons choisi de réaliser un diagnostic agronomique régional utilisant une méthode statistique de mélange de modèles, sur un réseau de 51 parcelles situées en région Rhône-Alpes. Cette base de données est également utilisée pour réaliser un diagnostic agronomique régional du rendement du blé biologique avec la même méthode de mélange de modèles et une méthode statistique classique (régression stepwise) afin (i) de comparer les résultats de ce diagnostic avec ceux du diagnostic réalisé antérieurement, (ii) de comparer les résultats obtenus avec les deux méthodes statistiques et (iii) d'avoir la possibilité de faire une interprétation conjointe des résultats obtenus sur rendement et teneur en protéines (utilisation de la même base de données et de la même méthode statistique). Ces deux diagnostics sont présentés dans le second chapitre. Le diagnostic agronomique régional de la teneur en protéines est présenté sous forme d'article (accepté sous réserves de modifications en décembre 2008 par « Agronomy for Sustainable Development »).

4.2. Seconde question de recherche

Nous avons établi que la quantification de la nuisibilité d'une population adventice plurispécifique sur le rendement et la teneur en protéines du blé n'a jamais été réalisée. Il

existe cependant des relations reliant la densité d'une population d'adventices monospécifique au rendement des cultures, dans des contextes d'agriculture conventionnelle. Nous faisons l'hypothèse que ces relations pourraient servir à définir un rendement objectif, utilisable ensuite pour ajuster des stratégies de fertilisation azotée. Nous avons également établi que la prédiction de la densité d'adventices au cours du cycle du blé peut permettre de juger de l'opportunité de désherber. De plus, les indicateurs de diversité des populations ne sont jamais utilisés pour faire ces quantifications. Nous avons établi qu'il existe des méthodes statistiques (régression quantile) qui semblent adaptées au contexte de l'agriculture biologique, c'est-à-dire à la multiplicité de facteurs limitants intervenant sur une parcelle, pour établir ces relations de quantification. Cela nous amène à nous poser les questions suivantes :

Peut-on utiliser, pour des populations plurispécifiques observées en agriculture biologique les relations déjà existantes entre adventices et rendement, établies pour des populations monospécifiques ? Est-il possible de quantifier l'effet de la diversité des adventices sur les performances du blé biologique ? Quel est l'effet des pratiques de désherbage sur ces relations ? Comment ces relations peuvent-elles servir à raisonner les pratiques de désherbage et de fertilisation du blé biologique ? La méthode de régression quantile est-elle efficace pour mettre au point ces relations ?

Nous avons choisi de tester si les relations déjà existantes entre rendement et densité d'adventices sont valables dans le contexte de l'agriculture biologique en utilisant des données issues de parcelles suivies en région Rhône-Alpes en 2005 et en 2006 (suivi de 382 placettes de 0.25 m² mises en place sur 26 parcelles). Ces mêmes données sont utilisées pour tester si l'on peut quantifier l'effet de la diversité des adventices sur les performances du blé biologique. Elles permettent également de tester des relations entre des densités d'adventices précoces et plus tardives au cours d'un cycle cultural. La prédiction d'une densité tardive peut ensuite permettre d'évaluer la nuisibilité d'une population pour la culture suivante. Toutes les relations ont été testées à l'aide de la méthode de régression quantile, en intégrant l'effet du désherbage. Cette méthode permet d'obtenir des distributions de rendement potentiel, de teneur en protéines et de densité d'adventices tardives en fonction d'indicateurs précoces de la population d'adventices. Nous avons choisi de montrer comment ces distributions peuvent servir à ajuster des pratiques de fertilisation et de désherbage. Les résultats de ces travaux sont présentés sous forme d'article (en cours de révision pour une soumission à « Weed Research ») dans le troisième chapitre.

4.3. Troisième question de recherche

Les relations établies dans le troisième chapitre quantifient l'effet des adventices sur les performances du blé biologique. Ces relations sont également utilisées pour proposer des outils de raisonnement des pratiques de désherbage et de fertilisation en fonction de

l'infestation en adventices des parcelles. Nous avons établi que, pour proposer un outil d'aide à la décision adapté aux utilisateurs, il est nécessaire d'analyser les processus de décision des agriculteurs, pour mettre en évidence les connaissances qu'ils détiennent et leurs façons de raisonner. Nous avons également établi que l'utilisation des concepts et des méthodes mobilisés dans l'étude des environnements dynamiques en ergonomie pouvait être un des moyens d'analyser les processus de décision des agriculteurs et notamment de mettre en évidence les informations sur les adventices qu'ils mobilisent pour prendre leurs décisions. Cela nous amène aux questions de recherche suivantes :

Quelles sont les informations relatives aux adventices que mobilisent les agriculteurs pour prendre leurs décisions ? Ces informations sont-elles compatibles avec les indicateurs identifiés précédemment pour quantifier les effets des populations d'adventices sur le rendement et la teneur en protéines ?

Nous avons choisi de réaliser deux séries d'enquêtes auprès de huit agriculteurs biologiques en région Rhône-Alpes (ces agriculteurs ayant des parcelles intégrées aux réseaux utilisés pour le diagnostic agronomique et pour la quantification de l'effet des adventices) pour identifier les informations sur les adventices qu'ils mobilisent pour raisonner leurs pratiques. Les résultats de ces enquêtes sont analysés à la lumière d'une méthodologie utilisée pour étudier les activités cognitives en environnements dynamiques. Les informations utilisées par les agriculteurs sont ensuite comparées aux indicateurs utilisés pour quantifier l'effet des adventices sur les performances du blé biologique. Les résultats de ces travaux sont présentés dans le quatrième chapitre.

Le cinquième chapitre propose une discussion générale sur les questions de recherche évoquées dans les chapitres précédents

CHAPITRE 2

Identification des facteurs et des pratiques limitant les performances du blé biologique

Chapitre 2.

Identification des facteurs et des pratiques limitant les performances du blé biologique

Ce chapitre fait écho à la première question de recherche soulevée dans la problématique (chapitre 1, section 4.1.). Il s'agit de mettre en évidence les facteurs limitant les performances du blé conduit en agriculture biologique (rendement et teneur en protéines). Pour cela, nous avons choisi d'adopter une démarche de diagnostic agronomique régional (Doré *et al.*, 1997) réalisée en régions Rhône-Alpes sur 51 parcelles agricoles.

Connaissant les limites des méthodes statistiques classiquement utilisées pour ce type de diagnostics (régressions stepwise), nous avons choisi d'utiliser une méthode de mélange de modèles qui semble être une alternative adaptée.

Nous avons donc réalisé un diagnostic agronomique de la teneur en protéines du blé biologique à l'aide d'une méthode de mélange de modèles. Nous avons également réalisé un diagnostic agronomique du rendement du blé biologique afin de comparer les résultats avec un diagnostic réalisé antérieurement dans la même région, et de comparer deux méthodes statistiques : une régression stepwise et une méthode de mélange de modèles.

Les deux diagnostics sont présentés dans le chapitre qui suit.

I - Identification des facteurs et des pratiques limitant la teneur en protéines du blé biologique d'hiver

L'objectif de cette partie est de mettre en évidence les conditions agronomiques et climatiques limitants la teneur en protéines du blé biologique. Il s'agit aussi d'identifier les pratiques agricoles qui expliquent ces conditions limitantes et qui ont donc, indirectement, un effet sur la teneur en protéines du blé biologique. Pour cela, un diagnostic agronomique régional a été réalisé sur 51 parcelles agricoles en région Rhône-Alpes. Pour réaliser ce diagnostic, une approche statistique innovante de mélange de modèles a été utilisée pour éviter les risques inhérents à l'utilisation des méthodes de régression stepwise (voir chapitre 1, section 4.1.). Ce travail correspond à une publication acceptée sous réserve de modifications en décembre 2009 au journal «Agronomy for Sustainable Development ».

Identification of the factors limiting grain protein content of organic winter wheat using a mixing-model approach

Marion Casagrande*, Christophe David‡, Muriel Valantin-Morison*, David Makowski* and Marie-Hélène Jeuffroy*

* INRA, UMR211 INRA AgroParisTech, F-78850 Thiverval-Grignon, France

‡ ISARA-Lyon, 23 Rue Jean Baldassini, F-69364 Lyon cedex 07, France

1. Résumé / Abstract

1.1. Résumé

Le blé d'hiver biologique est caractérisé par des rendements et des teneurs en protéines inférieurs à ceux observés en agriculture conventionnelle. Un diagnostic agronomique régional a été réalisé sur 51 parcelles de blé biologique (*Triticum aestivum* L.) en région Rhône-Alpes afin d'identifier les facteurs limitants et les pratiques agricoles responsables de la variabilité de la teneur en protéines. Une méthode statistique innovante, le mélange de modèles, a été utilisée pour identifier et hiérarchiser de ces facteurs limitants et pour mettre en évidence les pratiques agricoles responsables des variations des facteurs limitants. Le statut azoté de la culture et la densité d'adventices à la floraison se sont révélés être les facteurs limitants les plus importants pour expliquer les variations de la teneur en protéines, avec un effet positif. Le stress hydrique pendant la période de remplissage des grains, le quotient photothermique 30 jours après floraison et les températures au-delà de 25°C pendant la période de remplissage des grains ont également été identifiés comme des facteurs limitants de la teneur en protéines, mais de moindre importance. On a également montré qu'une baisse du stress hydrique avait un effet positif sur la teneur en protéines tandis que le quotient photothermique et les températures supérieures à 25°C avaient un effet négatif sur la teneur en

protéines. Cette étude a mis en évidence des améliorations possibles dans la gestion des systèmes de culture et de la culture en place pour améliorer la qualité du blé biologique d'hiver. En particulier, la teneur en protéines peut être augmentée en semant une variété de blé de force améliorant, en semant le blé à la suite d'un précédent légumineuse fourragère, ou en évitant les semis tardifs.

1.2. Abstract

Organic winter wheat is characterized by lower yield and GPC compared to conventional winter wheat. A regional agronomic diagnosis was carried out to identify the limiting factors and crop management practices explaining the variability of grain protein content in a set of 51 organic winter wheat (*Triticum aestivum* L.) plots in southeastern France. An innovative statistical method, the mixing-model method, was used for identifying and ranking the limiting factors and for pointing out the crop management practices responsible for variation in limiting factors. The crop nitrogen status and weed density at flowering were the most important factors explaining grain protein content variation, with a positive effect. Water stress during grain-filling period, photothermal quotient during the 30 days after flowering and daily temperature over 25°C during the grain-filling period were also limiting factors of grain protein content but were less important. Diminishing water stress increased grain protein content whereas photothermal quotient and daily temperature over 25°C had a negative effect on grain protein content. This study pointed out several improvements in cropping systems and wheat husbandry which could be used to improve the quality of organic winter wheat. Grain protein content could be increased by using an improved baking quality grade cultivar, by choosing a legume fodder crop as preceding crop, or by avoiding late sowing dates.

2. Keywords

agronomic diagnosis ; crop management ; grain protein content ; mixing-model ; organic farming ; winter wheat

3. Introduction

Sustainable agricultural development aims at increasing the productivity and quality of crop production, and decreasing its harmful environmental impacts (Tilman *et al.*, 2002). These objectives can be partially achieved by using organic farming practices which ban the use of synthetic fertilizers and pesticides. Organic agriculture generally leads to lower grain yields (Mäder *et al.*, 2002) but provides better environmental and socio-economic benefits compared to conventional agriculture. However, further research is required to improve the performance of organic farming as well as to guarantee environmental sustainability (*e.g.* protection of water resources and biodiversity, and mitigation of climate change). The recent growth in the organic food market in Europe is mainly due to the mass distribution food chain responding to an increase in consumer demand. In response to this increase, further food quality and safety requirements have been established. For instance, the minimum threshold required for wheat grain protein content was recently increased from 9 to 10.5% of grain dry matter for organic

breadmaking wheat in France (David *et al.*, 2007). Therefore, the price paid to farmers by grain processors is now frequently dependent on the grain protein content.

In Europe, organic winter wheat (*Triticum aestivum* L.) production is characterized by low and variable grain yields and grain protein contents (Gooding *et al.*, 1993; David *et al.*, 2005a; Lueck *et al.*, 2006). Previous analytical experiments showed that the crop nitrogen supply can influence the grain protein content (Lueck *et al.*, 2006). Knowing the effect of weeds (Bond and Grundy, 2001), pests and diseases (van Bruggen, 1995; Wilkinson *et al.*, 2006), and soil compaction (Peigné *et al.*, 2007) on grain yield, and the negative relationship existing between grain yield and GPC (Fowler, 2003), effects of those factors could be expected on grain protein content. However, as there were no studies on the cumulative effect of agronomic and environmental limiting factors on grain protein content, there is a crucial need to identify the most important limiting factors occurring on farmers' fields and to quantify their cumulative effects on grain protein content.

The Regional Agronomic Diagnosis (RAD) is an appropriate method for identifying and ranking the factors limiting crop performances, from data collected in farmers' fields located in a region of interest (Doré *et al.*, 1997). It consists of two steps: (i) to identify and rank the agronomic and environmental factors explaining low crop performance, and, in turn, (ii) to identify the characteristics of crop management and environment linked to these limiting factors. The RAD methodology has already been applied on cereal crops such as conventional (Leterme *et al.*, 1994) and organic (David *et al.*, 2005a) winter wheat, and conventional barley (Le Bail and Meynard, 2003). The purpose of these studies was to explain yield or grain protein content levels and to propose changes in agricultural practices to avoid limiting factors. Except in Le Bail and Meynard (2003), no variable characterizing grain quality has been analyzed by RAD although grain protein content has become an important criterion for breadmaking wheat.

Most of these diagnostic analyses are based on linear regressions and stepwise selection (Le Bail and Meynard, 2003; David *et al.*, 2005a). These statistical techniques are also frequently used in ecology (Whittingham *et al.*, 2006). The main value of stepwise selection is that it can be used to select a subset of explanatory variables by using statistical criteria computed from a dataset, like the Akaike Information Criteria, the Bayesian Information Criteria, or Fisher statistical tests. The number of explanatory variables and parameters in the final model retained with this procedure is expected to be less than in the full model, and the variance of the estimated parameters can also be reduced. However, several studies (Burnham and Anderson, 2002; Whittingham *et al.*, 2006) have emphasized the limitation of stepwise selection. An important problem is that the uncertainty of the results of the selection method is generally ignored. All inferences are usually made using the selected model only, although the selected set of explanatory variables may be highly sensitive to the dataset used to perform the selection. Thus, a small change in the dataset may lead to a different set of selected variables.

Table 2.I.1. Climatic conditions from sowing to harvest within the three studied sub-areas Diois, Plain of Lyon and Plain of Valence; minimum, maximum, and mean values computed for 1994, 1995, 2000, 2004, 2005 and 2006.

Variable	Sub-area	minimum value	maximum value	mean value	standard-deviation
cumulative rainfall (mm)	Diois	532.5	923.5	695.4	126.3
	Plain of Lyon	503.6	770.4	622.6	105.1
	Plain of Valence	242.0	706.2	497.0	118.3
cumulative temperature (°C)	Diois	2145.0	3151.9	2640.8	205.8
	Plain of Lyon	2449.1	2974.1	2757.8	180.8
	Plain of Valence	2103.6	2891.6	2498.1	280.6
cumulative radiation (J.cm⁻²)	Diois	2790.3	3486.0	3108.5	200.6
	Plain of Lyon	2541.3	2932.6	2740.6	147.3
	Plain of Valence	2630.7	3264.0	2956.5	178.7

Several statisticians have emphasized that it can be better to mix all models than to use the single selected model, especially when there is a certain degree of uncertainty in choosing the best model (Burnham and Anderson, 2002). The basic idea is to use a weighted mean of the individual model predictions instead of the prediction derived from the single 'best' model. The mixing-model method can improve the accuracy of model predictions and of parameter estimation, and give more realistic confidence intervals.

The aim of this paper is to identify and rank the main limiting factors of grain protein content of organic winter wheat, using the regional agronomic diagnosis approach and a mixing-model method, and to determine the characteristics of the crop management explaining the occurrence of these limiting factors.

4. Material and Methods

4.1. Data

Data were collected in 51 winter wheat fields located on 25 organic farms in the Rhône-Alpes region (within a 10800 km² area ranging from 44° 22' to 45°55' N and from 4° 41' to 5° 25' E in south-eastern France), the third largest region for organic farmland in France. Three sub-areas can be distinguished: the Diois region, a hilly sub-area near mountainous area of Vercors, and two plain sub-areas, the Plain of Lyon and the Plain of Valence, respectively in the north and south part of the region. The field survey was carried out during six crop years, out of 1994 to 2006, characterized by contrasting weather conditions over years and sub-areas (Tab. 2.I.1.). Daily weather data (mean temperature, rainfall, radiation, and potential crop evapotranspiration) were recorded near each field (Tab. 2.I.1.). Fields were also characterized by various soil types including calcareous soils classified as sandy clay loam, silt loam or sandy loam (soil A, 29 % of the fields); deep soils classified as silt loam or silty clay loam (soil B, 12% of the fields); deep and calcareous silt soils (soil C, 39% of the fields); and calcareous stony clay soils (soil D, 20% of the fields).

The organic wheat fields were selected to cover a wide range of cropping systems including different crop management strategies. Farms were selected to represent the three main cropping systems of the region (David *et al.*, 2007). Twenty-seven percent of the fields in the survey were referred to as system 1: mixed farms with crop rotation including a high proportion of fodder legumes (almost 60% of the preceding crops of wheat) followed by cereal, using their own organic manure (average total N available: 53 kg N.ha⁻¹). Fifty-nine percent of the fields were referred to as system 2: intensive grain growers that produce cereals using output organic fertilizer (average total N available: 67 kg N.ha⁻¹), and include fodder legumes (10% of wheat preceding crops), grain legumes (35% of wheat preceding crop), and spring crops. Fourteen percent of the fields were referred to as system 3: extensive mixed or arable farms that produce cereals with limited N input (average total N available: 37 kg N.ha⁻¹), and include fodder legumes (10% of wheat preceding crop), grain legumes (20% of wheat preceding crop), and spring crops.

Eight wheat cultivars (Aztec, Caphorn, Florence Aurore, Lona, Orpic, Renan, Sidéral, and Soissons) were grown in the 51 organic fields. These cultivars differed in their baking quality grades and hence in their potential grain protein content values: superior (named BPS, with low grain protein content, 63% of the fields) or improved (named BAF, with high grain protein content, 37% of the fields). In this study, the baking quality grade was considered as a descriptor and combined with the limiting factors, even if it is a crop management technique, because this characteristic is supposed to have a great effect on grain protein content. Cultivars also differed according to their earliness at heading: early or late.

The crop management techniques used by the farmers were surveyed. The preceding crop was broken down into three classes: spring crop (47% of the fields), winter crop (27.5% of the fields) and fodder legume crop (25.5% of the fields). These three classes were assumed to influence the weed population on the succeeding wheat crop as well as the type and number of weeding operations (hoeing or harrowing) (Bond and Grundy, 2001). The number of mechanical soil tillage operations before sowing was counted, ranging from 0 to 5. The sowing date was broken down into three classes, taking into account the weather conditions of the three sub-areas: early (31% of the fields), optimum (22% of the fields) or late (47% of the fields) (David *et al.*, 2007). In the Plain of Lyon and the Plain of Valence, sowing date was considered as early before the 27th of October, as optimum between the 27th of October and the 6th of November, and as late after the 6th of November. In the Diois, sowing date was considered as early before the 5th of October, as optimum between 5th and 15th of October, and as late after the 15th of October.

The organic nitrogen fertilizer rate (amount of N applied in $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$) was calculated from the type and the amount of fertilizer (expressed in $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$) applied during autumn and/or spring time. The total N applied was calculated from the amount of organic fertilizer or manure multiplied by standardized nitrogen content (expressed in $\text{kg N}\cdot\text{kg}^{-1}$) for each type of fertilizer or manure (0.022 $\text{kg N}\cdot\text{kg}^{-1}$ for chicken manure, 0.007 $\text{kg N}\cdot\text{kg}^{-1}$ for sheep manure, 0.0055 $\text{kg N}\cdot\text{kg}^{-1}$ for cattle manure, 0.0072 for goat manure, and 0.14 $\text{kg N}\cdot\text{kg}^{-1}$ for pig bristles). Then the applied nitrogen rate ranged from 0 to 264 $\text{kg N}\cdot\text{ha}^{-1}$. The presence of late spring fertilization, applied after the 1st of April, was surveyed (presence of late spring fertilization: 76.5% of the fields) knowing the potential positive effect of late applications of N fertilizers on grain protein content as reported by Debaeke *et al.* (1996). Weed control during crop cycle was characterized by the number of mechanical weeding operations (spring-tine harrow) after sowing and ranged from 0 to 3.

4.2. Grain yield and grain protein content

A uniform plot (1000 to 2000 m^2) was selected on each field to avoid intra-field variability in terms of soil type, wheat development and weed infestation. All measurements were made within these plots.

Grain yield and grain N content were determined at maturity from a minimum of four random sub-plots of 0.25 m². Grain yield was standardized at 15% moisture content after oven-drying at 80°C for 48 hours. The N content of the grains, measured by the Dumas method, allowed the calculation of grain protein content, by multiplying it by 5.7.

4.3. Indicators of limiting factors

Six indicators of potential agronomic or environmental limiting factors were chosen to explain grain protein content variability.

4.3.1 Water balance

The dynamic water balance was calculated on a daily basis, from flowering to harvest, as the difference between actual evapotranspiration and maximal crop evapotranspiration. Actual evapotranspiration depends on soil water availability, which itself depends on rainfall, irrigation and soil water content. Maximal evapotranspiration was calculated as the product of the potential crop evapotranspiration and the cultural crop coefficient, which varied during crop growth according to the development stage (Brisson *et al.*, 1992). The calculation was initiated at sowing time on each field, assuming the soil water availability at that time as nil¹.

4.3.2. Photothermal quotient and thermal stress

Temperature has a positive effect on biomass and N accumulation in grains during grain filling (Sofield *et al.*, 1977). However, above a certain threshold (defined by various authors between 20 and 30 °C), high mean temperatures limit biomass accumulation in grains (Bhullar and Jenner, 1985), leading to an increase in grain protein content by concentration effect. During grain filling, the amount of incident solar radiation directly affects biomass accumulation, and thus may affect grain weight and/or grain protein content (Singh and Jenner, 1984). We therefore calculated the photothermal quotient, ratio of mean daily solar radiation to mean daily temperature (Fischer, 1985) for the beginning of the grain-filling period, i.e. 30 days after flowering. The number of days with a mean temperature above 25°C between flowering and harvest was also determined.

4.3.3. Soil compaction

A soil profile trench, perpendicular to the direction of ploughing and 3-m long x 2-m wide by 1.5-m deep, was examined around the flowering stage in each field near the zones of plant sampling to assess the soil structure and rooting depth. The soil structure was assessed from the clod size distribution and internal structural porosity (Gautronneau and Manichon, 1987). Based on that assessment, the soil structure of each field was classified as either favourable

¹ Une présentation détaillée du calcul du bilan hydrique est disponible en Annexe I

(non-compacted internal state and open clod distribution) or unfavourable (compacted internal state and compacted distribution) structure.

4.3.4. Nitrogen nutrition

The Nitrogen Nutrition Index (NNI) is a good indicator of crop nitrogen status to identify crop N deficiency (Justes *et al.*, 1997). This indicator is known to be positively correlated to grain protein content (Debaeke *et al.*, 1996; Justes *et al.*, 1997). It was calculated using the critical nitrogen curve established by Justes *et al.* (1997). At flowering, aboveground biomass and its total N content were determined on a minimum of four sub-plots (0.25 m²) per plot. N concentration of the samples, previously oven-dried, weighed and ground, was determined by the Dumas method. A Nitrogen Nutrition Index below 0.9 indicates a N deficiency (Justes *et al.*, 1997).

4.3.5. Weeds

The total number of weeds was counted at the flowering stage (in plants.m⁻²) on a minimum of four random sub-plots of 0.25 m² size each and then averaged.

4.3.6. Foliar Diseases

The incidence of leaf diseases (*Septoria* spp., *Erysiphe graminis* and *Puccinia triticina*) was assessed between flowering and soft dough stage on the upper two leaves of 20 plants per field. As leaf diseases reduce green leaf area (Audsley *et al.*, 2005), the overall percentage of leaf area affected by all foliar diseases was estimated by eye, from 0% to 100%.

4.4. Statistical analysis

Two types of analysis were performed. First, grain protein content was related to the candidate explanatory variables using linear regression models defined by :

$$y = \theta_0 + \theta_1 x_1 + \dots + \theta_p x_p + \varepsilon \quad (1)$$

where $x_1 \dots x_p$ are the explanatory variables (indicators of the limiting factors), $\theta_0, \dots, \theta_p$ are the model parameters, and ε is the residual error term.

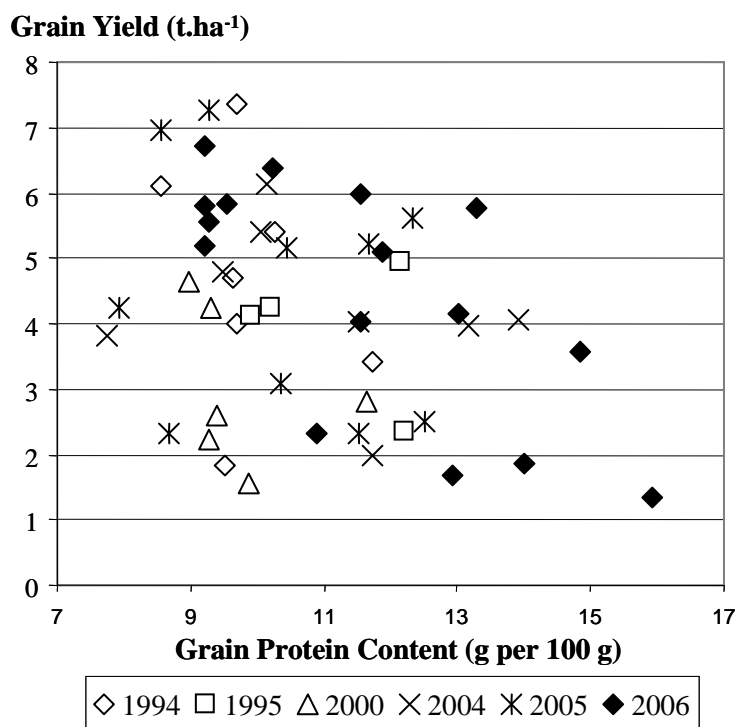
The mixing-model method (Burnham and Anderson, 2002) consists of fitting all possible linear combinations of the explanatory variables by least squares and in computing, for each combination, the Akaike Information Criterion (AIC) value (Akaike, 1974), and the Akaike weight (Burnham and Anderson, 2002). When K explanatory variables were available, 2^K variable combinations, and so 2^K regression models, were fitted. The Akaike weight was computed for each i^{th} regression model as:

$$w_i = \frac{e^{(-0.5(AIC_i - AIC_{\min}))}}{\sum_{i=1}^n e^{(-0.5(AIC_i - AIC_{\min}))}} \quad (2)$$

Table 2.I.2. Values of grain yield, grain protein content, and of the quantitative limiting factor indicators.

Variable	minimum value	Maximum value	mean value	standard deviation
Grain yield (t.ha ⁻¹)	1.3	7.4	4.2	1.6
Grain protein content (%)	7.8	15.9	10.8	1.8
Nitrogen Nutrition Index at flowering	0.25	0.71	0.5	0.1
Weed Density (plants.m ²)	0.0	566.9	104.9	107.8
Water Balance from flowering to harvest (mm)	-213.0	0.0	-68.4	60.4
Photothermal Quotient after flowering (J.cm ⁻² .°C ⁻¹ .day ⁻¹)	0.8	1.4	1.1	0.1
Percentage of leaf area affected by foliar diseases (%)	0.0	90.0	21.2	22.5
Number of days with temperature over 25°C	0	12	2.5	3.6

Figure 2.I.1. Grain yield (t.ha⁻¹) and grain protein content (g per 100 g) values for six crop years.



where w_i is the weight obtained for the i^{th} combination of explanatory variables, AIC_i is the AIC value obtained for the corresponding regression model, and AIC_{min} is the minimal AIC value obtained among the $N = 2^K$ tested combinations. The weight w_i is the probability that, given a set of models, model i would be the AIC-best model (Burnham and Anderson, 2002). All the models were averaged using their Akaike weight. Estimates of the relative importance of the variable x can be made by summing the Akaike weights across all models in the set where this variable occurs. The relative importance of x is reflected by the sum of these weights, noted $w_+(x)$. The larger the $w_+(x)$ the more important x is (Burnham and Anderson, 2002). Using these sums, all the variables can be ranked according to their importance.

In a second step, the limiting factors selected in the first step were explained by the crop management techniques and the environmental conditions such as soil type or sub-area. For each previously identified limiting factor, a linear mixed-effects model (with years as a random effect) was defined to relate the limiting factor to the crop management techniques and environmental conditions (including location) (Pinheiro and Bates, 2000). The model was fitted to the data and was compared to a linear regression model without any random effect. When the linear mixed-effects model had the lowest AIC, *i.e.* when there was a significant year effect, the mixing-model method described above was implemented with the series of linear mixed-effects models resulting from all the possible linear combinations of crop management techniques and environmental conditions. When the lowest AIC was reached without random effects, the mixing-model method was implemented with linear regression models. Estimates of the relative importance of the variable of interest were used to determine which crop management techniques and environmental conditions had an effect on the limiting factors.

All statistical analyses were performed using the statistical program R (version 2.5.1, 2007).

5. Results and discussion

5.1. Variation in grain yield and Grain Protein Content

Grain yield varied from 1.3 to 7.4 t.ha⁻¹ and grain protein content from 7.8 to 15.9 g per 100 g (Tab. 2.I.2.). These wide ranges of values are usual for organic wheat (David *et al.*, 2005a) and wider than in conventional wheat (Leterme *et al.*, 1994).

The values of grain yield and grain protein content are shown in Figure 2.I.1. The highest yield values were generally obtained when grain protein content values were low and the highest grain protein content values were observed for the lowest yield values, pointing out the well-known negative correlation between yield and grain protein content (Fowler, 2003). The coefficients of variation of grain protein content and grain yield were 17% and 38% respectively.

5.2. Characteristics of the limiting factors

A correlation matrix, computed for the quantitative factors (Nitrogen Nutrition Index, weed density, water balance, photothermal quotient, foliar diseases and high temperatures), concluded to no significant correlation among them (data not shown²).

5.2.1. Abiotic factors

The water balance values showed water stress during the grain-filling period as it ranged from 0 to -213 mm (Tab. 2.I.2.). This was consistent with the observations reported by David *et al.* (2005a) for the same region.

The number of days with an average temperature above 25°C after flowering ranged from 0 to 12 (Tab. 2.I.2.). The highest average temperatures were obtained in 2004 and high temperatures were more frequent in the Plain of Valence compared to the other areas. The photothermal quotient during the grain-filling period ranged from 0.8 to 1.4 J.cm⁻².°C⁻¹.day⁻¹ (Tab. 2.I.2.).

Most fields (75%) were characterized by a favourable soil structure with an open internal state of clods which would not be expected to limit plant growth or nutrition.

At flowering, the Nitrogen Nutrition Index (NNI) varied from 0.25 to 0.71 with a mean of 0.50 ± 0.12, indicating frequent and severe nitrogen deficiencies (Tab. 2.I.2.). These values were in the same range as the results reported by David *et al.* (2005a) on organically grown wheat, but were in general lower than those obtained from conventionally grown wheat (Justes *et al.*, 1997).

5.2.2. Biotic factors

The averaged weed density per plot varied widely from 0 to 567 plants.m⁻² with a high coefficient of variation (103%), expressing high variability among fields (Tab. 2.I.2.). These values were in the same range as those reported in previous organic farming surveys (Rasmussen, 2004; David *et al.*, 2005a). Weed density in organic fields is known to be higher than in conventional fields and associated with an increase in the number of species (Hald, 1999; Bond and Grundy, 2001).

The overall percentage of leaf area affected by foliar diseases varied from 0 to 90% with a mean of 21.2% (Tab. 2.I.2.) expressing weak disease pressure even in absence of fungicide use. Situations were highly variable from one field to another (standard deviation 22.5%). The range of the levels of attacks was wider than that observed by David *et al.* (2005a). This is due to the large range of weather conditions that occurred across our experiments. Septoria

² La matrice de corrélation est présentée en Annexe II

Table 2.I.3. Estimated parameter values and relative importance values ($w_+(x)$: probability that a given predictor will appear in the AIC-best model, derived from the mixing-model analysis) of the limiting factors of grain protein content.

Limiting factor	Estimated parameter value	Relative importance value $w_+(x)$
Baking quality grade	-2.4	1.00
Soil structure	-0.02	0.28
Weed density	0.004	0.88
Nitrogen Nutrition Index	5.0	0.99
Water balance	0.004	0.68
Photothermal quotient	-1.8	0.70
Foliar diseases	-0.003	0.39
High temperatures	-0.07	0.68

spp. and *Puccinia triticina* were more frequent with more severe injuries on leaves in our experiments than in the study of David *et al.* (2005a).

5.3. Identification of the limiting factors of the Grain Protein Content

5.3.1. Identification and ranking of the limiting factors

The relative importance values of each limiting factor ($w_+(x)$), are presented in Tab. 2.I.3. The lowest relative importance values were obtained for soil structure and foliar diseases, respectively equal to 0.28 and 0.39. The probability that these factors appear in the best model was thus low and they were assumed to have little effect on grain protein content. Foliar disease (leaf brown rust) was involved in increasing grain protein content in previous conventional experimental studies (Debaeke *et al.*, 1996). Our study showed here that foliar diseases are not a major factor in organic cereals even in absence of disease control.

The relative importance values associated to the other factors were higher than 0.68. The most important factor was the baking quality grade, followed by the Nitrogen Nutrition Index and the weed density. Photothermal quotient, water balance and high temperatures had a smaller effect on grain protein content. Here nitrogen nutrition had a great effect on grain protein content of organic grown wheat, confirming results obtained through agronomic diagnosis on conventional cereal (Le Bail and Meynard, 2003). Weed density at flowering had a significant positive effect on grain protein content and the effect of weed density has seldom been pointed out or even studied in literature. Compared with yield limiting factors (David *et al.*, 2005a), no effect of soil structure on grain protein content was found here, but effects of baking quality grade, photothermal quotient and water balance were found. Thus, limiting factors of yield and grain protein content slightly differed, involving different crop management in order to achieve either high yield or high grain protein content.

5.3.2. Baking quality grade

The baking quality grade (here the effect of BPS class was tested) of wheat cultivars showed a strong negative effect on grain protein content ($w_+(x) = 1.00$) (Tab. 2.I.3.). This result is consistent with those of Fowler (2003) who showed that higher-yielding cultivars (BPS cultivars in our study) had a lower grain protein content, here 2.4% of grain dry matter less, than lower-yielding cultivars with higher grain protein content value (BAF cultivars in our study). Thus, the main factor explaining the grain protein content variation was a characteristic of the crop management, the cultivar choice. Farmers could easily improve the grain protein content of wheat by sowing BAF cultivars.

5.3.3. Nitrogen nutrition

The Nitrogen Nutrition Index at flowering (NNI) had a positive effect on grain protein content ($w_+(x) = 0.99$) with a high parameter value (Tab. 2.I.3.). This result showed that nitrogen

Table 2.I.4. Estimated parameter values and relative importance values ($w_+(x)$: probability that a given predictor will appear in the AIC-best model) for the identified limiting factors of grain protein content. For a given variable, “-“ indicates that the practice was not tested.

		High temperatures		Photothermal quotient		Water balance		Nitrogen Nutrition Index		Weed density	
Cropping technique		Estimated parameter value	Relative importance value $w_+(x)$	Estimated parameter value	Relative importance value $w_+(x)$	Estimated parameter value	Relative importance value $w_+(x)$	Estimated parameter value	Relative importance value $w_+(x)$	Estimated parameter value	Relative importance value $w_+(x)$
Sowing date	Early	-0.49	0.92	-0.03	0.87	22.46	1.00	-	-	20.60	1.00
	Late	0.57	0.92	-0.11	0.87	11.54	1.00	-	-	48.76	1.00
Earliness at heading (late)		3.50	0.52	-0.02	0.38	-11.44	0.96	-	-	-	-
Sub-areas	Plain of Lyon	1.82	1.00	-0.02	0.33	-81.75	1.00	0.05	0.65	12.52	1.00
	Plain of Valence	4.54	1.00	-0.02	0.33	-104.98	1.00	0.06	0.65	-7.12	1.00
Soil type	Soil B	-	-	-	-	77.35	1.00	-	-	-	-
	Soil C	-	-	-	-	64.85	1.00	-	-	-	-
	Soil D	-	-	-	-	-5.13	1.00	-	-	-	-
Nitrogen rate		-	-	-	-	0.01	0.13	0.00	0.30	0.40	0.84
Preceding crop	winter crop	-	-	-	-	-	-	-0.07	0.79	-50.76	1.00
	spring crop	-	-	-	-	-	-	-0.09	0.79	-58.08	1.00
Baking quality grade (BPS)		-	-	-	-	-	-	-0.04	0.64	-	-
Late spring fertilization (presence)		-	-	-	-	-	-	0.02	0.39	-	-
Cropping systems	system 2	-	-	-	-	-	-	-	-	12.10	1.00
	system 3	-	-	-	-	-	-	-	-	160.28	1.00
Mechanical operations before sowing		-	-	-	-	-	-	-	-	21.03	0.97
Weed control		-	-	-	-	-	-	-	-	-1.68	0.93

nutrition was determinant for N accumulation in grains during the grain-filling period. This is consistent with many previous analytical studies on conventional and organic cereals about the effect of nitrogen nutrition on grain protein content (Debaeke *et al.*, 1996; Justes *et al.*, 1997; Fowler, 2003; Lueck *et al.*, 2006). Among a wide range of potential limiting factors, nitrogen was the first environmental factor explaining the variability of organic winter wheat grain protein content. This result had never been shown previously.

5.3.4. Weed competition

Weed competition (estimated by weed density at flowering in our study) had a positive effect on grain protein content ($w_+(x) = 0.88$) with an important estimated parameter value (parameter value = 0.004 i.e. an increase of 100 plants.m⁻² increased the grain protein content of 0.4%) (Tab. 2.I.3.). Weed density reduces yield (David *et al.*, 2005a) explaining thus an increase in grain protein content by concentration effect (Sofield *et al.*, 1977). The negative effect of weeds on grain protein content was previously pointed out in an experiment conducted on conventional wheat (Awan *et al.*, 2001). But the effect of weeds on grain protein content in a conventionally grown wheat experiment could vary across sites (Mason and Madin, 1996) and, in general, no effect was found (Le Bail and Meynard, 2003). Our results showed that the weed density represents an important limiting factor, when considered among a wide range of potential limiting factors for grain protein content in organic systems (3rd most important limiting factor, Tab. 2.I.3.). Controlling weeds in organic winter wheat may be not crucial for grain protein content but it could improve yield as weeds had a negative effect on kernel weight and kernel number (David *et al.*, 2005a).

5.3.5. Climatic limiting factors: radiation, temperature and water availability

The photothermal quotient calculated for the 30 days after flowering, involving radiation and temperature, had a negative effect on grain protein content (Tab. 2.I.3.). This negative effect confirmed that low radiation and/or high temperature enhanced N content in grains (Sofield, 1977; Singh and Jenner, 1984) even in farmers' fields where several other limiting factors occurred at the same time. The negative effect of the number of days over 25°C from flowering to harvest on grain protein content (Tab. 2.I.3.) was not consistent with the findings of Bhullar and Jenner (1985). Hence, the negative effect of photothermal quotient was maybe more due to low radiation than to high temperatures.

As water balance had a positive effect, water deficit had a negative effect on grain protein content (Tab. 2.I.3.). This may be explained by the fact that an increase in available water can increase crop N uptake (Clarke *et al.*, 2001).

5.4. Effect of crop management and environmental conditions on limiting factors

The crop management techniques and environmental conditions tested for each limiting factor are displayed in Tab. 2.I.4.

5.4.1. Effect of crop management and environmental conditions on the indicators of climatic limiting factors

The lowest AIC were obtained with the linear mixed-effect model for high temperature and water balance during the grain-filling period, showing a year effect for those variables. In contrast, no year effect was found for the photothermal quotient during the grain-filling period. The most important crop management techniques and environmental conditions explaining climatic limiting factors were sowing date, earliness at heading, location and soil type (Tab. 2.I.4.).

During the grain-filling period, weather differences between sub-areas had an effect on the number of days with high temperatures and on the water balance (Tab. 2.I.4.). In the Plain of Lyon and in the Plain of Valence, the days with temperature over 25°C were more frequent, and water balance was lower, increasing hence the water stress. It showed that the plains are drier and warmer than the hilly region of Diois during the grain-filling period.

Late sowing delayed the flowering date, involving an increase in the number of days after flowering with high temperature and, in turn, a decrease in photothermal quotient (Tab. 2.I.4.). On the other hand, an early sowing date led to an earlier date of flowering and thus an earlier grain filling period, avoiding water stress in such cases and explaining the strong positive effect of the sowing date on water balance (Tab. 2.I.4.). This was consistent with the fact that water balance was negatively related to late earliness at heading, as earlier heading helped avoiding water stress during the grain-filling period. Water balance was higher in soils B and C with deep water reserve, compared to soil D with limited water reserve (Brisson et al, 1992).

5.4.2. Effect of crop management and environmental conditions on Nitrogen Nutrition Index

Linear models were used for analyzing Nitrogen Nutrition Index (NNI) because there was no year effect (Tab. 2.I.4.).

Preceding N₂-fixing fodder crops (mainly Lucerne) improved the NNI (Tab. 2.I.4.) as previous crop strongly influenced the time and amount of N release (Debaeke *et al.*, 1996; Dawson *et al.*, 2008). The effect of previous crop on wheat N status was more expressed in such organic crop where little amount of N is applied.

BAF cultivars had a higher NNI than BPS cultivars in our study (Tab. 2.I.4.). This was consistent with our previous results as both NNI and BAF cultivars had a positive effect on grain protein content.

NNI was not strongly related to the N-input applied. This may be due to limited N use efficiency from organic fertilizers and the lack of synchronization of crop nitrogen requirements and availability of soil nitrogen from organic manure (Dawson *et al.*, 2008). Thus, NNI was more dependent on previous crop than on N applied, contrasting with results usually observed in conventional systems where N-input levels are higher. Moreover, spring fertilization before the 2nd node stage had no significant effect on grain protein content.

5.4.3. Effect of crop management and environmental conditions on weed density

Mixed-effect models were used for analyzing weed density because the year effect was significant (Tab. 2.I.4.).

Early and late sowing had a positive effect on weed density at flowering compared with optimum sowing date (Tab. 2.I.4.). Early sowing did not maximize the differential of development between crop and weeds, giving advantage to the weeds. Late sowing enhanced weed density, because it furthered low crop emergence and weed competition in the seedbed (Bond and Grundy, 2001). However, the effect of sowing date on weed density cannot be generalized as it depends on the present species and the location of the fields (Bàrberi, 2002).

Weed density was decreased when the previous crop were either winter crops or spring crops compared to fodder legume crops (Tab. 2.I.4.). Indeed, alternation between winter and spring crops prevents the establishment of a specialized flora and helps keeping low density of each species in addition to diversification of soil tillage reducing weed emergence (Bàrberi *et al.*, 1997).

The cropping systems 2 (intensive) had a positive effect on weed density, potentially explained by inefficient weed control in the crop rotation, and system 3 had an even higher one (Tab. 2.I.4.). As the cropping system 3 was more extensive, the highest weed density was explained by less weed control during the crop rotation.

The Plain of Lyon included fields from cropping system 2 or 3, explaining thus a positive effect of this sub-area on weed density. The Plain of Valence sub-area mainly involved spring and winter preceding crop (data not shown), explaining the negative effect of this area on weed density (Tab. 2.I.4.).

The positive effect of the nitrogen rate on weed density (Tab. 2.I.4.) could be explained by better nutritive conditions for weed development (Awan *et al.*, 2001). However, previous results showed that weed response to N applications depended greatly on the weed species (Zoschke and Quadranti, 2002). Moreover, Miyazawa *et al.* (2004) showed that the weed density was increased by application of manure compost inducing import of weed seeds. Weed density was slightly decreased by the number of weed controls: 1.68 plants.m⁻² per weed control operation (Tab. 2.I.4.), showing no important effect of mechanical weed control during crop growth on weed density observed at flowering. Weed control efficacy is known to depend on the present species, timing of application, and soil conditions (Bond and Grundy,

2001; Bàrberi, 2002). Weed density was increased when the number of mechanical operations before sowing increased (Tab. 2.I.4.), suggesting that repetitive soil tillage may have been applied at inappropriate periods or when potential weed pressure of the field was already too high.

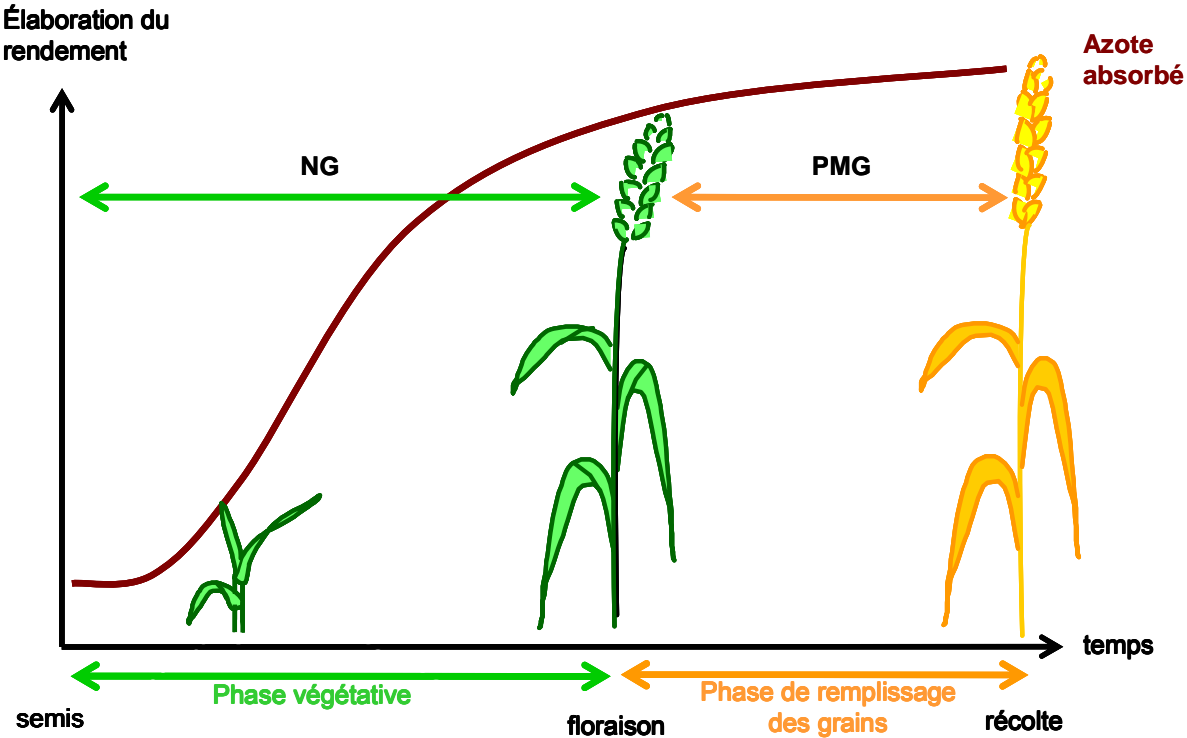
6. Conclusion

Our diagnosis study showed that grain protein content variability, for organic wheat in the South East of France, was mainly explained by baking quality grade, crop nitrogen nutrition, and weed competition. This implies that one way of increasing grain protein content would be to improve fertilization strategies. Grain protein content was also affected by several climatic factors such as the photothermal quotient, the high temperatures, and the water balance. Finally, we showed that grain protein content could be increased by using an improved baking quality grade cultivar, fodder legume crop as preceding crop, and by avoiding late sowing. Our study provided a better knowledge and a ranking of main factors and crop management techniques responsible for grain protein content variations in organic winter wheat.

This study is an example of regional agronomic diagnosis carried out on a large field network monitored with a limited number of agronomic and environmental factors along the crop cycle and an innovative statistical method. Our results should be completed by using an expert knowledge approach coupled with a good knowledge of farmers' decision rules in order to target technical options to improve grain protein content and match millers' requirements.

Pour des raisons d'homogénéisation du document, les références bibliographiques relatives à cet article se trouvent à la fin du document

Figure 2.II.1. Elaboration du rendement du blé biologique et de ses composantes (nombre de grains par m² (NG) et poids de mille grains (PMG)) et dynamique de l'azote absorbé au cours du cycle.



II - Identification des facteurs et des pratiques limitant le rendement du blé biologique d'hiver à l'aide d'une méthode statistique innovante

Cette partie présente une comparaison de deux méthodes statistiques pour la mise en évidence des facteurs et des pratiques limitant les composantes du rendement du blé biologique. Il fait écho à la première question de recherche émise dans la problématique (chapitre 1, section 4.1.). En effet, les résultats obtenus par méthode de régression stepwise sont plus instables que ceux obtenus par mélange de modèle (Prost *et al.*, 2008). Afin de confirmer les résultats obtenus par David *et al.* (2005a), de tester l'effet des méthodes statistiques appliquées à la base de données et d'interpréter conjointement les résultats obtenus sur la teneur en protéines et le rendement, nous avons réalisé un diagnostic agronomique sur les composantes du rendement du blé biologique sur une base de données plus grande que celle utilisée par David *et al.* (2005a). Rappelons ici que la méthode de diagnostic agronomique régional se déroule en deux étapes : (i) l'identification et la hiérarchisation des facteurs limitant la variable d'intérêt, puis (ii) l'identification de pratiques agricoles et des facteurs environnementaux qui peuvent avoir une influence sur les facteurs limitants identifiés précédemment (Doré *et al.*, 1997).

La décomposition du rendement en ses deux composantes est, généralement, plus puissante pour identifier de façon plus précise les facteurs limitants correspondant à chacune des phases d'élaboration de ces deux composantes. Nous avons donc choisi, pour étudier le rendement, de nous intéresser à ses composantes, le nombre de grains par m² (NG) et le poids de mille grains (PMG) (voir Fig. 2.II.1. ci-contre), sachant que le rendement est le produit de ces deux composantes. Le NG étant déterminé au cours de la phase végétative, les facteurs limitants, identifiés comme susceptibles de l'affecter, seront choisis durant cette phase. Le PMG, lui, est déterminé durant la phase de remplissage des grains, les facteurs limitants qui l'affectent seront donc caractéristiques de cette période (Brancourt-Hulmel *et al.*, 1999).

1. Matériels et méthodes

1.1. Base de données

1.1.1. Caractéristiques du réseau de parcelles

Les parcelles étudiées pour réaliser ce diagnostic sont les mêmes que celles du diagnostic précédent sur la teneur en protéines (voir chapitre 2.I, section 4.1.). Il s'agit de 51 parcelles agricoles suivies en région Rhône-Alpes entre 1994 et 2006 intégrant les 24 parcelles précédemment étudiées par David *et al.* (2005a). Au total, la base de données comprend 6 années climatiques différentes, et représente la variabilité pédoclimatique de la région (3 sous-régions agricoles : Diois, Plaine de Valence et Plaine de Lyon ; 4 types de sols différents).

Tableau 2.II.1. Caractéristiques des cultivars présents sur le réseau de parcelles étudiées (Arvalis et Semences de France, 2007)

Cultivar	Classe de panification	PMG potentiel*	classes précocité	Résistance* à la septoriose	Résistance* à la rouille brune
Aztec	BPS	faible	précoce	4	7
Cap Horn	BPS	faible	tardif	4	8
Florence	BAF	élevé	tardif	2	5
Aurore	BAF	faible	précoce	5	8
Lona	BPS	faible	précoce	4	5
Orpic	BAF	élevé	tardif	4	8
Renan	BPS	faible	précoce	4	5
Sidéral	BPS	faible	précoce	4	5
Soissons	BPS	faible	précoce	5	2

*le PMG est classé comme faible lorsqu'il est inférieur à 53 g, il est classé comme élevé s'il est supérieur à cette valeur

**une note faible correspond à une variété sensible, une note élevée correspond à une plus grande résistance

Tableau 2.II.2. Classification des dates de semis en fonction de la sous-région (d'après David et al., 2007).

Période de semis	Diois	Plaine de Valence et Plaine de Lyon
Précoce	avant le 5/10	avant le 27/10
Optimale	du 5/10 au 15/10	du 27/10 au 6/11
Tardive	après 15/10	après le 6/11

Tableau 2.II.3. Taux d'azote dans les matières azotées apportées

Type d'apport	Taux d'azote (kg N.kg⁻¹)
Fumier de bovins	0.0055
Fumier d'ovins	0.0070
Fumier de caprins	0.0072
Fumier de volailles	0.0220
Engrais organique 9 %	0.0900
Engrais organique 10 %	0.1000
Engrais organique 13 %	0.1300
Soies de porc	0.1400

Source : base de données de la Chambre d'Agriculture de la Drôme

Ces parcelles ont été sélectionnées pour représenter la gamme de variabilité des systèmes de production rencontrés dans la région c'est-à-dire des systèmes mixtes avec élevage sur l'exploitation ou à proximité (type 1), des systèmes céréaliers intensifs (type 2) et des systèmes céréaliers extensifs (type 3) (David *et al.*, 2007).

1.1.2. Caractéristiques des cultivars

Les parcelles étudiées ont été emblavées avec 8 cultivars (Aztec, Cap Horn, Florence Aurore, Lona, Orpic, Renan et Soissons) qui se différencient par leur classe de panification (BAF ou BPS), leur PMG potentiel (faible ou élevé), leur précocité à épiaison (précoce ou tardif) et leur résistance à la septoriose et à la rouille brune (voir Tab. 2.II.1. ci-contre).

1.1.3. Diversité des pratiques agricoles sur le réseau

Sur les 51 parcelles du réseau, les pratiques effectuées sur les parcelles ont été recueillies par enquêtes auprès des agriculteurs.

On distingue trois types de précédents : des cultures de printemps (*e.g.* maïs, soja, tournesol), des cultures d'hiver (*e.g.* blé, seigle, colza) et des légumineuses fourragères (*e.g.* luzerne, trèfle, sainfoin). Le nombre d'opérations de travail du sol avant le semis est compris entre 0 et 5 passages. Une classification des dates de semis distingue les semis précoces, tardifs et optimaux en fonction des caractéristiques pédoclimatiques des sous-régions (voir Tab 2.II.2. ci-contre). La quantité totale d'azote appliquée (kg N.m^{-2}) sur chaque parcelle a été calculée en fonction de la dose apportée (kg.m^{-2}) et du taux d'azote des matières organiques apportées défini à partir des références moyennes proposées par la Chambre d'Agriculture de la Drôme (kg N.kg^{-1}) (voir Tab. 2.II.3. ci-contre pour les concentrations des différents types d'azote apportés). La présence ou non d'un apport d'azote tardif en cours de montaison (après le 1^{er} avril) a également été relevée. Enfin, le nombre de désherbages mécaniques après semis est compris entre 0 et 3 passages.

1.2. Facteurs limitants testés

1.2.1. Les caractéristiques de cultivars

La classe de panification, même si ce n'est pas un facteur environnemental, a été testée en tant que facteur limitant car nous avons montré dans le diagnostic sur la teneur en protéines que cette caractéristique avait un fort effet sur la teneur en protéines. De plus, notre réseau compte différentes variétés pour lesquelles la valeur maximale du nombre de grains n'est pas disponible, rendant impossible la transformation du NG en un NG relatif qui permet d'exclure la variété des facteurs à tester (comme suggéré par les travaux de David *et al.* (2005a) et Brancourt-Hulmel *et al.* (1999)). La classe de panification a été exprimée en deux classes : BPS (blé panifiables supérieurs) et BAF (blé améliorants de force). Les blés panifiables

supérieurs ont été sélectionnés pour augmenter le NG alors que les BAF sont choisis par les agriculteurs pour garantir une bonne teneur en protéines.

Le PMG potentiel a également été retenu afin de refléter un éventuel effet de la variété pendant la phase de remplissage des grains.

1.2.2. Stress hydrique

Pour le calcul de cette variable, se reporter à la partie précédente (chapitre 2.I., section 4.3.1. et à l'Annexe I). La variable qui a été testée pour le nombre de grains par m² a été calculée du semis à la floraison tandis que, pour le poids de mille grains, elle a été calculée de la floraison à la récolte.

1.2.3. Quotient photothermique et températures

Le quotient photothermique correspond au rapport entre le rayonnement global moyen journalier et la température moyenne journalière. Fischer (1985) a montré qu'il y avait un fort effet positif de la moyenne du quotient photothermique calculé 30 jours avant floraison sur le NG. C'est pour cette raison que nous avons testé l'effet de cette variable sur le NG.

De plus, le rayonnement global a un effet sur l'accumulation de biomasse et donc potentiellement sur le PMG (Singh et Jenner, 1984). Au-delà d'une certaine température (entre 20 et 30 °C selon les auteurs), la température limite l'accumulation d'azote dans les grains, ce qui peut faire baisser le PMG. Nous avons donc calculé le quotient photothermique pour les 30 jours suivants la floraison et le nombre de jours ayant une température moyenne supérieure à 25°C entre la floraison et la récolte.

1.2.4. Tassement du sol

Sur chaque parcelle, un profil cultural a été réalisé, après floraison, pour établir le niveau de tassement du sol (Gautronneau et Manichon, 1987). Nous avons réparti les parcelles en deux classes : celles avec un état structural favorable (état interne des mottes non compacté et distribution ouverte des mottes) et celles avec un état structural défavorable (état interne des mottes compacté et distribution compactée des mottes). Ce facteur a été testé sur les deux composantes du rendement car un état structural compacté (défavorable) affecte l'implantation et le développement de la culture (Roger-Estrade *et al.*, 2006).

1.2.5. Nutrition azotée du blé

Pour le calcul de l'indice de nutrition azotée (INN), se reporter à la partie précédente (chapitre 2.I., section 4.3.4). D'après Justes *et al.* (1997), un stress azoté a pour effet de limiter le NG. L'effet de l'INN a donc été testé sur le NG.

Tableau 2.II.4. Facteurs limitants testés pour le nombre de grains par m² (NG) et le poids de mille grains (PMG). Une croix (X) exprime le fait que la variable a été testée en tant que facteur limitant.

Facteur limitant	NG	PMG
Classe de panification	X	
PMG potentiel		X
Tassement du sol	X	X
Densité d'adventices à floraison	X	X
INN	X	
Stress hydrique avant floraison	X	
Stress hydrique après floraison		X
Quotient photothermique avant floraison	X	
Quotient photothermique après floraison		X
Maladies foliaires		X
Températures supérieures à 25 °C		X

Tableau 2.II.5. Valeurs moyennes, minimales, maximales et écart-types des facteurs limitants, du rendement et des composantes du rendement (NG et PMG) sur le réseau.

Variable	Valeur minimale	Valeur maximale	Valeur moyenne	Ecart-type
Rendement (t.ha⁻¹)	1.3	7.4	4.2	1.6
NG (grains.m⁻²)	3770	17036	10834	3697
PMG (g)	19.2	58.8	38.5	8.7
INN à floraison	0.2	0.7	0.5	0.1
Densité d'adventices à floraison (plantes.m²)	0	566.9	104.9	107.8
Balance hydrique entre semis et floraison (mm)	-133.4	-2.3	-26.2	25.2
Balance hydrique entre floraison et récolte (mm)	-213	0	-68.4	60.4
Quotient photothermique avant floraison (J.cm⁻².°C⁻¹.jour⁻¹)	0.6	1.6	1.2	0.2
Quotient photothermique après floraison (J.cm⁻².°C⁻¹.jour⁻¹)	0.8	1.4	1.1	0.1
Maladies foliaires (%)	0	90	21.2	22.5
Nombre de jours avec température moyenne supérieure à 25°C	0	12	2.5	3.6

1.2.6. Adventices

La pression en adventices a été représentée par une moyenne du nombre total d'adventices par m² observé à la floraison sur un minimum de quatre placettes de 0,25 m² par parcelle. En effet, la densité d'adventices est connue pour son effet négatif sur le rendement (Cousens, 1985a) et notamment sur le NG (David *et al.*, 2005a).

1.2.7. Maladies foliaires

Ces maladies ayant lieu après floraison (ce qui était confirmé dans nos observations), seul leur effet sur le PMG a été considéré. La pression des maladies foliaires a été estimée par le pourcentage global de surface verte des feuilles attaqué par la septoriose (*Septoria* spp.), la rouille brune (*Puccinia triticina*) et l'oïdium (*Erysiphe graminis*), observé autour du stade grain pâteux. Cette observation a été réalisée sur les deux dernières feuilles de vingt plantes par parcelle.

Les facteurs limitants testés pour le NG et le PMG sont recensés dans le Tab. 2.II.4. ci-contre. Les valeurs moyennes, minimales, maximales et les écart-types des facteurs limitants et des composantes du rendement se trouvent dans le Tab. 2.II.5. ci-contre. On a donc testé six facteurs limitants pour le NG et sept pour le PMG.

1.3. Méthodes statistiques

1.3.1. Identification des facteurs limitants

Pour identifier les facteurs limitants des composantes du rendement, deux méthodes statistiques ont été testées successivement : une méthode « classique » de régression stepwise et une méthode « innovante » de mélange de modèles.

Pour chaque composante du rendement, une régression stepwise, basée sur le critère AIC (« Akaike's Information Criterion », Akaike, 1974) avec une estimation des paramètres associés aux facteurs limitants par la méthode des moindres carrés ordinaires, a été effectuée. Pour chaque facteur limitant sélectionné dans le modèle final, la proportion de variance expliquée par ce facteur a été calculée grâce à la formule suivante :

$$\eta^2 \text{ partiel} = \frac{SS_{\text{facteur}}}{SS_{\text{facteur}} + SS_{\text{erreur}}}$$

avec SS_{facteur} , la variation dépendante du facteur (somme des carrés) et SS_{erreur} , la variation résiduelle.

La méthode de mélange de modèles consiste à ajuster les données aux 2^k modèles linéaires possibles avec k facteurs limitants en tant que variables explicatives. Elle est détaillée dans la

Tableau 2.II.6. Matrice de corrélation des facteurs limitants quantitatifs testés,

	Stress hydrique avant floraison	Stress hydrique après floraison	Températures supérieures à 25 °C	Quotient photothermique avant floraison	Quotient photothermique après floraison	Maladies foliaires	Densité d'adventices à floraison	INN à floraison
Stress hydrique avant floraison	1,00	0,04	0,01	0,02	0,47	0,00	0,01	-0,03
Stress hydrique après floraison	0,04	1,00	-0,40	0,35	0,20	-0,10	0,46	-0,04
Températures supérieures à 25 °C	0,01	-0,40	1,00	0,22	-0,47	-0,05	-0,12	0,00
Quotient photothermique avant floraison	0,02	0,35	0,22	1,00	-0,15	-0,34	0,26	-0,09
Quotient photothermique après floraison	0,47	0,20	-0,47	-0,15	1,00	-0,26	0,05	-0,01
Maladies foliaires	0,00	-0,10	-0,05	-0,34	-0,26	1,00	-0,05	0,20
Densité d'adventices à floraison	0,01	0,46	-0,12	0,26	0,05	-0,05	1,00	-0,30
INN à floraison	-0,03	-0,04	0,00	-0,09	-0,01	0,20	-0,30	1,00

partie précédente (chapitre 2.I, section 4.4.). Dans le cas du NG, on a obtenu $2^6 = 64$ modèles à mélanger, et $2^7 = 128$ modèles dans le cas du PMG.

1.3.2. Identification des pratiques agricoles

En ce qui concerne les pratiques agricoles, seule la méthode de mélange de modèles a été testée (étant donné les bons résultats qu'elle offrait pour l'identification des facteurs limitants). Cependant, nous avons utilisé des modèles linéaires mixtes intégrant l'année en variable aléatoire lorsqu'il y avait un effet année avéré (pour plus de détails sur la méthode, se reporter à la partie précédente (chapitre 2.I., section 4.4.)). Nous avons testé l'année sur les facteurs environnementaux car nous pensions que les conditions climatiques inhérentes à une année pouvaient jouer sur des facteurs tels que le stress hydrique ou les maladies par exemple.

2. Résultats

2.1. Variation du rendement, de ses composantes et des facteurs limitants

Dans le réseau étudié, le rendement varie de 1,3 à 7,4 t.ha⁻¹, le nombre de grains par m² de 3 770 à 17 036 et le poids de mille grains de 19,2 à 58,8 g (Tab. 2.II.5.). Cette large gamme de variation est classique dans le cas du blé biologique (David *et al.*, 2005a) bien qu'elle soit plus étendue que celle du blé conventionnel (Leterme *et al.*, 1994).

Le rendement est fortement corrélé positivement aux valeurs du NG ($r^2 = 0,70$). La corrélation entre rendement et PMG est également positive mais plus faible que celle du NG ($r^2 = 0,35$). Enfin, NG et PMG sont faiblement corrélés entre eux ($r^2 = 0,02$), ce qui suggère que les facteurs limitants de la phase végétative et de la phase de remplissage des grains sont indépendants (Brancourt-Hulmel *et al.*, 1999).

Les gammes de variations observées pour les facteurs limitants sont disponibles dans le Tab. 2.II.5. Pour les interprétations de ces valeurs, se reporter à la section 5.2. de la partie précédente (chapitre 2.I.). La matrice de corrélation des facteurs limitants quantitatifs montre qu'il n'y avait pas de corrélation significative entre les différents facteurs (Tab. 2.II.6.).

2.2. Les facteurs limitants identifiés

Les résultats présentés ici correspondent aux facteurs limitants qui ont été mis en évidence à la fois par la régression stepwise et par la méthode de mélange de modèles (Tab. 2.II.7. ci-contre). Tous les facteurs retenus par la régression stepwise ont une probabilité de présence dans le modèle avec la meilleure AIC ($w_+(x)$) supérieures ou égales à 0,60. Seul le quotient photothermique après floraison fait exception à cette règle.

La classe de panification (BPS) a un effet positif significatif sur le NG. Que ce soit avec la méthode de régression stepwise ou avec le mélange de modèles, c'est le premier facteur expliquant les variations du NG. Le PMG potentiel a un effet positif significatif sur le PMG.

Tableau 2.II.7. Valeurs estimées des paramètres, proportion de variance et $w_+(x)$ (probabilité qu'une variable explicative apparaisse dans le modèle avec la meilleur AIC) pour le nombre de grains par m² (NG) et le poids de mille grains (PMG). Pour une variable donnée, « - » indique que le facteur limitant n'a pas été testé et "NS" indique que le facteur limitant n'a pas été sélectionné par la procédure de régression stepwise.

Facteur limitant	Nombre de grains				Poids de mille grains			
	Régression stepwise		Mélange de modèles		Régression stepwise		Mélange de modèles	
	Valeur estimée du paramètre	Proportion de variance	Valeur estimée du paramètre	$w_+(x)$	Valeur estimée du paramètre	Proportion de variance	Valeur estimée du paramètre	$w_+(x)$
Classe de panification (BPS)	3918,5	0,35	4021,7	1,00	-	-	-	-
PMG potentiel (élevé)	-	-	-	-	9,68	0,11	8,90	0,91
Tassement du sol (défavorable)	NS	NS	-49,6	0,28	NS	NS	-0,28	0,29
Densité d'adventices à floraison	NS	NS	-2,0	0,44	-0,02	0,16	-0,01	0,65
INN à floraison	18801,8	0,33	18190,6	1,00	-	-	-	-
Balance hydrique entre semis et floraison	NS	NS	0,3	0,27	-	-	-	-
Quotient photothermique avant floraison	2512,1	0,08	1676,8	0,60	-	-	-	-
Balance hydrique entre floraison et récolte	-	-	-	-	-0,03	0,12	-0,03	0,65
Quotient photothermique après floraison	-	-	-	-	13,44	0,05	8,58	0,44
Maladies foliaires	-	-	-	-	-0,08	0,05	-0,05	0,62
Nombre de jours avec température > 25°C	-	-	-	-	NS	NS	-0,07	0,33

N.B. La balance hydrique ayant toujours une valeur négative, une augmentation de la valeur de la balance correspond à une augmentation de l'eau disponible et donc à une diminution du stress hydrique.

Le statut azoté de la culture (représenté par l'INN à floraison) a un effet positif significatif sur le NG. La densité d'adventices à la floraison a un effet négatif sur le PMG mais n'a pas d'effet sur le NG. Les maladies foliaires ont un effet négatif sur le PMG. Le quotient photothermique avant floraison a un effet positif sur le NG. Après floraison, le quotient photothermique a un effet positif sur le PMG. Enfin, la balance hydrique après floraison a un effet négatif sur le PMG (Tab. 2.II.7.). Cela signifie que si le stress hydrique diminue, le PMG diminue.

2.3. Les pratiques agricoles et les conditions environnementales responsables des variations des facteurs limitants

Nous avons utilisé des modèles linéaires mixtes pour mettre en évidence les pratiques et les conditions environnementales pour le quotient photothermique avant floraison, la balance hydrique après floraison, les maladies foliaires et les adventices car, pour ces facteurs, il y avait un effet année significatif. En revanche, des modèles linéaires simples ont été utilisés pour le quotient photothermique après floraison et l'INN à floraison.

Les résultats issus de l'utilisation de ces modèles sont disponibles dans le Tab. 2.II.8. pour les facteurs limitants abiotiques (quotients photothermiques avant et après floraison et balance hydrique après floraison). Nous avons montré qu'il y avait un effet de la région sur le quotient photothermique avant floraison et la balance hydrique après floraison. La date de semis a un effet sur le quotient photothermique après floraison et la balance hydrique après floraison. Le type de sol et la précocité de la variété à épiaison jouent sur la balance hydrique après floraison.

Les pratiques et conditions environnementales responsables des variations des facteurs limitants biotiques (INN à floraison, densité d'adventices à floraison et maladies foliaires) mises en évidence sont disponibles dans le Tab. 2.II.9. La date de semis a un effet significatif sur la densité d'adventices à floraison et les maladies foliaires. La région et le type de précédent ont des effets significatifs sur les trois facteurs limitants biotiques. La quantité d'azote apportée, le type de système de production, le nombre d'opérations de travail du sol avant semis et le nombre de désherbage mécanique pendant le cycle ont un effet significatif sur la densité d'adventices à floraison. La classe de panification a un fort effet sur l'INN et les résistances des variétés à la rouille brune et la septoriose jouent sur les maladies foliaires.

2.4. Comparaison des méthodes statistiques utilisées

2.4.1. Comparaison des résultats obtenus : facteurs identifiés et classement de ces facteurs

Pour le NG comme pour le PMG, les signes des paramètres estimés pour chacun des facteurs testés ne varient pas en fonction de la méthode utilisée (Tab.II.7.). Pour le NG, la méthode de régression stepwise a permis de sélectionner trois facteurs parmi les six testés : la classe de panification, l'indice de nutrition azotée (INN) et le quotient photothermique avant floraison.

Tableau 2.II.8. Valeurs estimées des paramètres, proportion de variance et $w_+(x)$ (probabilité qu'une variable explicative apparaisse dans le modèle avec la meilleur AIC) pour les facteurs limitants abiotiques. Pour une variable donnée, « - » indique que la pratique ou la condition environnementale n'a pas été testée.

Pratique ou condition du milieu		Quotient photothermique avant floraison		Quotient photothermique après floraison		Balance hydrique post-floraison	
		Valeur estimée du paramètre	$w_+(x)$	Valeur estimée du paramètre	$w_+(x)$	Valeur estimée du paramètre	$w_+(x)$
Date de semis	Précoce	0.00	0.00	-0.03	0.87	22.46	1.00
	Tardif	0.00	0.00	-0.11	0.87	11.54	1.00
Précocité à épiaison (tardif)		0.00	0.05	-0.02	0.38	-11.44	0.96
Sous-région	Plaine de Lyon	-0.16	0.99	-0.02	0.33	-81.75	1.00
	Plaine de Valence	-0.10	0.99	-0.02	0.33	-104.98	1.00
Sol B						77.35	1.00
Type de sol	Sol C	-	-	-	-	64.85	1.00
	Sol D					-5.13	1.00
Quantité d'azote apportée		-	-	-	-	0.01	0.13

(Tab. 2.II.7.). La classe de panification et l'INN expliquent la plus grande partie de la variance (respectivement 35 et 33 %) tandis que le quotient photothermique explique seulement 8 % de la variance. Les probabilités ($w_+(x)$) obtenues en mélangeant les 64 modèles sont supérieures à 0,60 pour ces trois variables mais inférieures à 0,45 pour les autres. Le classement des facteurs limitants obtenus avec les deux méthodes est donc cohérent.

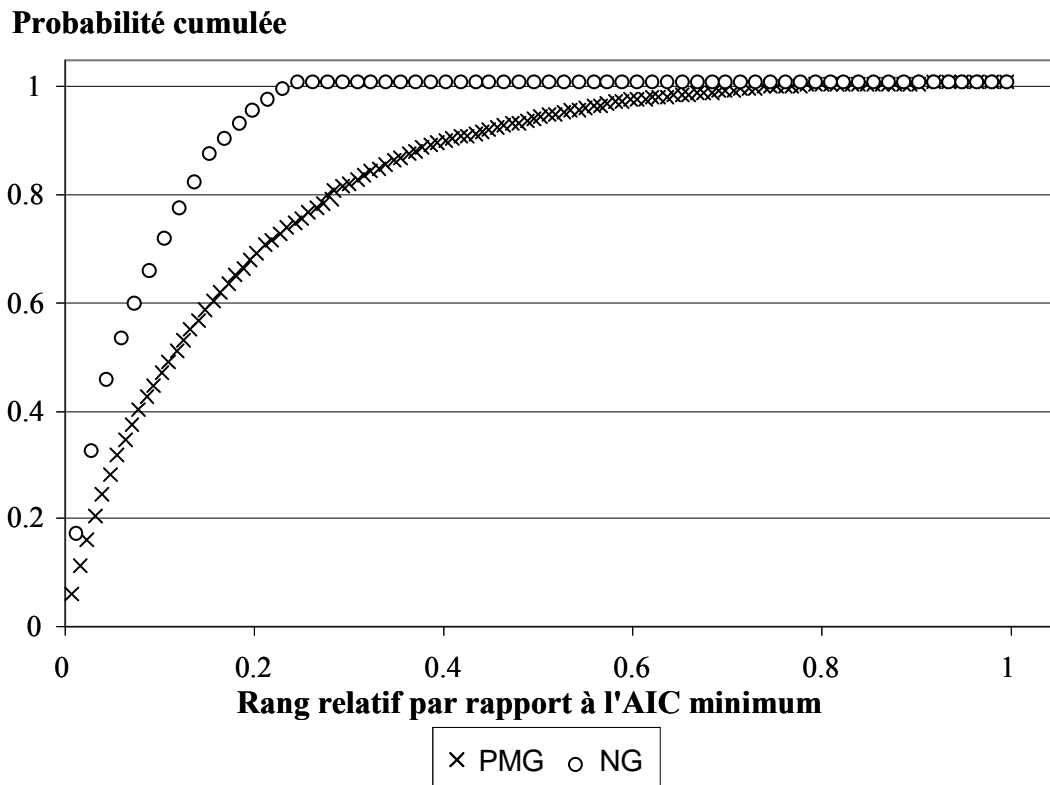
Pour le PMG, la densité à floraison, le PMG potentiel, la balance hydrique post-floraison, le quotient photothermique après floraison et les maladies foliaires ont été sélectionnés par la régression stepwise parmi les sept facteurs testés (Tab. 2.II.7.). Le PMG potentiel, la densité à floraison et la balance hydrique post-floraison expliquent faiblement la variance (proportion de variance entre 12 et 16 %). Le quotient photothermique après floraison et les maladies foliaires expliquent seulement 5 % de la variance chacun. Les probabilités ($w_+(x)$) obtenues en mélangeant les 128 modèles sont supérieures ou égales à 0,62 pour le PMG potentiel, la densité d'adventices, la balance hydrique et les maladies foliaires (Tab. 2.II.7.). Pour les autres variables, ces probabilités sont inférieures à 0,45. Dans ce cas, le quotient photothermique est sélectionné par la régression stepwise alors que la probabilité qu'il se trouve dans le meilleur modèle est de 0,44. Les résultats obtenus avec les deux méthodes ne sont pas tout à fait équivalents. En utilisant la méthode de régression stepwise, on prend le risque de sélectionner une variable qui a moins d'une chance sur deux d'être dans le meilleur modèle.

Pour le NG, les deux méthodes permettent d'obtenir des résultats similaires pour identifier et classer les facteurs limitants (les facteurs sélectionnés par la stepwise sont ceux qui ont plus d'une chance sur deux d'être dans le meilleur modèle) alors que pour le PMG, les deux méthodes ne mènent pas aux mêmes conclusions.

2.4.2. Comparaison des performances des deux méthodes

Nous avons représenté les probabilités cumulées des modèles (64 modèles dans le cas du NG et 128 dans le cas du PMG) en fonction de leur classement par rapport à l'AIC (Fig. 2.II.2.). Le premier modèle du classement est celui qui a l'AIC le plus faible et le dernier celui qui a l'AIC maximal. La probabilité cumulée correspond à la probabilité que le jeu de modèles considérés contienne le meilleur modèle (celui avec l'AIC le plus faible) (Whittingham *et al.*, 2006). Pour le NG, la probabilité cumulée augmente rapidement en fonction du rang du modèle (Fig. 2.II.2.), ce qui signifie qu'il a été facile de sélectionner le meilleur modèle (celui avec l'AIC le plus faible), car les poids des autres modèles sont faibles. Si tous les modèles ont un mauvais AIC, avec un poids associé proche d'un modèle à l'autre, alors un grand nombre d'entre eux vont avoir des poids similaires et faibles (Whittingham *et al.*, 2006). En ce qui concerne le PMG, un grand nombre de modèles ont un poids équivalent et la probabilité cumulée n'augmente pas rapidement quand le rang augmente (Fig. 2.II.2.), ce qui signifie qu'il est plus difficile de sélectionner le meilleur modèle. Ceci explique les différences observées entre les résultats des deux méthodes sur les facteurs limitants identifiés.

Figure 2.II.2. Courbes des probabilités cumulées pour les modèles ajustés au nombre de grains par m² (NG) et au poids de mille grains (PMG). Les courbes montrent les probabilités sommées pour les modèles classés de l'AIC le plus faible à l'AIC le plus grand. Le rang relatif 1 correspond au modèle avec l'AIC le plus élevé.



3. Discussion

3.1. Interprétation des effets des facteurs limitants identifiés

Le statut azoté de la culture (représenté par l'INN à floraison) a un effet positif significatif sur le NG (Tab.2.II.7.). Ce résultat est en accord avec plusieurs travaux réalisés en agriculture conventionnelle et biologique sur des céréales (Justes *et al.*, 1997 ; Le Bail et Meynard, 2003 ; David *et al.*, 2005a). Une augmentation de l'INN, c'est-à-dire du statut azoté de la culture avant floraison, peut donc permettre d'augmenter le rendement en augmentant le NG.

La densité d'adventices à floraison a un effet négatif sur le PMG mais n'a pas d'effet sur le NG (Tab.2.II.7.). Il semble donc que les adventices limitent le rendement pendant la phase de remplissage des grains. Notons que l'effet des adventices est rarement mis en évidence dans les études menées sur des cultures conventionnelles car les infestations sont en général contrôlées par l'utilisation d'herbicides (Le Bail et Meynard, 2003).

Les maladies foliaires ont un effet négatif sur le PMG (Tab.2.II.7.). Ceci s'explique par le fait que les maladies foliaires limitent la surface verte des feuilles, et donc la photosynthèse (Audsley *et al.*, 2005), ce qui induit une baisse de l'accumulation de biomasse dans les grains et donc une diminution du PMG. Cet effet négatif des maladies foliaires, et notamment de *Septoria* spp., a déjà été mis en évidence (Wilkinson *et al.*, 2006). Cependant, la pression en maladies est généralement plus faible dans les systèmes biologiques que dans les systèmes conventionnels (voir chapitre 1, section 1.1.3.), même si la sévérité des attaques dépend des conditions climatiques (Zhang *et al.*, 2006). En effet, dans notre réseau, les niveaux élevés de maladies sont dus aux années climatiques très pluvieuses de 2000 et 2006 uniquement.

Le quotient photothermique avant floraison a un effet positif sur le NG (Tab.2.II.7.). Cet effet avait déjà été mis en évidence par Fischer (1985). Les conditions climatiques avant la floraison sont donc déterminantes pour le rendement. Après floraison, le quotient photothermique a un effet positif sur le PMG (Tab.2.II.7.). Cela s'explique par le fait que des températures inférieures à 25°C pendant la période de remplissage des grains permettent d'éviter l'échaudage des grains. La balance hydrique après floraison a un effet négatif sur le PMG (Tab. 2.II.7.), donc lorsque le stress hydrique diminue, le PMG diminue.

3.2. Interprétation des effets des pratiques et des conditions environnementales identifiées

3.2.1. Effet des pratiques et des conditions environnementales sur les facteurs abiotiques

Les différences climatiques entre sous-régions ont un effet sur le quotient photothermique avant floraison et la balance hydrique (Tab. 2.II.8.). La plaine de Valence et la plaine de Lyon ont un effet négatif sur ces deux variables qui s'expliquent par le fait que ces deux sous-

Tableau 2.II.9. Valeurs estimées des paramètres, proportion de variance et $w_+(x)$ (probabilité qu'une variable explicative apparaisse dans le modèle avec la meilleur AIC) pour les facteurs limitants biotiques. Pour une variable donnée, « - » indique que la pratique ou la condition environnementale n'a pas été testée.

Pratique ou condition du milieu		INN		Maladies foliaires		Densité d'adventices	
		Valeur estimée du paramètre	$w_+(x)$	Valeur estimée du paramètre	$w_+(x)$	Valeur estimée du paramètre	$w_+(x)$
Date de semis	Précoce	-	-	-2.03	1.00	20.60	1.00
	Tardif	-	-	10.98	1.00	48.76	1.00
Sous-région	Plaine de Lyon	0.05	0.65	23.04	1.00	12.52	1.00
	Plaine de Valence	0.06	0.65	18.32	1.00	-7.12	1.00
Quantité d'azote apportée		0.00	0.30	-	-	0.40	0.84
Culture précédente	Culture d'hiver	-0.07	0.79	6.24	0.99	-50.76	1.00
	Culture de printemps	-0.09	0.79	-2.53	0.99	-58.08	1.00
Classe de panification (BPS)		-0.04	0.64	-	-	-	-
Apport tardif (présence)		0.02	0.39	-	-	-	-
Résistance à la rouille brune		-	-	-0.84	0.66	-	-
Résistance à la septoriose		-	-	0.32	0.71	-	-
Système de production	Type 2	-	-	-	-	12.10	1.00
	Type 3	-	-	-	-	160.28	1.00
Nombre d'opérations de travail du sol avant semis		-	-	-	-	21.03	0.97
Nombre de désherbages mécaniques		-	-	-	-	-1.68	0.93

régions sont plus sèches et plus chaudes que le Diois tout au long du cycle (voir partie précédente, Tab. 2.I.1.).

Un semis tardif retarde la date de floraison et augmente le nombre de jours potentiels pendant lesquels la température est élevée avant ce stade. Le quotient photothermique étant un ratio du rayonnement sur les températures, cela explique l'effet négatif des semis tardifs sur cette variable (Tab. 2.II.8.). Un semis précoce, au contraire, avance la date de floraison et la période de remplissage des grains, permettant d'éviter des périodes de stress hydrique. Ceci explique l'effet positif des semis précoces sur la balance hydrique (Tab. 2.II.8.). De même, la balance hydrique est diminuée par la précocité à épiaison. Enfin, la balance hydrique est plus importante dans les sols B (sols profonds de type limono-argileux ou argilo-sableux) et C (sols limoneux profonds et calcaires) par rapport au sol D (sols à dominante argileuse sur cailloux calcaires) (Tab. 2.II.8.). Cela s'explique par le fait que les sols B et C ont une plus grande réserve hydrique de ces sols.

3.2.2. Effet des pratiques et des conditions environnementales sur les facteurs biotiques

Les dommages liés aux maladies sur la culture ont été augmentés par une date de semis tardif et diminués par une date précoce (Tab. 2.II.9.). En effet, une date de semis tardive retarde le développement de la culture, qui se trouve alors à un stade plus précoce au moment des attaques et se retrouve exposée plus longtemps à la pression de maladies. De plus, un semis précoce a eu un effet positif sur la densité d'adventices, ce qui est en accord avec les travaux de Rasmussen (2004) qui a montré un effet positif du semis précoce sur la biomasse d'adventices. Un semis tardif augmente aussi la densité de mauvaises herbes (Tab. 2.II.9.), ce qui peut s'expliquer par une émergence de la culture plus lente induisant une plus faible compétitivité du blé vis-à-vis de la population d'adventices (Bond et Grundy, 2001).

Les précédents légumineuses fourragères (*e.g.* luzerne, sainfoin, trèfle) ont permis d'atteindre des valeurs plus élevées d'INN pour la culture de blé (Tab. 2.II.9.). Ces cultures, grâce à leurs résidus plus riches en azote, permettent de rendre disponible plus d'azote pour la culture suivante. Les maladies foliaires sont plus importantes lorsque les précédents sont des cultures d'hiver (succession blé sur blé par exemple) alors que la pression est moindre dans le cas d'un précédent culture de printemps (maïs ou tournesol par exemple) (Tab. 2.II.9.). L'alternance de cultures d'hiver et de printemps permet en effet de diminuer la pression en maladies (Cooper *et al.*, 2006). Les précédents cultures de printemps permettent de diminuer la pression en adventices par rapport aux précédents légumineuses notamment grâce à une forte efficacité du binage (Tab. 2.II.9.). Par ailleurs, ce résultat est cohérent avec des résultats antérieurs, montrant qu'alterner les cultures d'hiver et de printemps permet d'éviter l'établissement d'une flore spécialisée, de maintenir des densités d'adventices faibles pour chaque espèce et de diversifier les types de travail du sol (Bàrberi et Bonari, 1995).

Les systèmes de production de type 3 (systèmes céréaliers extensifs) ont un effet positif sur la densité d'adventices (Tab. 2.II.9.) car ce sont des systèmes extensifs pour lesquels la population d'adventices est moins contrôlée.

La pression en maladies est plus importante dans la plaine de Lyon et dans la plaine de Valence (Tab. 2.II.9.), probablement en raison de conditions climatiques plus favorables aux maladies dans ces sous-régions (Tab. 2.I.1.). De plus, dans ces zones, on retrouve la fréquence la plus élevée de systèmes céréaliers intensifs (type 2, plus de 70 % des parcelles étudiées dans ces zones), qui conduisent à une augmentation de la densité des parcelles avec des céréales dans le paysage, favorable à un développement des épidémies. Les sous-régions semblent également avoir un effet sur la densité en adventices (Tab. 2.II.9.). L'effet positif de la plaine de Lyon est peut-être dû au fait que toutes les parcelles sélectionnées dans cette zone sont issues de systèmes de production de type 2 ou 3 (céréaliers intensifs ou extensifs), qui eux-mêmes ont un effet positif sur la densité d'adventices. L'effet négatif de la plaine de Valence sur la densité des adventices peut être attribué aux nombreux précédents cultures de printemps et d'hiver dans cette zone dont on a vu l'effet négatif sur la densité d'adventices.

Les cultivars BPS ont des valeurs d'INN à floraison plus faibles que les cultivars BAF (Tab. 2.II.9.). Dans notre réseau, l'INN ne dépend pas étroitement de la quantité d'azote apportée ($w_+(x) = 0.30$), ni de la présence d'un apport tardif ($w_+(x) = 0.39$). Cela s'explique par la grande variabilité de l'efficacité des apports azotés organiques, dont la minéralisation est lente et demande une disponibilité en eau optimale (Dawson *et al.*, 2008), ce qui n'est pas toujours le cas dans la région d'étude.

Les cultivars les plus résistants à la rouille brune conduisent à limiter la présence de maladies foliaires (Tab. 2.II.9.). Ces résultats mettent en évidence l'intérêt d'utiliser des cultivars résistants à la rouille brune (Mercer, 2006) qui est une des principales maladies présentes dans la région d'après nos observations.

L'augmentation de la quantité d'azote apportée a favorisé l'augmentation de la densité d'adventices (Tab. 2.II.9.). Néanmoins, des études antérieures ont montré que l'effet de l'azote sur les adventices est dépendant des espèces présentes (Zoschke et Quadranti, 2002), le résultat obtenu ici est peut-être très dépendant de la composition floristique observée sur les parcelles. Notons que la densité d'adventices est très peu diminuée par les désherbages mécaniques (-1.68 plantes/m²/passage). De plus, la densité d'adventices observée à floraison augmente lorsque le nombre d'opérations de travail du sol avant semis augmente (Tab. 2.II.9.). Les opérations de travail du sol, et y compris les faux-semis, n'ont pas eu ici un effet limitant sur la population d'adventices contrairement à ce que l'on pouvait attendre. Cela suggère que ces opérations ont peut-être été effectuées à des moments inappropriés, les rendant inefficaces, ou lorsque la pression en adventices était déjà trop forte et donc difficile à maîtriser.

Tableau 2.II.10. Critère d'information d'Akaike (AIC), coefficient de corrélation (r^2), Root Mean Squared Error relative (RRMSE), and poids-AIC (i.e. probabilité que parmi tous les modèles possibles, le modèle sélectionné par la régression stepwise soit celui qui a le plus petit AIC) obtenus avec la régression stepwise et le mélange de modèles. « - » indique que le critère n'est pas disponible pour la méthode de mélange de modèles.

Variable	Méthode	Critère			
		AIC	r^2	RRMSE	Poids-AIC
NG	Régression stepwise	953.54	0.527	23.20 %	0.163
	Mélange de modèles	-	0.534	23.10 %	-
PMG	Régression stepwise	356.22	0.356	18.00 %	0.060
	Mélange de modèles	-	0.355	18.20 %	-

3.3. Comparaison des méthodes statistiques

Lorsqu'on s'intéresse aux qualités prédictives des deux modèles (Tab. 2.II.10.), on remarque que la méthode de mélange de modèles permet d'augmenter le coefficient de corrélation (r^2) et de diminuer la RMSE relative³ (RRMSE) du modèle par rapport à la méthode de régression stepwise, dans le cas du NG (Tab. 2.II.10.). En revanche, dans le cas du PMG, la méthode de mélange de modèles diminue légèrement le r^2 et augmente légèrement la RRMSE (Tab. 2.II.10.). La qualité prédictive des modèles obtenus n'est donc pas très différente d'une méthode à l'autre. Cependant, dans le cas du PMG, une variable a été sélectionnée par la régression stepwise alors que sa probabilité associée ($w_+(x)$) était inférieure à 0,5. Ceci implique que l'utilisation de la régression stepwise peut amener à sélectionner des variables qui en fait ne sont pas déterminantes pour expliquer la variable d'intérêt. En effet, Yang (2003) a montré qu'il était plus intéressant d'utiliser des méthodes de mélange de modèles dans les cas où il existe un certain niveau d'incertitude pour choisir le meilleur modèle, c'est-à-dire dans les cas où tous les poids des modèles sont bas et similaires (comme dans le cas du PMG).

On peut donc conclure ici qu'il est plus prudent d'utiliser des méthodes de mélange de modèles que les méthodes de régression stepwise pour identifier et classer les facteurs limitants des composantes du rendement. En effet, avec cette méthode, on n'élimine aucun facteur et on obtient un classement complet des facteurs limitants testés alors qu'avec la régression stepwise, seuls les facteurs les plus importants sont retenus, avec le risque de les sélectionner par erreur.

De plus, Prost *et al.* (2008) ont montré que les résultats obtenus avec une méthode de sélection stepwise basée sur l'AIC n'étaient pas robustes et que les variables sélectionnées sont sensibles à la base de données utilisée. Pour cela, ils ont comparé des méthodes de sélection par stepwise et de mélanges de modèles (Bayesian Model Averaging) pour mettre en évidence les facteurs expliquant des pertes de rendement. A cet effet, ils ont eu recours à une méthode de ré-échantillonnage (bootstrap⁴) qui permet d'établir les fréquences de sélection des variables. Ces travaux ont montré qu'avec une méthode de sélection stepwise basée sur l'AIC, les fréquences de sélection prennent des valeurs intermédiaires, c'est-à-dire que les variables ne sont pas systématiquement sélectionnées ou non sélectionnées quelque soit la

3 RRMSE : Relative Root Mean Squared Error. Cela correspond à la RMSE divisée par l'écart-type des observations, ce critère rend compte de la qualité prédictive du modèle, plus il est faible, meilleure est la prédiction du modèle. Soit I le nombre d'observations, O_i la valeur observée à la $i^{\text{ème}}$ observation et P_i la valeur prédite correspondante :

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{I} \sum_{i=1}^I (O_i - P_i)^2}$$

⁴ **Bootstrap :** méthode permettant d'étudier l'instabilité des résultats pour des méthodes de sélection. Le principe est de générer un grand nombre de nouvelles bases de données à partir de la base de données initiale par tirage aléatoire avec remise (Efron et Tibshirani, 1993).

Tableau 2.II.11. Comparaison des facteurs limitants testés et sélectionnés pour **(a)** le nombre de grains par m² (NG) et **(b)** le poids de mille grains (PMG) par une méthode de sélection stepwise (David et al., 2005a) et par une méthode de mélange de modèles (les facteurs considérés comme sélectionnés sont ceux pour lesquels $w_+(x) \geq 0.60$).

(a) NG

Facteurs limitants	Sélection stepwise		Mélange de modèles	
	testés	sélectionnés	testés	sélectionnés
Classe de panification			X	X
Densité d'adventices	X	X	X	
INN	X	X	X	X
Quotient photothermique	X		X	X
Sous-région	X			
Stress hydrique	X		X	
Tassement du sol	X		X	

(b) PMG

Facteurs limitants	Sélection stepwise		Mélange de modèles	
	testés	sélectionnés	testés	sélectionnés
Densité d'adventices	X		X	X
Hautes températures	X	X	X	
INN	X			
Maladies foliaires	X		X	X
PMG potentiel			X	X
Quotient photothermique			X	
Somme de températures de floraison à récolte	X	X		
Sous-région	X	X		
Stress hydrique	X		X	X
Tassement du sol	X	X	X	

base de données. Ce résultat renforce l'idée que les méthodes de mélange de modèles sont plus adaptées que des méthodes de sélection pour la mise en évidence de facteurs limitants.

3.4. Comparaison avec les résultats obtenus dans le diagnostic précédent

David *et al.* (2005a) ont réalisé un diagnostic agronomique sur les composantes du blé biologique en région Rhône-Alpes. Leur réseau comptait au total 24 parcelles suivies entre 1994 et 1996. Une partie de ces parcelles a été intégrée à la base de données qui a servi aux diagnostics sur la teneur en protéines et le rendement. Pour mettre en évidence un éventuel effet de la base de donnée sur les résultats obtenus, il faudrait comparer les résultats obtenus par la régression stepwise dans les deux diagnostics. Cependant, les variables à expliquer, les facteurs testés et les critères utilisés pour la sélection stepwise sont différents entre les deux diagnostics, limitant ainsi la possibilité d'évaluer cet effet base de données. En effet, dans le diagnostic de David *et al.* (2005a), ce sont les NG et PMG relatifs et non absolus qui sont étudiés, pour prendre en compte l'existence de variétés différentes dans le réseau. Dans notre diagnostic, en l'absence de données suffisantes sur les cultivars semés, nous avons choisi de caractériser les variétés par les variables PMG potentiel et classe de panification en espérant capter à l'aide de ces variables la variabilité des composantes du rendement due aux cultivars. Comme nous avons montré l'intérêt des méthodes de mélange de modèles par rapport aux méthodes de sélection, nous comparerons les résultats obtenus avec la méthode de mélange de modèles à ceux obtenus par David *et al.* (2005a) avec une méthode de sélection stepwise (Tab. 2.II.11.).

Les facteurs limitants identifiés dans les deux diagnostics étant sensiblement différents, nous ne nous attarderons pas ici à comparer les résultats obtenus pour les pratiques agricoles et les conditions environnementales. De plus, dans le diagnostic réalisé en 2005, les pratiques et conditions environnementales ont été identifiées à l'aide d'une méthode d'analyse de variance, que nous n'avons pas testée dans notre diagnostic et qui est très éloignée de la méthode de mélange de modèles linéaires mixtes que nous avons appliquée.

3.4.1. Cas du nombre de grains par m² (NG)

Dans le cas du NG, le diagnostic de 2005 identifie l'INN et les adventices comme facteurs limitants alors que dans notre diagnostic les facteurs limitants sont l'INN, la classe de panification et le quotient photothermique avant floraison (Tab. 2.II.11.a.). Le statut azoté de la culture est donc un facteur limitant indéniable du NG, classé à chaque fois comme le plus important, quelles que soient la base de données et les variables testées. De même, avec les deux méthodes, le stress hydrique et le tassement semblent avoir peu ou pas d'influence sur le NG. Pour ce qui est des autres facteurs, il est plus difficile de conclure. Notons cependant que la densité d'adventices, même si elle n'est pas dans les facteurs les plus importants mis en évidence par la méthode de mélange de modèles, a un $w_+(x)$ égal à 0,44, ce qui peut expliquer le fait qu'elle soit ressortie dans le diagnostic de 2005. L'effet des adventices sur le NG et

donc potentiellement sur le rendement ne doit donc pas être négligé et mérite d'être plus largement étudié (voir chapitre 3). Il faut également souligner que les facteurs testés n'étant pas les mêmes d'un diagnostic à l'autre, cela peut également expliquer les différences de résultats observés. Le fait que le quotient photothermique soit ressorti dans le diagnostic de 2008 peut s'expliquer par le fait qu'une plus large gamme a été observée grâce à un plus grand nombre d'années étudiées.

3.4.2. Cas du poids de mille grains (PMG)

Dans le cas du PMG, les résultats obtenus avec les deux méthodes sont complètement différents (Tab. 2.II.11.b.). En effet, le diagnostic de 2005 met en évidence les températures (somme de températures de floraison à récolte et nombre de jours avec une température moyenne supérieure à 25°C), la sous-région, et le tassement du sol. Dans notre diagnostic, c'est le PMG potentiel, le stress hydrique, les adventices et les maladies qui sont mis en évidence. Dans ce cas, il semble que les résultats obtenus soient très dépendants de la méthode utilisée et/ou de la base de données. Notons également que les facteurs testés dans les deux cas d'études ne sont pas exactement identiques, ce qui rend difficile l'interprétation des résultats. La taille de la base de données utilisée dans le diagnostic de 2005 par rapport au nombre de parcelles suivies (8 facteurs testés pour 24 parcelles) laisse craindre que les résultats obtenus ne soient pas très robustes.

Le tassement du sol notamment ne ressort pas du tout dans notre diagnostic ($w_+(x) = 0,29$) alors qu'il ressort dans le diagnostic de 2005. Cela s'explique peut-être par le fait que dans notre base de données, les situations favorables étaient majoritaires (75 % des parcelles) alors que dans celle du diagnostic précédent, les situations non favorables étaient majoritaires (David *et al.*, 2005a). Ceci renforce l'idée que les résultats obtenus dans un diagnostic agronomique sont très dépendants de la base de données utilisée. Des bases de données élargies ont plus de chances de représenter des situations pédo-climatiques contrastées.

Globalement, pour les composantes du rendement étudiées, le seul facteur qui ressort dans les deux diagnostics est le statut azoté de la culture pour le NG. Pour les autres facteurs testés, les résultats diffèrent d'un diagnostic à l'autre, renforçant l'idée que les résultats obtenus dans un diagnostic sont très dépendants de la base de données et de la méthode utilisée

Tableau 2.III.1. Facteurs limitants identifiés pour la teneur en protéines et les composantes du rendement (nombre de grains par m² (NG) et poids de mille grains (PMG)) à l'aide de la méthode de mélange de modèles. Pour une variable donnée, « - » indique que le facteur limitant a eu un effet négatif sur la variable considérée et « + » indique qu'il a eu un effet positif.

Facteur limitant	Teneur en protéines	NG	PMG
Classe de panification (BPS)	—	+	
PMG potentiel (élevé)			+
Densité d'adventices à floraison	+		—
INN à floraison	+	+	
Quotient photothermique avant floraison		+	
Quotient photothermique après floraison	—		
Balance hydrique après floraison	+		—
Maladies foliaires			—
Nombre de jours avec température > 25°C	—		

N.B. La balance hydrique ayant toujours une valeur négative, une augmentation de la valeur de la balance correspond à une augmentation de l'eau disponible et donc à une diminution du stress hydrique.

III - Mise en regard des résultats obtenus sur le rendement et la teneur en protéines

L'objectif ici est de croiser les résultats obtenus pour les composantes du rendement et la teneur en protéines afin d'identifier les facteurs limitants responsables des variations des performances du blé biologique et les pratiques qui permettent d'améliorer les performances de la culture. Pour les composantes du rendement, on retiendra ici les résultats obtenus avec la méthode de mélange de modèles dans le cadre de notre diagnostic car (i) il y a alors une homogénéité des méthodes utilisées entre la première et la seconde étape du diagnostic, (ii) la méthode est *a priori* plus robuste qu'une simple analyse de variance et (iii) la base de données utilisée est plus importante.

1. Les facteurs limitants des performances du blé biologique

Les facteurs limitants mis en évidence pour la teneur en protéines et les composantes du rendement sont disponibles dans le Tab. 2.III.1. ci-contre.

Les facteurs les plus importants, que soit pour le rendement et la teneur en protéines sont la classe de panification et l'INN à floraison. Cela confirme que le statut azoté de la culture est un élément clé pour la bonne conduite du blé biologique. Une amélioration des performances (tant du rendement que de la teneur en protéines) passe donc par une bonne gestion de la fertilisation azotée du blé. La densité d'adventices a un effet négatif sur le PMG, et joue de manière positive sur la teneur en protéines. Il existe peut-être un effet de concentration : les adventices limitent le PMG, ce qui, en retour, fait augmenter la teneur en protéines. Le quotient photothermique avant floraison a un effet positif sur le NG, et après floraison limite la teneur en protéines. La balance hydrique après floraison, joue à la fois sur le PMG et la teneur en protéines. Les maladies limitent le PMG et les températures élevées limitent la teneur en protéines. Nous remarquons donc que seuls trois facteurs jouent à la fois sur le rendement et la teneur en protéines du blé biologique (Tab. 2.III.1.) : la classe de panification, l'INN à floraison et le déficit hydrique après floraison. Cela implique que pour arriver à optimiser les performances du blé biologique, il faut prendre un compte un grand nombre de facteurs limitants.

2. Les pratiques à préconiser pour une amélioration des performances du blé biologique

Les résultats obtenus à l'aide des deux diagnostics pour les pratiques sont repris dans le Tab. 2.III.2.

En ce qui concerne la variété semée, en fonction de l'objectif, la variété sera différente : pour obtenir des rendements élevés en quantité, une variété BPS permet d'augmenter le NG et donc le rendement. Néanmoins, la qualité, exprimée par une teneur en protéines élevée, est un des objectifs majeurs des agriculteurs de notre réseau, qui conditionne la commercialisation des grains. Afin d'atteindre cet objectif, il est alors plus intéressant de semer une variété BAF

Tableau 2.III.2. Croisement des résultats obtenus sur le nombre de grains par m² (NG), le poids de mille grains (PMG) et la teneur en protéines (TP) pour la préconisation de pratiques permettant d'améliorer les performances du blé biologique.

Pratique	NG	PMG	TP
Classe de panification	Effet positif des BPS		Effet positif des BAF
Variété semée	PMG potentiel	Effet positif des PMG potentiel élevés	
	Résistance aux maladies	Effet positif des variétés résistantes à la rouille	
Précédent	Effet positif des légumineuses fourragères	Eviter les légumineuses fourragères et les cultures d'hiver	Effet positif des légumineuses fourragères
Date de semis		Effet positif des semis à date optimale Eviter les semis tardifs	Eviter les semis à date optimale et les semis tardifs
Système		Effet positif des systèmes de production de type 1	

(Florence Aurore, Lona ou Renan, voir Tab. 2.II.2.). Si l'on veut combiner cela à un PMG potentiel élevé, on peut alors choisir Florence Aurore et Renan. Néanmoins, les variétés résistantes à la rouille brune permettent d'augmenter le PMG en limitant l'attaque des maladies et ces deux variétés sont soit moyennement résistantes (Florence Aurore), soit peu utilisées (Renan). Il nous semble donc plus intéressant de conseiller de semer la variété Lona car (i) elle est plus largement utilisée, (ii) elle est de type BAF et (iii) elle est résistante à la rouille brune.

Les précédents légumineuses fourragères ont un effet bénéfique pour le NG et la teneur en protéines, car ils permettent d'augmenter l'INN (Tab. 2.II.9.). Néanmoins, ils sont à éviter lorsque l'on veut augmenter le PMG car ils ne permettent pas de limiter la densité d'adventices qui a un effet négatif sur le PMG (Tab. 2.II.7. et 2.II.9.). Cependant, les précédents légumineuses nous semblent globalement favorables à l'amélioration des performances du blé biologique par rapport aux autres précédents.

Pour les dates de semis, ce qui ressort du croisement des résultats est qu'il faut éviter les semis tardifs qui nuisent à la fois au PMG et à la teneur en protéines. Et, contrairement aux idées répandues, ils ne sont pas plus favorables à la baisse de la densité des adventices (Tab. 2.II.9.).

Enfin, les systèmes mixtes avec un élevage sur l'exploitation ou à proximité (type 1), permettent de favoriser le remplissage des grains et donc le PMG. De manière générale, ce sont des systèmes qui permettent une gestion intégrée de l'exploitation, avec une part importante de légumineuses fourragères et des matières azotées disponibles. Il nous semble donc important de souligner l'intérêt de ce type de systèmes pour améliorer les conditions de nutrition azotée du blé tout en assurant un meilleur contrôle des adventices que les autres systèmes (Tab. 2.II.7.).

Pour résumer, cette confrontation des deux diagnostics nous permet de conclure que les variétés telles que Lona sont à recommander, que l'introduction ou le maintien des légumineuses fourragères dans la rotation est à conseiller et qu'il faut éviter de semer le blé trop tardivement.

Conclusion

Les facteurs limitants majeurs des performances du blé biologique sont le statut azoté de la culture et la classe de panification des variétés. Ces deux facteurs ont déjà été largement étudiés dans la littérature. De plus, le modèle AZODYN-ORG permet d'évaluer et de classer des stratégies de fertilisation azotée afin d'améliorer le statut azoté de la culture et donc les performances du blé biologique. Les facteurs climatiques tels que le quotient photothermique et les températures ne sont pas maîtrisables mais le stress hydrique peut être limité en ayant recours à des pratiques d'irrigation. Néanmoins, l'irrigation des céréales reste rare dans les systèmes biologiques de la région Rhône-Alpes. Les maladies sont peu maîtrisables par des méthodes curatives en agriculture biologique. De plus, il est vraisemblable que le fait que les maladies soient apparues comme un facteur limitant dans notre réseau soit très lié à une année climatique particulière, la pression en maladies en agriculture biologique restant limitée.

Les adventices sont un des facteurs limitants majeurs du PMG et ont montré un effet positif sur la teneur en protéines. Une densité élevée semble donc être liée à la fois à une diminution du PMG et une augmentation de la teneur en protéines. Dans notre diagnostic, nous n'avons pas montré que les adventices étaient un des facteurs limitants majeurs du NG, contrairement à ce qu'avaient montré David et al. (2005a), mais la probabilité associée était de 0,44, ce qui laisse penser que les adventices ont un effet non négligeable également sur le NG. Une meilleure maîtrise des adventices sur les parcelles de blé biologique semblerait permettre d'améliorer les performances du blé. De plus, les adventices sont souvent citées dans la littérature et par les agriculteurs comme un des problèmes majeurs dans les cultures biologiques et leurs effets sur la teneur en protéines notamment sont mal connus. Il serait donc intéressant de quantifier l'effet des adventices sur les performances du blé biologique et d'évaluer l'efficacité des moyens de lutte existants afin d'améliorer, à terme, les performances du blé biologique.

CHAPITRE 3

**Estimation des distributions du rendement,
de la teneur en protéines et de la densité
d'adventices en blé biologique à l'aide
d'un indicateur précoce de la
compétition des adventices**

Chapitre 3.

Estimation des distributions du rendement, de la teneur en protéines et de la densité d'adventices en blé biologique à l'aide d'un indicateur précoce de la compétition des adventices

L'objectif de ce chapitre est, d'une part, de prédire l'effet d'une population plurispécifique d'adventices sur les performances du blé biologique et, d'autre part, de prédire l'évolution de la population des adventices au cours du cycle de la culture afin d'évaluer les risques d'augmentation du stock semencier. Les parcelles agricoles conduites en agriculture biologique étant soumises à de nombreux facteurs limitants, il serait inapproprié d'essayer d'avoir une prédiction unique du rendement, de la teneur en protéines et de la densité d'adventices à floraison à partir d'une population d'adventices donnée, compte tenu de la variabilité des situations rencontrées. Il est plus adapté de prédire des distributions de ces variables d'intérêt, qui prennent en compte l'influence plus ou moins forte des autres facteurs limitants fréquemment observés dans ce type de parcelles, comme on l'a vu dans le diagnostic. Ce chapitre fait donc écho à la deuxième question de recherche formulée dans le chapitre de problématique (Chapitre 1, section 4.1.). Pour atteindre cet objectif, 382 placettes de 0.25 m² ont été suivies sur 26 parcelles agricoles localisées en région Rhône-Alpes au cours des années 2006 et 2007. Une méthode de régression quantile a été utilisée afin de prédire les distributions du rendement, de la teneur en protéines et de la densité d'adventices à floraison à l'aide d'indicateurs précoces de la quantité (densité) ou de la diversité (indice de Shannon) des adventices. Ce chapitre correspond à une publication en révision pour une soumission au journal « Weed Research ».

Estimation of yield, grain protein content and late weed density distributions from early weed measurement in organic winter wheat

Marion Casagrande*, Christophe David‡, Muriel Valantin-Morison*, David Makowski* and Marie-Hélène Jeuffroy*

* INRA, UMR211 INRA AgroParisTech, F-78850 Thiverval-Grignon, France

‡ ISARA-Lyon, 23 Rue Jean Baldassini, F-69364 Lyon cedex 07, France

1. Résumé / Abstract

1.1. Résumé

En agriculture biologique, les adventices constituent un des problèmes majeurs, limitant le rendement et l'efficacité des apports azotés. Cette étude a été menée afin de prédire la distribution du rendement et de la teneur en protéines du blé biologique, mais aussi la distribution d'une densité d'adventices tardive (considérée comme un indicateur du stock semencier d'adventices), en utilisant un indicateur mesuré précocement dans le cycle de la culture. Utilisant une méthode statistique de régression quantile, cette étude a montré que la densité précoce d'adventices permettait de bien prédire la distribution de densité d'adventices à floraison et la distribution du rendement. Cependant, cet indicateur n'a pas permis de bien prédire la distribution de la teneur en protéines, qui, en revanche, a été partiellement expliquée par l'indice de Shannon. Le désherbage mécanique permet de réduire la densité d'adventices durant le cycle où il est effectué, limitant ainsi le stock semencier et les dommages potentiels pour les années suivantes. Néanmoins, il ne modifie pas la relation entre la densité d'adventices et le rendement de l'année où il est réalisé. L'intérêt du désherbage mécanique est donc de gérer la population d'adventices à long terme et non pas d'éviter les effets sur le rendement l'année où il est réalisé. Utiliser une densité précoce d'adventices pour prédire les distributions de la densité d'adventices à floraison et du rendement peut permettre d'améliorer les prises de décision relatives à la fertilisation de printemps et au contrôle des adventices.

1.2. Abstract

In organic farming, weeds are one of the most serious threats, limiting crop yield and the use efficiency of organic fertilizers. This study was aimed at predicting the distribution of both yield and grain protein content in organic winter wheat, as well as the distribution of late weed density (an indicator of the weed seed bank), using an indicator measured early in the crop cycle. Using the quantile regression statistical method, this study showed early weed density was a good predictor of weed density distribution at flowering stage, and of yield distribution, but not of grain protein content distribution, which was partly explained by the Shannon index. Mechanical weed control reduced weed density the year it was carried out, thus limiting the weed seed bank and, in turn, potential crop damage the following years. However, it did not affect the relationship between early weed density and the first year's yield, so it did not fit the objective of limiting crop yield damage the year it was carried out, but did achieve that goal in the following years. Using early weed density to predict late weed density and yield distributions can therefore help improve decision-making for spring fertilisation and weed-control strategies.

2. Keywords

Weeds; weed density; organic winter wheat; mechanical weed control; Shannon index; yield; grain protein content; quantile regression

3. Introduction

Weeds are one of the most serious threats to organic crop production (Bàrberi, 2002; Rasmussen, 2004; Albrecht, 2005; David *et al.*, 2005a). In organic farming systems, quantity (biomass and density) and diversity in total weed vegetation and weed seed number are higher than in conventional agriculture (Hald, 1999; Bond and Grundy, 2001; Menalled *et al.*, 2001; Albrecht, 2005; Roschewitz *et al.*, 2005). Preventive control (*e.g.* diversification of the crop sequence, use of cover crop or soil tillage management) and tactical short-term control (harrowing, hoeing or flaming) can be used and combined to control weed population (Bàrberi, 2002).

Weed infestation in a given year has two types of injurious effect (Caussanel, 1989): (i) a short-term effect, during the crop cycle, on yield or grain quality, and (ii) a long-term effect due to an increase in the weed seed bank and thus an increase of the density during the following years.

An early prediction of weed effects on organic wheat would enable the optimisation of weed management strategies and, also, the adjustment of nitrogen fertilizer application to the level of weed infestation. Optimizing nitrogen fertilization is crucial to improving organic wheat yield and grain protein content (David *et al.*, 2005a). Predicting the effect of weeds on cereal yield at an early stage would allow farmers and their advisers to estimate target yield values that would take into account potential weed injury, in order to adjust their fertilization management strategies by using the balance sheet method (Stanford, 1973; COMIFER, 1996; Lory and Scharf, 2003). Previous studies have found the effect of weeds on grain protein content of conventional winter wheat to be negative (Mason and Madin, 1996; Awan *et al.*, 2001), positive or non-existent (Mason and Madin, 1996).

Omitting weed control during a crop cycle not only reduces crop yield and crop quality, but also leads to seed production, which can result in future reduction of crop performance (Wallinga and van Oijen, 1997). Seed production is positively linked to the density observed a given year (Albrecht *et al.*, 2005). An early prediction of weed density would help farmers and farmers' advisers to evaluate the interest of mechanical weed control for maintaining a low weed infestation in the long term.

During the past decades, numerous studies predicting the effect of weeds on yield have been conducted, whereas the effects on cereal quality have been very less studied. For instance, Dew (1972) has described the relationship between cereal yield and *Avena fatua* L. density. Later, diverse models linking yield to weed density or to relative weed leaf area of a single weed species were fitted using hyperbolic or sigmoidal functions (Cousens, 1985a; Spitters *et al.*, 1989; Ngouajio *et al.*, 1999).

These studies were conducted in experimental trials where limiting factors other than weeds were controlled. The effect of weeds on organic cereal has never been studied in farmers' conditions where multiple limiting factors such as nitrogen, water, or diseases often occur.

Studies of natural multiple weed species infestations remain scarce in comparison to studies with single sown weed species. Moreover, the incidence of multiple weed species is not easy to modelize due to interactions between weeds as well as between weeds and the crop (Swanton *et al.*, 1999). The context of organic farming offers the opportunity to explore conditions involving several limiting factors and the effect of weed diversity on organic wheat.

As organic cereal crops are affected by numerous limiting factors in commercial farms (David *et al.*, 2004c), a given level of weed infestation cannot be associated to a precise value of crop yield, especially when the weed density is measured before the date of weed control. Crop yield may take a large range of values for a given measured weed density. It seems thus more realistic to provide farmers and farmers' advisors with distributions of possible production levels rather than with point values.

The objective of this study was to predict weed injury on crop yield and quality thanks to an early weed indicator. We present a method to compute probability distributions of organic winter wheat yield, grain protein content, and late weed density (at flowering) conditional on an early weed measurement before stem elongation. The proposed method is based on quantile regression. This statistical technique was already applied in ecology to investigate relationships between a response variable Y and a limiting factor X when several other limiting factors have an effect on the response variable (Cade and Noon, 2003). Quantile regression is an attractive method in our context because weeds are not the only limiting factor of organic wheat in farmers' fields. Quantile regression uses parametric response function to relate Y to X . The function parameters are estimated from a set of observations of X and Y using non-parametric techniques for a series of quantiles chosen by the user. An interesting feature of this approach is that no assumption is required on the measurement distribution.

In this paper, the method is applied to a dataset of organic winter wheat plots in order to estimate the distributions of yield, grain protein content, and late weed density, conditional on an early measurement of weed density or diversity. The practical interest of this method is discussed.

4. Material and Methods

4.1. Data

Experiments were carried out in 45 plots of organic winter wheat (*Triticum aestivum* L.) located on 26 commercial farms in south-eastern France during two years (2005 and 2006). Each plot corresponded to a combination of site, crop management and year. Plots were characterized by different cultivars (Lona, Orpic, Caphorn, or Soissons), preceding crops (wheat, oilseed rape, corn, sunflower, soybean, lucerne, faba bean, sainfoin, or squash), sowing dates (from the 1st of October to the 21st of November), wheat densities (from 150 to 200 kg.ha⁻¹), soil tillage management (ploughed or unploughed), nitrogen fertilization

strategies (from 0 to 3 applications, from 0 to 264 kg N.ha⁻¹ in total), irrigation strategies (from 0 to 3 applications, from 0 to 105 mm in total) and mechanical weed control techniques. Weed control after sowing was carried out by spring-tine harrowing from 0 to 3 times between late tillering stage (around 825 Celsius degree-days from sowing) and wheat flowering stage. In each plot, data were collected on an area that was homogenous with regard to soil type and wheat development.

In each plot, four to sixteen micro-plots of 0.25 m² were observed before the beginning of stem elongation (around 825 Celsius degree-days from sowing), hereafter referred to as early stage, at flowering stage (around 1725 Celsius degree-days from sowing), and at harvest (around 2600 Celsius degree-days from sowing). For each micro-plot, weed densities (total weed density and the densities of the different species present in the micro-plots) and weed population diversity, characterized by the Shannon index, were determined, at the early and flowering stages¹. The Shannon index (H) is a diversity indicator which is used to characterise communities, taking into account specific diversity and abundance (Magurran, 2003):

$$H = -\sum_{i=1}^S \frac{n_i}{N} \log \frac{n_i}{N}$$

where S is the total number of species per micro-plot, n_i is the number of individual plants of the i^{th} species per micro-plot and N is the total number of individual plants per micro-plot. Nevertheless, on some micro-plots, it was not possible to identify some weeds at cotyledon stage and they were counted together as a separate species.

At harvest, grain yield and grain nitrogen (N) content were determined on each micro-plot. The grain yield was standardised at 15% moisture content after oven-drying at 80°C for 48 hours. The N content of the grains was measured by the Dumas method (Horowitz *et al.*, 1975). Grain protein content was determined by multiplying N content by 5.7. A total of 382 micro-plots were surveyed in the course of the two years: 233 and 149 micro-plots respectively with or without mechanical weed control.

4.2. Fitted models

Grain yield, grain protein content and total weed density at flowering stage were related either to early total weed density or to the early Shannon index. Models with and without weed control effect were fitted to the data in each case.

Grain yield, grain protein content and the weed density at flowering were related to the Shannon index using linear and quadratic models. The equations with weed control effect are defined by:

¹ La liste des espèces rencontrées sur les parcelles est disponible en Annexe III

$$\text{linear model: } Y = \beta_0^{UW} + \beta_0^W Z + \beta_1^{UW} X + \beta_1^W X \times Z + \varepsilon \quad (1a)$$

$$\text{quadratic model: } Y = \beta_0^{UW} + \beta_0^W Z + \beta_1^{UW} X + \beta_1^W X \times Z + \beta_2^{UW} X^2 + \beta_2^W X^2 \times Z + \varepsilon \quad (1b)$$

The equations without weed control effect are defined by:

$$\text{linear model: } Y = \beta_0 + \beta_1 X + \varepsilon \quad (2a)$$

$$\text{quadratic model: } Y = \beta_0 + \beta_1 X + \beta_2 X^2 + \varepsilon \quad (2b)$$

In both cases, Y is the grain yield, the grain protein content or the weed density, Z is the weed control (0 when there was no weed control and 1 when there was at least one weed control), X is the Shannon index, $\beta_0 \dots \beta_2$ are the models' parameters and ε is the residual term error.

Grain yield was related to early weed density using a two-parameter hyperbolic model proposed by Spitters *et al.* (1989) even though this model was established for a single weed species. The equation with weed control effect is defined by:

$$Y = (Y_{\max}^{UW} + Y_{\max}^W Z) \times \left(1 - \frac{(a^{UW} + a^W Z) \times X}{1 + (a^{UW} + a^W Z) \times X}\right) + \varepsilon \quad (3a)$$

The equation without weed control effect is defined by:

$$Y = Y_{\max} \times \left(1 - \frac{aX}{1 + aX}\right) + \varepsilon \quad (3b)$$

In both cases, Y is the grain yield, Z is the weed control (0 when there was no weed control and 1 when there was at least one weed control), X is the total early weed density, Y_{\max} is the maximum yield when weed density is nil, a is the yield loss per weed per m² as weed density approaches 0, and ε is the residual term error. Y_{\max} and a are two parameters to be estimated.

Total weed density at flowering was related to total early weed density by using the two-parameter allometric density-dependent model proposed by Cade and Guo (2000). This model includes self-thinning phenomena, expected when the weed density is high and was adapted in order to take into account a weed control effect (Wallinga and van Oijen, 1997):

$$Y = (\beta_0^{UW} + \beta_0^W Z) X^{(\beta_1^{UW} + \beta_1^W Z)} \varepsilon \quad (4a)$$

where Y is the total weed density at flowering, Z is the weed control (0 when there was no weed control and 1 when there was at least one weed control), X is the total early weed density, β_0^{UW} , β_0^W , β_1^{UW} and β_1^W are four parameters, and ε is the residual term error. $\beta_1 = \beta_1^{UW} + \beta_1^W = \lambda + 1$ with λ being the parameter relating the ratio of density at flowering to early density (survival) and early density.

The model was put in linear form by taking natural logarithms of both sides and adding 1 to early and flowering densities in order to avoid problems in case of zero counts:

$$\log(Y + 1) = \gamma^{UW} (1 - Z) + \gamma^W Z + \beta_1^{UW} \log(X + 1) + \beta_1^W Z \times \log(X + 1) + \log(\varepsilon) \quad (4b)$$

Tableau 3.1. Values of early weed density, late weed density, early Shannon index, grain yield, and grain protein content observed on the 382 micro-plots

	minimum value	maximum value	mean value	standard deviation
Early weed density (plants.m⁻²)	0	1996	95.0	199.5
Late weed density (plants.m⁻²)	0	860	135.3	139.2
Early Shannon index	0	2.3	0.8	0.7
Grain yield (t.ha⁻¹)	0.4	7.9	18.6	1.6
Grain protein content (%)	7.5	17.9	11.2	2.1

where $\gamma^{UW} = \log(\beta_0^{UW})$ and thus $\beta_0^{UW} = \exp(\gamma^{UW})$; and $\gamma^W = \log(\beta_0^{UW} + \beta_0^W)$ and thus $\beta_0^W = \exp(\gamma^W) - \exp(\gamma^{UW})$.

In the absence of existing models linking grain protein content to weed density, linear and quadratic models were fitted to the data. The equations were the same as (1a), (1b), (2a) and (2b) where Y is the grain protein content and X is the early weed density.

4.3. Statistical analysis

The model parameters were estimated from the micro-plots data by quantile regression (Cade and Noon, 2003) for quantiles in the range of 0.5-0.95. Only quantiles over 0.5 were considered because for yield, grain protein content and late weed density respectively, target yield estimations, grain protein content over 10.5, and risk of high weed infestation are of interest. The τ^{th} quantile ($0 \leq \tau \leq 1$) of a random variable Y is the inverse of the cumulative distribution function and is defined as the smallest real value of Y such that the probability of obtaining smaller values of Y is greater than or equal to τ (Cade and Guo, 2000). Let $f(X;\theta)$ denote one of the models described above, X an early weed measurement (density or Shannon index), and θ its vector of parameters. For any given value of X , $f(X;\theta)$ is equal to the τ^{th} quantile of Y if $\tau = P[Y < f(X;\theta)]$, where Y is either yield, grain protein content, or late weed density. For example, for $\tau = 0.90$, $f(X;\theta)$ is the 90th percentile of the distribution of Y conditional on the values of X ; in other words, 90% of the values of Y are less than or equal to the specified function of X .

The quantile τ was successively set equal to 0.50, 0.55, 0.60, 0.65, 0.70, 0.75, 0.80, 0.85, 0.90, and 0.95. The values of the parameters θ were estimated for each quantile using the package “quantreg” of R (Koenker, 2005). Confidence intervals were also derived either by using “quantreg” or by bootstrap (Efron and Tibshirani, 1993; Makowski *et al.*, 2007) for non-linear models. In the latter case, the number of generated samples was set equal to 200.

Computer routines written in R (version 2.5.1, 2007) were used to estimate regression quantiles, test hypotheses about parameters and compute confidence intervals. They are available on request.

5. Results

5.1. Variation in grain yield, grain protein content, Shannon index and weed density

Wide ranges of grain yield, grain protein content and weed density values were observed on the micro-plots (Tab. 3.1.). Grain yield and grain protein content ranged respectively from 0.4 to 7.9 t.ha⁻¹ and from 7.5 to 17.9% of the grains dry matter (Tab. 3.1.). Early weed density ranged from 0 to 1996 plants.m⁻² whereas late weed density ranged from 0 to 860 plants.m⁻² (Tab. 3.1.). During the cycle the averaged weed density increased from 95 (at early stage) to

Figure 3.1. Yield and early weed density plotted with estimated regression functions (from $\tau = 0.5$ to $\tau = 0.95$) for model (3b).

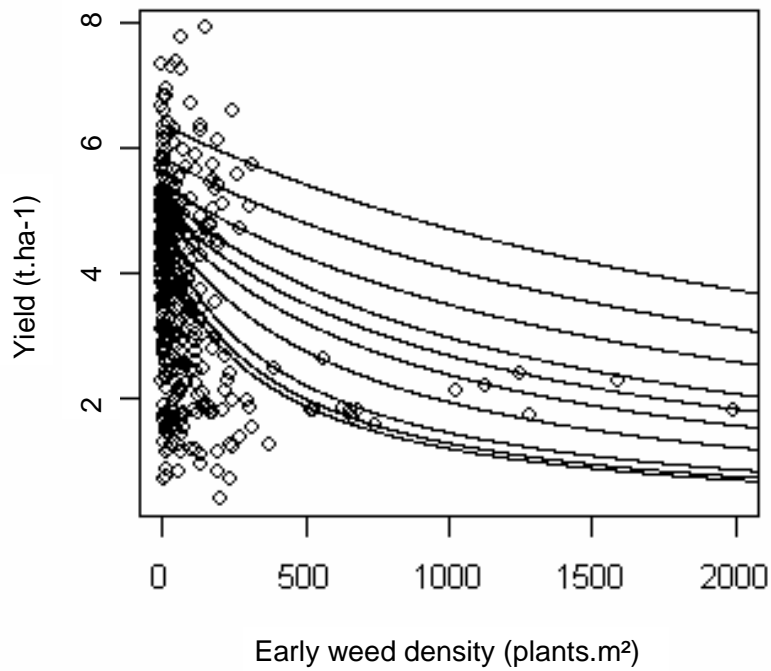
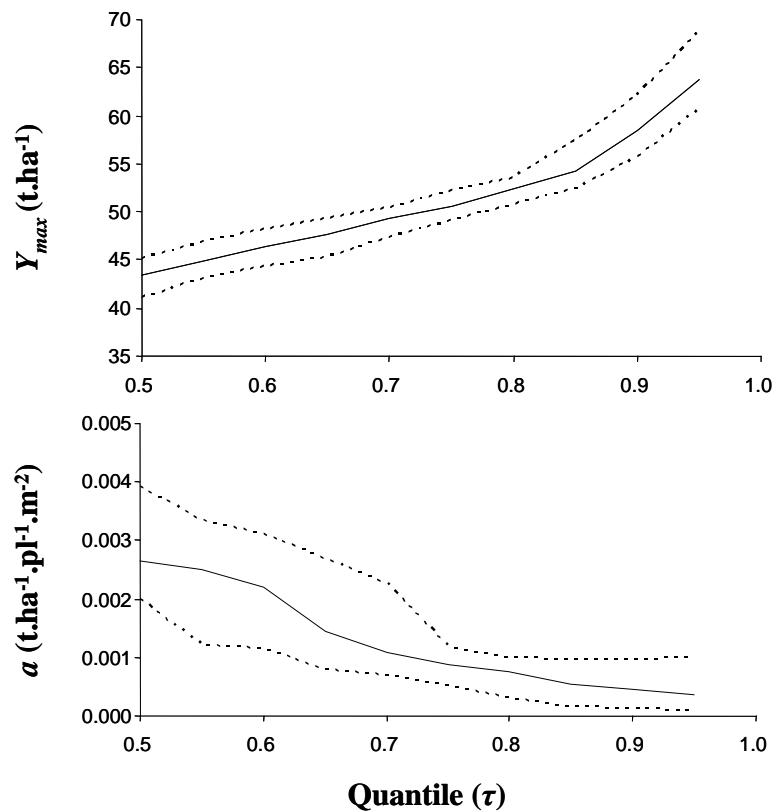


Figure 3.2. Parameter estimates for model (3b) for quantile regression (from $\tau = 0.5$ to $\tau = 0.95$) relating early weed density to yield. Solid line is step function of estimates by quantiles, and dotted lines are lower and upper bounds connecting 95 % confidence intervals from inverting a quantile rank-score test for $\tau = 0.5$ to $\tau = 0.95$ by increments of 0.05.



135 plants.m⁻² (at flowering stage). Shannon index ranged from 0 to 2.3 (Tab. 3.1.) with values in the range of those generally observed for weed communities in previous studies (Légère *et al.*, 2005).

5.2. Prediction of yield distribution of organic winter wheat

5.2.1. Prediction of yield distribution using early Shannon index as a predictor

Neither for linear models (models (1a) and (2a)) nor for the quadratic ones (models (1b) and (2b)) were estimated parameter values significantly different from 0, expressing no effect of Shannon index on yield and suggesting no direct effect of weed diversity on organic winter wheat yield.

5.2.2. Prediction of yield distribution using early weed density as a predictor

For the two-parameter hyperbolic model (3a), estimated parameter values were not significantly different from 0. Thus this model did not provide an appropriate fit for the data and there was no effect of weed control on the relationship between early weed density and yield.

Nevertheless, quantile functions testing the relationship without taking into account weed control (model (3b)) were fitted to the data (Fig. 3.1.) and suggested that the model provided a good fit for the data. Besides, this relationship provided estimated parameter values significantly different from 0 (Fig. 3.2.). The parameter *a*, i.e. the yield loss per weed per m² as weed density approaches 0, had a positive value and decreased with increasing τ values. It suggested that for the upper quantile, i.e. when weeds are supposed to be the only limiting factor, the slope was lower.

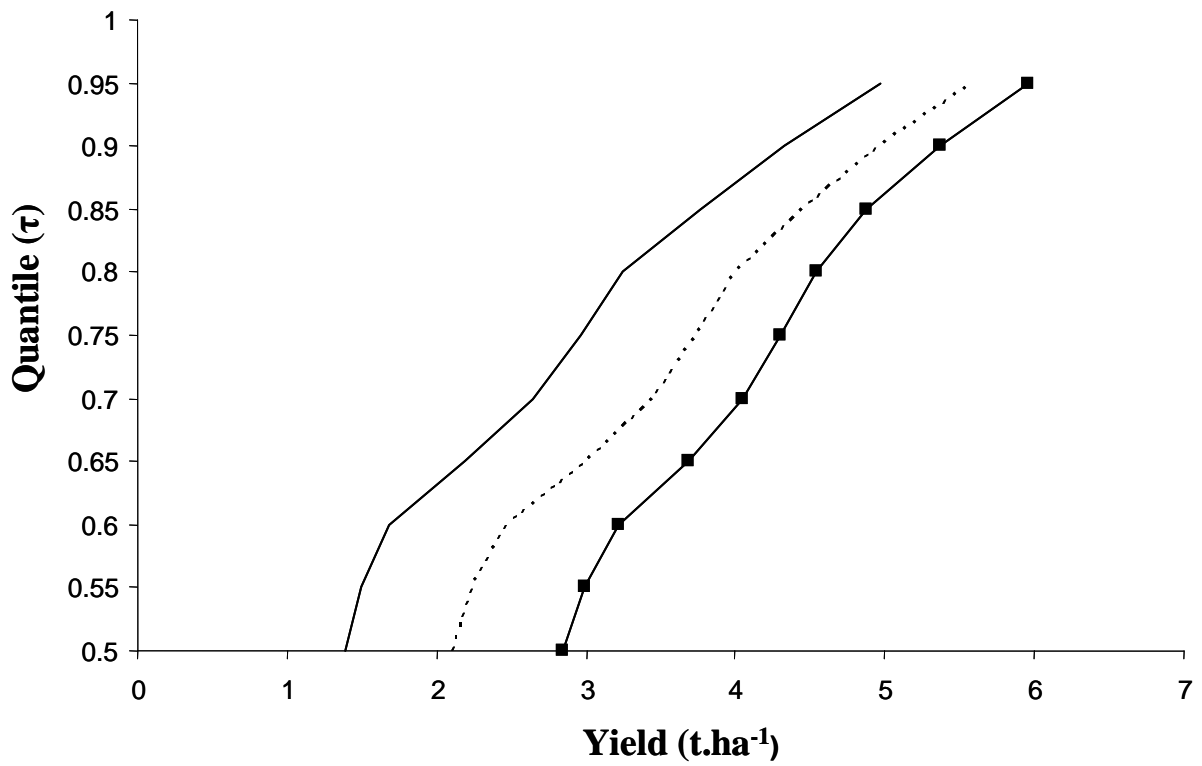
The yield distribution conditional on the values of weed density was also obtained (Fig. 3.3.). It provided information on the probability of reaching a given yield threshold. For example, on Fig. 3.3., the probability of reaching a yield over 4 t.ha⁻¹ was around 13 % when 800 weeds per m² were observed at an early date, around 20 % when 400 plants per m² were observed, and around 30 % when 200 weeds were counted.

5.3. Prediction of grain protein content distribution of organic winter wheat

5.3.1. Prediction of grain protein content distribution using early Shannon index as a predictor

Except for the linear model without weed control taken into account (2a), estimated parameter values of the models were not significantly different from 0. For the model (2a), estimated

Figure 3.3. Yield distributions ($\text{t}\cdot\text{ha}^{-1}$) conditional on the values of weed density observed at early date ($\text{plants}\cdot\text{m}^{-2}$). Solid line is the distribution when $800 \text{ plants}\cdot\text{m}^{-2}$ were observed, dotted line is the distribution when $400 \text{ plants}\cdot\text{m}^{-2}$ were observed, and squared line is the distribution when $200 \text{ plants}\cdot\text{m}^{-2}$ were observed.



parameter values were positive and different from 0 for the quantiles over 0.65. It suggested that in case of increased diversity, grain protein content was also increased.

5.3.2. Prediction of grain protein content distribution using early weed density as a predictor

Neither for linear models (models (1a) and (2a)) nor for the quadratic ones (model (1b) and (2b)), were estimated parameter values significantly different from 0. Thus, there was no effect of weed control on the relationship between early weed density and grain protein content. Early weed density was not a good predictor for estimating the effect of early weed population on grain protein content of organic winter wheat.

5.4. Prediction of late weed density distribution with weed control effect

5.4.1. Prediction of late weed density distribution using early Shannon index as a predictor

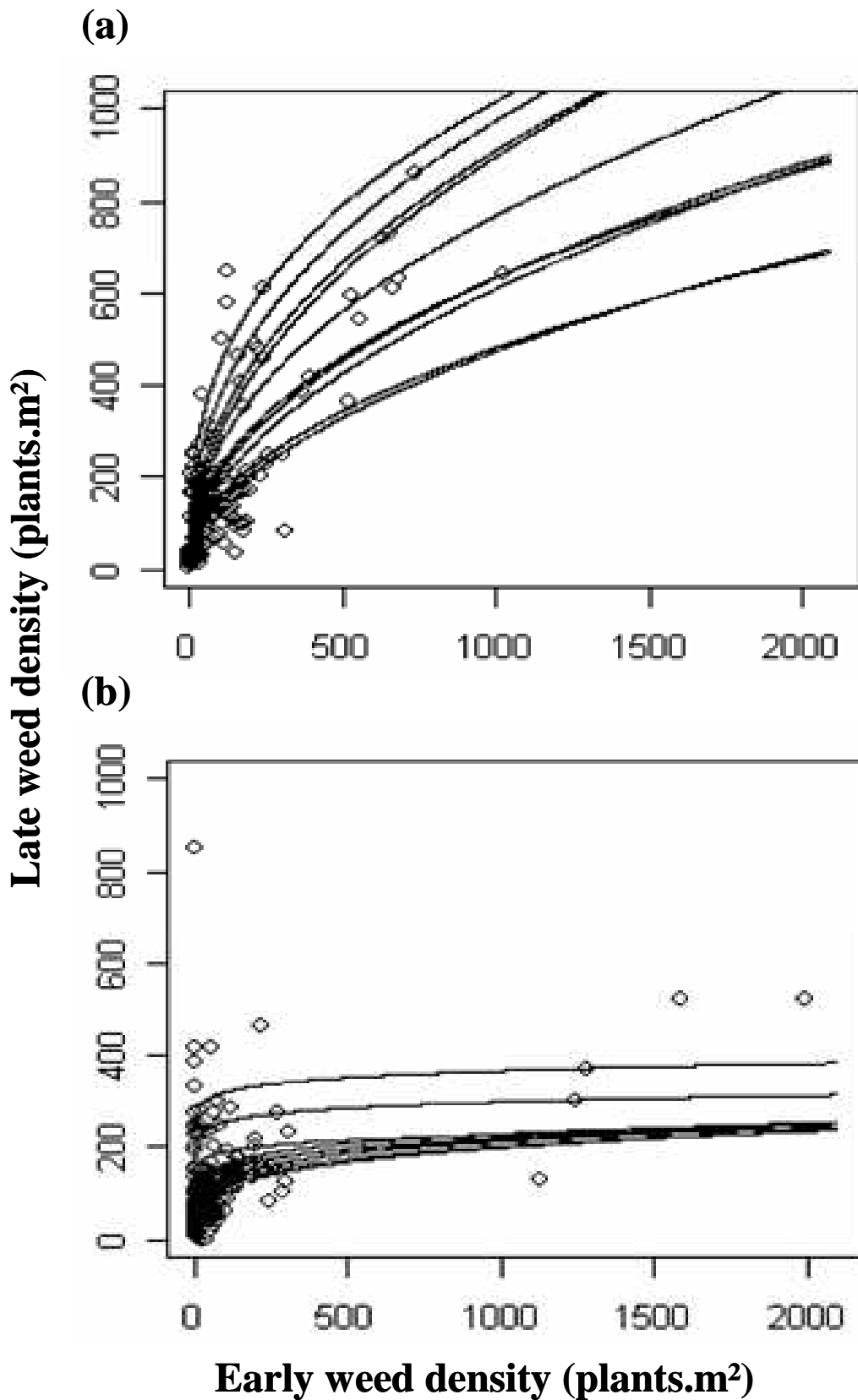
Neither for linear models (models (1a) and (2a)) nor for the quadratic ones (model (1b) and (2b)), estimated parameter values were significantly different from 0. Thus, there was no effect of weed control on the relationship between early Shannon index and late weed density. Early Shannon index was not a good predictor for estimating the late weed density.

5.4.2. Prediction of late weed density distribution using early weed density as a predictor

The effect of weed control on the dynamic of weed population was expected. Thus, only the relationship between early weed density and late weed density taking into account the weed control effect (model (4a)) was tested. After natural logarithm transformation (model (4b)), quantile functions were fitted to the data (Fig. 3.4.) and suggested that the model provided an appropriate fit for the data. Furthermore, this relationship provided estimated parameter values significantly different from 0 (Fig. 3.5.). It showed that (i) the late weed density was dependent on the early one, and (ii) there was a significant effect of weed control on the evolution of weed density. As the parameter β_1^D has a negative value (Fig. 3.5.), it showed that weed control has a negative effect on late weed density.

The late weed density distribution conditional on the values of early weed density was assessed (Fig. 3.6.). It provided information on the risk of reaching a given threshold of late weed density and, in turn, on the opportunity of weed control. For instance, a farmer who does not accept a late weed density over 300 plants.m⁻² and observes 400 plants.m⁻² at an early date was considered. If weed control is carried out between the early date and the late one, the risk that late weed density will exceed 300 plants.m⁻² is around 8 %. On the other hand, if there is no weed control, the risk reaches around 50%.

Figure 3.4. Late and early weed density plotted with estimated regression functions (from $\tau = 0.5$ to $\tau = 0.95$) for model (4a). (a) and (b) represent respectively micro-plots without and with weed control application.



6. Discussion

6.1. Using early weed density and Shannon index as predictors

6.1.1. Early weed density

Early weed density was a good predictor for estimating grain yield and late weed density distributions but it did not help predict grain protein content distribution.

Using weed density as a predictor of grain yield has been done in many studies adapted from the hyperbolic model suggested by Cousens (1985a). In those previous studies, the model was used to predict weed competition from a single species and the parameters were estimated in conditions where other limiting factors were controlled. Thus, this study showed that quantile regression using a model derived from the Cousens' equation can describe the incidence of weed density from multiple species in situations where factors other than weeds occur.

Weed density was previously related to grain protein content in experimental studies on conventional winter wheat (Mason and Madin, 1996; Awan *et al.*, 2001; Korres and Froud-Williams, 2001). But in some cases, weed density decreased grain protein content whereas in other cases, there was a positive effect or no effect at all. In this study, even with a wider range of weed densities observed, there was no strong relationship between weed density and grain protein content. This result reinforced the contradictory results observed in previous studies.

6.1.2. Shannon index

Early weed diversity expressed with the Shannon index was more accurate to predict the effect of weed population on grain protein content than early weed density. Nevertheless, as parameters were significantly different from 0 only for quantiles over 0.65, we discussed here the results only for those quantiles.

The effect of weed diversity, expressed by the Shannon index, on grain protein content has never been studied before. In this study a positive effect of the Shannon index on grain protein content was observed. This positive effect could be explained by the fact that in the event of high diversity, there is more competition between species, thus involving injurious effects within the weed population rather than against the crop (Le Roux *et al.*, 2008). Another explanation could be that high diversity characterises situations with high nitrogen availability. In such cases, nitrogen availability benefits not only weed diversity but also crop growth and quality. But the effect of nitrogen availability on crop:weed interactions is little known (Paolini *et al.*, 1999). Hence, studying further the effect of weeds on grain protein content in organic winter wheat, and especially the effect of weed diversity will be necessary in order to complete knowledge on how weeds affect crop quality.

Figure 3.5. Parameter estimates for model (4b) for quantile regression (from $\tau = 0.5$ to $\tau = 0.95$) relating early weed density to late weed density. Solid line is step function of estimates by quantiles, and dotted lines are lower and upper bounds connecting 95 % confidence intervals from inverting a quantile rank-score test for $\tau = 0.5$ to $\tau = 0.95$ by increments of 0.05.

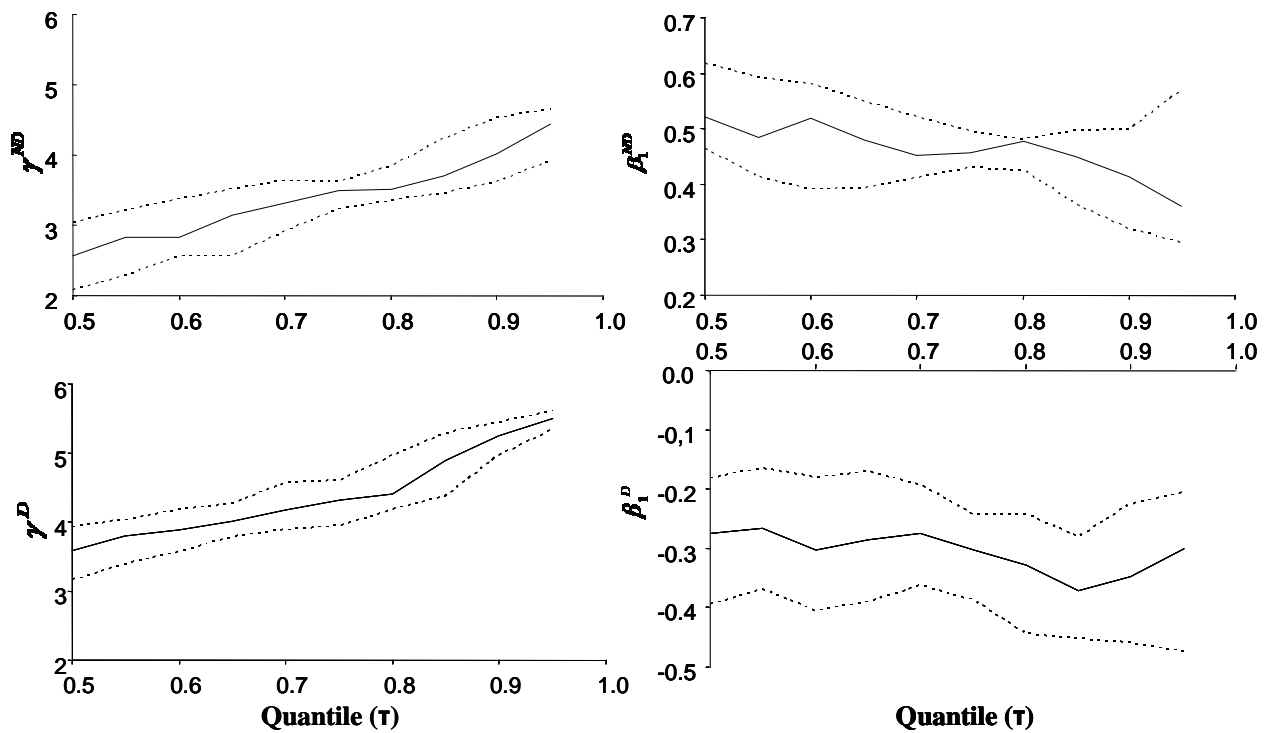
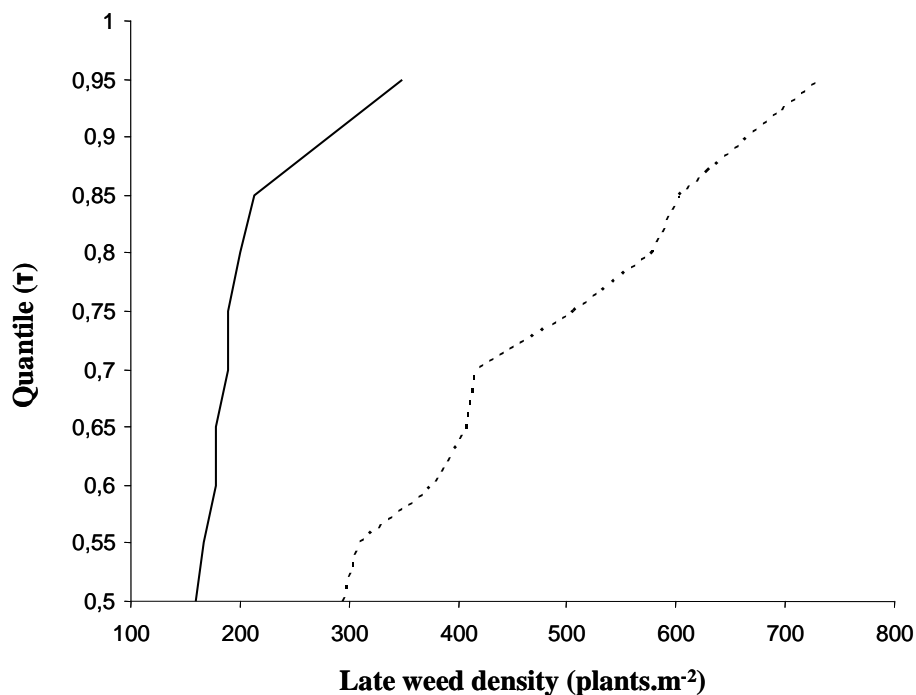


Figure 3.6. Late weed density distributions (plants.m⁻²) conditional to an early weed density equal to 400 plants.m⁻². Solid line is the distribution when weed control was carried out, and dotted line is the distribution when there was no weed control.



In our study, weed diversity did not have any effect on yield and seemed positively related to grain protein content, thus showing no injurious effect on organic wheat. Moreover, weeds are known to play a role within agroecosystems in supporting biodiversity more generally (Marshall *et al.*, 2003). Increased weed diversity is therefore beneficial to organic farming systems.

6.2. Mechanical weed control effectiveness on grain yield

In this study, no significant effect of mechanical weed control was found on the relationship between early weed density and grain yield. This result is consistent with previous studies which showed that mechanical weed control did significantly influence grain yield (Stiefel and Popay, 1990; Tillett *et al.*, 1999; Reddiex *et al.*, 2001). The lack of efficiency of weed control in our study could be explained by the high levels of weed infestation at early stage. Lesser weed density could have led to more effective weed control. Moreover, the timing and number of applications could also explain this result. Indeed, efficiency of mechanical weed control, and especially of harrowing, depends on the uprooting of seedlings, soil type and conditions, the timing of operations, weed species composition and the relative growth stage of the crop and weeds (Kouwenhoven, 1997; Bond and Grundy, 2001; Bàrberi, 2002; Melander *et al.* 2003). Mechanical weed control could also enhance weed emergence or cause crop injury (Bond and Grundy, 2001; Bàrberi, 2002). Finally, in organic farming conditions, where weeds are not always the most injurious limiting factor, grain yield could be more dependent on other limiting factors, hiding in turn the effect of mechanical weed control.

Nevertheless, our study showed a negative effect of weed control on late weed density. This is in agreement with previous studies which showed that mechanical weed control reduced weed biomass and, concomitantly, reduced weed density along the crop development (Stiefel and Popay, 1990; Tillett *et al.*, 1999; Reddiex *et al.*, 2001; Raffaelli *et al.*, 2005).

As weed seed production is related to weed density (Albrecht, 2005), weed density limitation by mechanical weed control limits weed seed production. From one year to another, weed control is effective on crop yield as it limits weed seed production (Wallinga and van Oijen, 1997), but we showed that mechanical weed control had no effect on the crop yield during the first year of weed control application.

In conclusion, this study has demonstrated the usefulness of mechanical weed control in managing middle- and long-term weed effects by limiting weed seed production. Using mechanical weed control did not meet the objective of limiting crop yield damage caused by weeds during the first year of weed control application.

6.3. Using crop yield and late weed density predictions to manage cropping techniques

6.3.1. Managing mechanical weed control

In organic farming, mechanical weed control cannot eliminate all the weeds present in a field, contrary to weed control by herbicides (Bàrberi, 2002). Thus, distributions of weed density obtained in this study can help predict the partial effect of weed control on late weed density. Knowing what weed density at wheat flowering stage would be acceptable for a farmer, it is possible to predict the risk of exceeding this threshold with or without mechanical weed control, based on an early weed density observed (Fig. 3.6.). This predicted weed density distribution is useful in evaluating the potential weed seed production that will determine the next year's density. The relevance of carrying out weed control with a long-term effect objective could be evaluated.

6.3.2. Managing fertilization

The distribution of organic winter wheat yield conditional on early weed density was estimated in this study (Fig. 3.3.). That kind of approach was encouraged by Kropff *et al.* (1995) as it improves decision-making by predicting yield loss due to weeds early in the growing season.

Yield goal is used in the calculation of nitrogen crop requirement (Nf in $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$) for the whole crop cycle (COMIFER, 1996):

$$Nf = b \times y$$

where b is the nitrogen requirement for a given crop by production unit ($\text{kg}\cdot\text{t}^{-1}$) and y is the yield goal ($\text{t}\cdot\text{ha}^{-1}$). Nf is thus calculated. When the nitrogen crop requirement is determined, it makes it possible to determine a fertilisation management strategy. By estimating of weed density at an early stage, between mid-tillering and the beginning of stem elongation, one can determine the nitrogen rate necessary to reach the yield goal. Using this information, combined with the known nitrogen rate available in the field (from previous fertiliser applications or from a previous crop), one can calculate of the nitrogen rate necessary to complete the nitrogen already available to reach the yield goal.

For example, the yields that are attainable in 20% of cases for a given early weed density (yields where $\tau = 0.8$ on Fig. 3.3). If 200 weeds. m^{-2} are observed at an early stage, the attainable yield is 4.55 $\text{t}\cdot\text{ha}^{-1}$, whereas when 800 plants. m^{-2} are observed the yield is 3.25 $\text{t}\cdot\text{ha}^{-1}$. Thus, for 200 plants. m^{-2} and 800 plants. m^{-2} , Nf is respectively equal to 136.5 $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ and 97.5 $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$, as $b = 30 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ for wheat (COMIFER, 1996). The required fertilisation rate varies widely depending on the weed level observed early: increased early weed density involved reducing fertilisation rate as the yield goal was lower. Predicting the effect of weeds on crop yield offers a great opportunity to adjust the fertilisation rate during the crop cycle, especially

in organic crops, where there are high levels of weed infestation. Nitrogen crop requirement (N_f) can be calculated for other yield goals corresponding to different quantile values (*e.g.* where $\tau = 0.5$). Predicting yield goal distribution taking into account weed pressure could be very useful to build or improve decision-making tools. However, this method requires obtaining an early weed density measurement which is time-expensive for farmers. Hence, it is necessary to assess simple methods to estimate this early weed density.

6.4. Benefits of using quantile regression

The objective of quantile regression is to provide distributions of Y conditional on X values (Cade and Noon, 2003). Here yield and late weed density distributions were estimated conditionally on early weed density. In field conditions and even more so in organic field conditions, weeds are never the only limiting factor. Thus, it is pointless to try to predict discrete yield or late weed density value based on early weed density as these results would not match the observed data. On the other hand, predicting distributions better reflects the range of values that yield and late weed density could reach and provides more complete information because distributions take into account the effect of the other limiting factors.

In this study, we successfully used a method that is usually applied in ecological studies and showed that this method is also relevant in agroecosystem conditions.

In our study, we estimated the distribution for the quantile values over 0.5 but this method could be applied to a larger set of quantile values, thus providing a complete distribution of the variable Y .

Pour des raisons d'homogénéisation du document, les références bibliographiques relatives à cet article se trouvent à la fin du document

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons montré que la densité précoce d'adventices était un indicateur qui permettait de prédire des distributions de rendement du blé biologique et de densité d'adventices à floraison. Nous avons également montré que les relations ainsi établies pouvaient permettre d'aider à la gestion du désherbage et de la fertilisation azotée sur des parcelles de blé biologique. Cependant, l'indicateur utilisé semble difficilement mobilisable par des agriculteurs tel qu'il a été mis au point dans nos travaux. De ce fait, il serait intéressant de connaître les informations relatives aux adventices que prélèvent les agriculteurs et d'évaluer la compatibilité de notre indicateur avec la nature et la manière dont ils prélèvent ces informations sur leurs parcelles.

CHAPITRE 4

Identification des informations sur les adventices mobilisées par les agriculteurs et comparaison avec les indicateurs identifiés à partir de nos travaux de recherche

Chapitre 4.

Identification des informations sur les adventices mobilisées par les agriculteurs et comparaison avec les indicateurs identifiés à partir de nos travaux de recherche

Ce chapitre traite de la troisième question de recherche soulevée dans la problématique. A terme, afin de proposer un outil d'aide à la décision adapté aux agriculteurs, nous souhaitons vérifier l'adéquation entre les indicateurs identifiés dans le chapitre précédent (chapitre 3) et les informations relatives aux adventices qu'utilisent les agriculteurs pour prendre des décisions sur leurs parcelles. L'objectif ici est donc d'identifier et de caractériser les informations que prélèvent les agriculteurs pour juger de la présence d'aventices sur leurs parcelles et de leur degré de nuisibilité vis-à-vis de la culture de blé. Nous faisons l'hypothèse que ce jugement sur la nuisibilité leur sert d'une part à décider de l'opportunité de désherber, et d'autre part, à adapter leurs autres pratiques en fonction du nouveau potentiel de la culture imposé par les adventices. Comme nous l'avons déjà évoqué dans la problématique, afin de proposer un outil d'aide à la décision adapté aux futurs utilisateurs, nous avons choisi d'analyser les processus de décision des agriculteurs qui mettent en jeu des observations de la population d'aventices. En effet, comme le soulignent Dupuy et Thoenig (1985), « le problème de l'action est beaucoup plus celui du raisonnement qui conduit à la connaissance que celui de la connaissance elle-même. L'enjeu n'est pas dans une simple affaire de quantité et de qualité d'informations. Il réside dans le processus grâce auquel des informations se génèrent et se lient aux autres. » Nous en concluons donc que pour accéder aux informations mobilisées par les agriculteurs, nous devons nous intéresser aux processus de décision pour l'action¹. Cependant, l'objet de notre recherche n'est pas de caractériser finement les règles de décisions de l'agriculteur, mais d'utiliser cette entrée pour accéder aux informations qu'il prélève.

Dans la problématique, nous avons évoqué le concept de « modèle d'action » et l'intérêt d'analyser les pratiques des agriculteurs au regard de ce concept mais nous avons montré les limites de cette approche d'analyse pour caractériser finement les observations faites par les agriculteurs. Nous avons donc choisi d'analyser les processus de prise de décision des agriculteurs « en situation » en considérant que la gestion des cultures se fait en situation d'environnements dynamiques et que les cadres d'analyse proposés par ce courant de recherche vont nous permettre de bien caractériser les informations relatives aux adventices que prélèvent les agriculteurs.

¹ **Action** : « une action est un processus soumis à un but conscient » (Leontiev, 1975). On la distingue de l'opération qui est un moyen de réalisation de l'action. Par exemple, « désherber » est une action alors que « passer la herse-étrille » est une opération.

Figure 4.1. Parallélisme des activités de diagnostic et de prise de décision en situation dynamique (d'après Hoc et Amalberti, 1999)

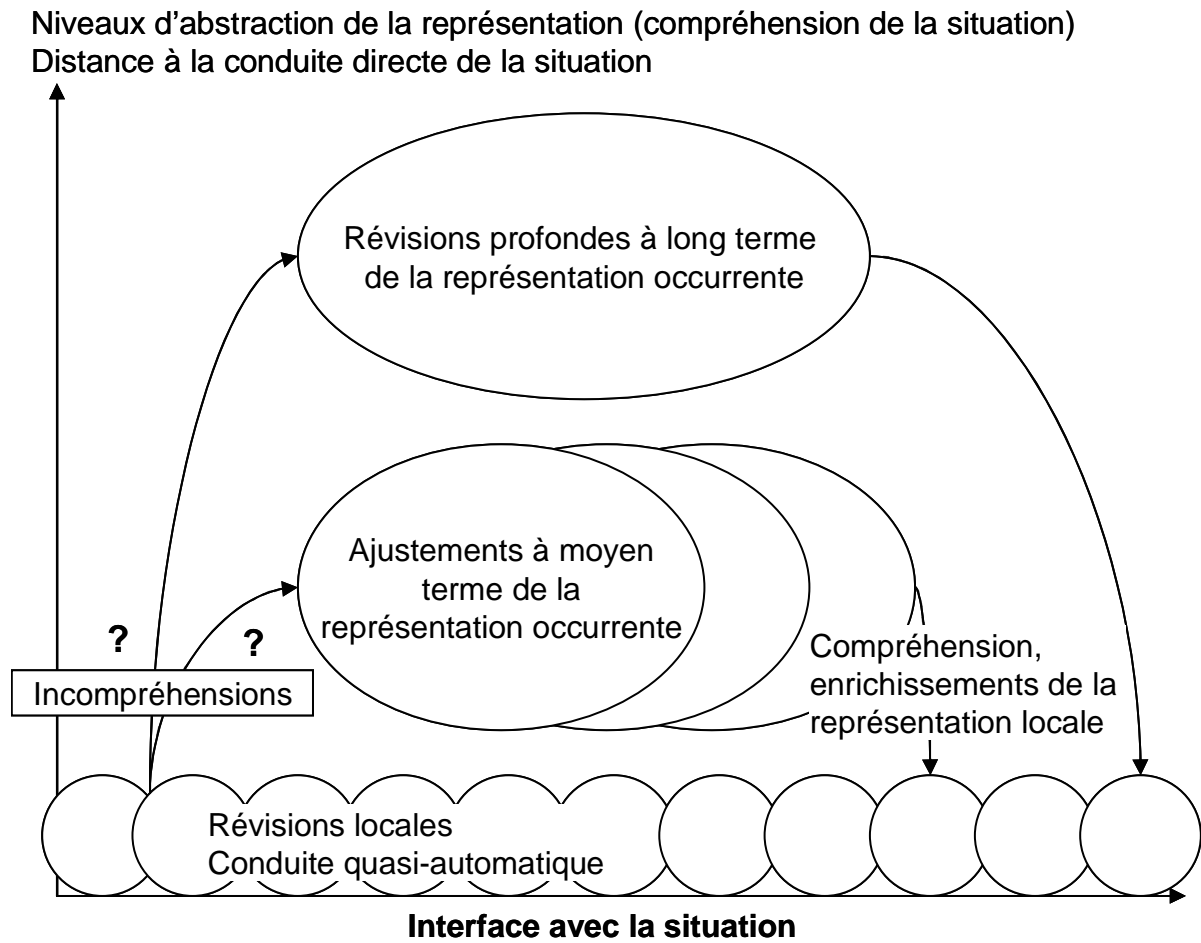
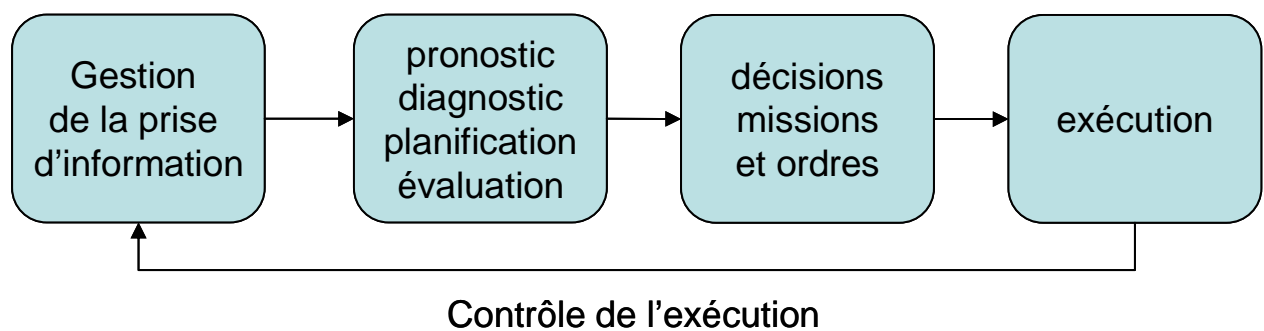


Figure 4.2. Schéma de la boucle de gestion d'environnement dynamique (d'après Samurçay et Rogalski, 1992)



1. Introduction

1.1. La gestion des environnements dynamiques

Tout d'abord, rappelons ici que les environnements dynamiques correspondent à des situations qui évoluent, même en l'absence d'action de l'opérateur (Samurçay et Hoc, 1989). Ces situations ont leur propre évolution et il est donc difficile d'automatiser les actions à y appliquer car elles varient en permanence. L'évolution d'une parcelle agricole au cours d'un cycle cultural est donc considérée, dans le cadre de notre travail, comme un environnement dynamique. Les caractéristiques de la parcelle agricole évoluent en fonction d'éléments que l'agriculteur ne maîtrise que partiellement (par exemple, le développement de la culture dépend en partie du climat, sur lequel l'agriculteur ne peut agir que de manière limitée). Cependant, ces évolutions dépendent également des actions de l'agriculteur (par exemple, il peut limiter le nombre d'adventices de la parcelle grâce à un désherbage). De plus, même quand l'agriculteur peut agir sur l'état de sa parcelle, il reste que les processus d'évolutions sont lents, bien que les prises de décision puissent être rapides, et qu'il existe très souvent un retard de l'effet sur la cause. Cet effet « d'hystérésis » (Cellier, 1996) représente un second ordre de difficulté pour la prise de décision. Ainsi, un agriculteur peut constater un déficit azoté de la culture dans une parcelle, et décider d'un apport d'azote pour compenser, mais l'effet de ce dernier sur l'état de la culture ne sera perceptible que plusieurs jours, voire parfois plusieurs semaines plus tard. Quand le décalage entre la temporalité des processus biologiques et celle de l'agriculteur est important, que le délai de réponse à une intervention est long, il devient alors difficile à l'opérateur² d'observer les effets de ses propres actions et d'évaluer la progression vers un but (Cellier, 1996).

Dans ce type d'environnement, un moyen de contrôler la situation est l'anticipation. En utilisant des données d'observation (informations prélevées à un moment donné) et ses connaissances sur les processus dynamiques en cours, l'opérateur peut faire un pronostic sur l'évolution du phénomène dans la mesure où aucune modification n'est décidée et où il peut anticiper les effets des actions potentielles sur l'évolution (Samurçay et Rogalski, 1992). L'agriculteur effectue donc une évaluation de l'état de la culture et des conditions dans lesquelles elle évolue qu'il actualise régulièrement en prélevant des informations sur la parcelle. Il a alors recours à une représentation de son environnement, qu'il remet à jour régulièrement. Lorsque la situation n'est pas conforme aux attentes de l'opérateur, ce dernier se trouve confronté à une incompréhension de l'environnement. On peut distinguer alors deux types de préoccupations de l'opérateur face à ces incompréhensions (voir Fig. 4.1.) : (i) la gestion à court terme, qui permet de gérer la poursuite immédiate de l'interaction avec la situation, et (ii) la gestion à moyen et long terme, qui permet de reconstruire une cohérence de la représentation qui donne un sens aux incompréhensions notées en cours de travail (Hoc et

² **Opérateur** : terme courant en psychologie du travail qui désigne systématiquement l'acteur humain qui effectue la tâche. Dans le cadre de notre travail, l'opérateur est l'agriculteur.

Amalberti, 1999). Dans notre cas d'étude, la gestion à court terme peut être une intervention directe sur l'environnement (décision de désherbage par exemple). La gestion à moyen et long terme peut être un bilan, en fin de cycle, des facteurs limitants observés sur une parcelle pour comprendre les performances de la culture ou la décision de déclencher une pratique en fin de cycle (irrigation par exemple) après avoir observé des informations à différents moments du cycle.

Pour contrôler ce type de situations dynamiques, on peut identifier cinq grandes catégories d'activités élémentaires : la prise d'information, le diagnostic/pronostic, la planification, la prise de décision et le contrôle de l'effet des actions (Samurçay et Rogalski, 1992 ; Hoc et Amalberti, 1999). Ces activités élémentaires sont articulées pour former une boucle de gestion de l'environnement dynamique (Fig. 4.2.). En situation, elles sont imbriquées les unes aux autres, mais on les distingue pour mieux les analyser.

Dans le cadre de l'analyse que l'on souhaite mener, c'est l'activité élémentaire de prise d'information qui nous intéresse particulièrement. En effet, on cherche à mettre en évidence les informations relatives aux adventices que les agriculteurs utilisent à la fois pour une gestion à court terme (prise de décision immédiate) mais aussi à moyen-long terme (pour des prises de décisions ultérieures ou pour une révision profonde de leur représentation).

1.2. La prise d'information

Le Moigne (1979) met en évidence que l'on ne peut pas se contenter de la théorie classique de la décision suivant laquelle il suffirait de rassembler les « bonnes informations » pour prendre les « bonnes décisions ». Cette approche, par trop rationaliste, ne reflète pas le processus réel de la prise de décision. Quand on s'intéresse aux pratiques de décision, aux raisonnements en situation, on est beaucoup plus proche d'une forme d'intelligence qui est celle de la *mêtis* (Détienne et Vernant, 1974), « recourant au flair, à la sagacité, la prévision, la souplesse d'esprit, la feinte, la débrouillardise, l'attention vigilante ». Souvent, les individus consacrent une part considérable de leur énergie à collecter des informations « apparemment presque au hasard, par des procédures de balayage pas très répétitives et des procédures d'association pas toujours avouables ni même conscientes » (Le Moigne, 1979). En somme, il est difficile d'effectuer une correspondance systématique et précodée entre une famille d'information et une famille de décision. Dans le cadre des situations agricoles qui nous intéressent ici, en général, une information ne sert pas à prendre une seule décision, de même qu'une décision peut nécessiter la collecte de plusieurs informations.

Dans son approche de la décision, le spécialiste de l'étude des systèmes complexes redonne au contraire toute l'initiative à l'individu. C'est lui qui décide des informations qu'il souhaite recevoir. On fait l'hypothèse que l'opérateur décide de s'informer quand il observe une différence entre la situation escomptée et la situation observée. Par exemple, lors d'un « tour

de plaine »³, l'agriculteur va d'abord apprécier globalement l'état de sa parcelle, et si cet état n'est pas conforme à ce qu'il attendait, il va décider de prélever des informations pour comprendre et/ou pour agir. Cette approche rejoint les théories relatives aux environnements dynamiques pour lesquelles l'actualisation de la représentation se fait quand il y a des incompréhensions (Fig. 4.1.). En effet, pour Samurçay et Rogalski (1992), la prise d'information a lieu notamment dans un but de vérification d'hypothèses d'évolution et pas seulement dans un but d'action. De même, d'après Hoc et Amalberti (1999), les activités d'élaboration de l'information permettent à l'opérateur « d'intégrer dans sa mémoire de travail des informations relativement brutes », c'est-à-dire qui ne sont pas encore interprétées. Ces activités contribuent à la fois à alimenter la représentation occurrente mais elles peuvent également déclencher des actions.

Notons que le courant de la cognition située propose une approche un peu différente. D'après Suchman (1990), « la pratique située comprend des interactions continues avec l'environnement qui sont plus ou moins informées par des représentations d'actions et de leurs conditions ». L'action est alors dépendante de la situation : l'opérateur ne va pas chercher de l'information pour sa décision ou pour la planification de son action, mais en situation seulement, il prélève de l'information afin d'accorder au mieux son activité aux circonstances.

Dans le cadre de notre travail, nous considérerons que l'agriculteur prélève généralement de l'information pour prendre une décision à court terme, c'est-à-dire qu'il décide de prélever de l'information car il envisage de déclencher une pratique dans un futur proche, mais qu'il peut également prélever de l'information qui lui servira plus tard (moyen/long terme) comme l'indiquent Hoc et Amalberti (1999). Toutefois, l'agriculteur peut aussi prélever des informations dans le cadre d'une activité de surveillance de sa parcelle. Ces informations peuvent alors l'amener à prendre une décision pour laquelle il n'était pas venu prélever de l'information initialement, comme le soulignent les travaux de Suchman (1990).

Enfin, une des caractéristiques de notre cas d'étude est que les informations manipulées par les agriculteurs sont toujours des informations directes, c'est-à-dire qu'elles n'ont pas été traitées avant que l'agriculteur y accède (ce qui pourrait être le cas s'il se référait à un résultat obtenu à l'aide d'un logiciel informatique par exemple). On considère donc qu'il prélève une information brute.

1.3. De la difficulté d'accéder aux connaissances, représentations et informations mobilisées par les agriculteurs

Vermersch (1994), un psychologue français, s'est penché dans ses travaux sur la façon d'accéder aux vécus de l'action, à des fins éducatives et de connaissance. Selon lui, trois types de difficultés se présentent quand on interroge un individu sur ce qu'il fait ; (i) l'action

³ **Tour de plaine** : cette démarche consiste à observer en détail un champ et à faire en même temps le tour des champs en vue de porter un jugement sur le système de culture. (Sebillotte, 1969)

comporte une part importante d'implicite dans sa mise en œuvre, (ii) c'est un exercice inhabituel que de décrire son action (sous l'angle procédural) et donc un guidage s'impose, (iii) le questionnement spontané est souvent source d'obstacles. Aussi, pour aider le sujet à accéder à ses connaissances pré-réfléchies, l'auteur propose de mener un entretien d'explicitation (Vermersch, 1994) dont l'une des techniques est de canaliser la verbalisation vers le vécu de l'action « effective » et de veiller à ce que l'interviewé soit présent à son vécu (« position de parole incarnée »). Il faut alors éviter de poser des questions qui induisent des réponses de l'ordre du « déjà conceptualisé » (par exemple, ne pas demander « *pourquoi le sujet fait telle chose ?* » mais « *que fait-il quand il fait cette chose ?* » et « *comment le fait-il ?* »). Cette précaution méthodologique doit faciliter la verbalisation de l'action telle qu'elle est effectivement mise en œuvre dans l'exécution d'une tâche.

Amalberti et Hoc (1998) évoquent également des risques de biais lors de la collecte de données verbales provoquées par l'observateur à des fins d'explicitation. Le premier type de biais est un « biais de réactivité » où l'individu rationalise à l'excès et s'éloigne des processus qu'il met effectivement en jeu dans l'activité. Le second type de biais est un « biais de validité » où l'individu essaie de justifier toutes ses activités y compris celles pour lesquelles il est incapable de le faire. Ils ajoutent que le risque d'avoir ce type de biais augmente lorsque le recueil de la verbalisation ne s'effectue pas au moment de l'exécution de la tâche. Ceci nous conforte donc dans la nécessité de réaliser des entretiens en situation, sur les parcelles. Ces entretiens en situation nécessitent néanmoins que l'opérateur puisse interrompre facilement sa tâche pour l'explicitier.

Le sociologue Bernard Lahire (1998) souligne, pour sa part, combien le discours tenu sur la pratique est un construit social car il existe bel et bien une différence entre « ce que les acteurs font et savent » et ce « qu'ils disent faire ou savoir ». Cela s'explique par des contraintes de mise en forme narrative des pratiques. La première de ces contraintes est l'existence de normes concernant les pratiques. Ainsi, de façon plus ou moins consciente, les individus ont tendance à n'exposer que le versant officiel de leurs pratiques et à effacer les activités estimées les moins conformes. Suivant la manière dont est conduit l'entretien, l'importance des normes pesant sur les pratiques enquêtées et la capacité de l'enquêteur comme de l'enquêté à tenir ces normes à distance, la qualité de la description peut grandement varier. La deuxième de ces contraintes est le souci de cohérence, de rationalité qui guide l'interviewé dans sa relation à l'enquêteur. Afin de ne pas « perdre la face » ou sans toujours le vouloir, les individus tendent à reconstituer des enchaînements temporels qui ne sont pas réels : « le besoin de mise en cohérence narrative détruit la logique non logique des pratiques » (Lahire, 1998). Une troisième contrainte se rapporte à des conventions de discours. Généralement, les acteurs disent plus volontiers ce qu'ils font que comment ils le font. Ils estiment qu'il n'est pas nécessaire de rentrer dans le détail de leurs activités et que cela n'intéressera pas l'enquêteur, sauf s'il en fait la demande expresse. En conséquence, ils ne décrivent pas les « micro-pratiques », soit tout ce qui est considéré comme des moyens pour atteindre des fins.

Ils omettent donc très souvent de signaler les prises d'informations et les activités d'écriture qui sous-tendent leur activité (par exemple, faire une liste de commissions pour réaliser ses achats).

Il existe donc de nombreuses difficultés, à la fois d'ordre psychologique et social, pour accéder aux connaissances, représentations et informations que mobilisent les agriculteurs.

1.4. Cas d'étude et questions de recherche

Comme nous l'avons évoqué dans la problématique, la question à laquelle on tente de répondre dans ce chapitre est la suivante : « **Quelles sont les informations collectées par les agriculteurs sur les adventices afin de déclencher des décisions techniques (e.g. désherbage, fertilisation) ? Ces informations sont-elles compatibles avec celles identifiées comme pertinentes dans le chapitre précédent pour quantifier les effets des populations d'adventices sur le rendement et la teneur en protéines ?** »

Nous faisons le choix de nous intéresser aux informations mobilisées sur les parcelles agricoles et en situation de prise de décision ou de surveillance de la parcelle car nous souhaitons ensuite comparer ces informations aux indicateurs⁴ proposés dans le chapitre 3, collectés sur des parcelles. Par conséquent, nous excluons de notre analyse les informations qui sont obtenues par la consultation d'information interne (par exemple, les agendas des agriculteurs, cf. Joly, 2004) ou externes (par exemple, des informations fournies par des techniciens ou des agriculteurs voisins).

Nous avons vu que la gestion des environnements dynamiques se décompose en plusieurs activités élémentaires. Pour répondre à notre question, nous allons nous concentrer sur l'activité de prise d'information puisque nous souhaitons appréhender des observations effectuées sur les parcelles.

De plus, nous avons vu que, pour se représenter l'évolution des processus, dans notre cas l'infestation en adventices, l'opérateur a recours à une réactualisation régulière de la représentation de son environnement. Ici, l'environnement considéré est la parcelle agricole et on suppose que l'agriculteur prélève des informations sur les adventices. Nous cherchons donc à **connaître la diversité** de ces observations faites sur la parcelle et à **identifier, parmi l'ensemble des observations réalisées, celles qui sont mobilisées de préférence (ou prioritairement)**.

Nous avons également établi que l'on pouvait distinguer deux types de prélèvements de l'information : pour de la gestion à court terme et pour de la gestion à moyen/long terme. Nous allons donc chercher à **caractériser les informations prélevées en fonction des buts** pour lesquels elles sont utilisées.

⁴ **Indicateur** : nous appelons ici indicateur les variables utilisées dans le chapitre précédent pour prédire l'effet des adventices sur le rendement et la teneur en protéines. Nous distinguons par le terme « information » ce qui relève des observations des agriculteurs.

Tableau 4.1. Caractéristiques des agriculteurs enquêtés

Code agriculteur	A	B	C	D	E	F	G	H
Petite région	Plaine de Lyon	Diois	Diois	Diois	Plaine de Montélimar	Diois	Plaine de Valence	Plaine de Valence
SAU (ha)	160	60	43	70	170	31	39	76
Part de la SAU cultivée en blé (%)	10.6%	33.3%	39.5%	28.6%	29.4%	35.5%	23.1%	32.9%
Système de production*	2	2	1	2	2	3	2	2
Année de début de conversion à l'agriculture biologique	2000	1992	2001	1998	1999	1984	1998	2000
Reprise de l'exploitation familiale	oui	oui	oui	oui	oui	non	oui	non
Insertion technico-économique**	+	++	++	+	++	++	+	+

* Systèmes de production : type 1, systèmes mixtes avec élevage sur l'exploitation ou à proximité ; type 2, des systèmes céréaliers intensifs ; type 3, systèmes céréaliers extensifs.

** Insertion technico-économique : + bien inséré dans les réseaux techniques, ++ exerce en plus une responsabilité professionnelle.

2. Matériels et méthodes

2.1. Le recueil des informations : deux séries d'enquêtes auprès des agriculteurs

Pour tenir compte du fait que les individus éprouvent des difficultés à verbaliser leur action (celle par exemple d'observer une parcelle et de prélever des informations) et qu'ils ont tendance à effacer les modalités concrètes de leurs pratiques, nous avons imaginé un dispositif d'enquêtes en deux temps et mobilisé des techniques d'entretien ouvertes. Dans un premier temps, nous avons choisi de mener des entretiens d'explicitations « en salle » pour faire expliciter aux agriculteurs leurs façons d'intervenir durant tout le cycle du blé (procédures, repères de date, règles d'action) en insistant particulièrement sur la gestion des adventices. Nous avons complété cette première phase d'enquêtes par des entretiens « dans la parcelle » avec les agriculteurs. Nous les avons donc accompagnés dans leurs parcelles pour observer comment ils prélevaient leurs informations en situation et leur faire expliciter les façons de juger de l'état de la parcelle et les conséquences qu'ils en tiraient (état d'infestation, prévision d'intervention mécanique, apport d'azote, etc.).

2.1.1. Le choix des agriculteurs

Nous avons choisi de travailler avec huit agriculteurs biologiques de la région Rhône-Alpes. Ces derniers possèdent tous des parcelles bénéficiant d'un suivi expérimental (cf. les autres travaux menés dans cette thèse aux chapitres 2 et 3), ce qui ouvre la possibilité de comparer les informations acquises par les agriculteurs sur leurs parcelles aux indicateurs proposés dans le chapitre précédent (chapitre 3).

Cet échantillon restreint s'explique par le caractère exploratoire de notre travail et se justifie par la mise en place d'un dispositif d'enquête relativement lourd (deux séries d'entretiens retranscrits en intégralité). Leurs parcelles étant suivies par ailleurs dans le cadre d'un dispositif expérimental (l'année de la réalisation des enquêtes et l'année précédente), nous avons déjà établi avec eux une relation privilégiée au moment de l'enquête, favorisant leur participation à ce dispositif supplémentaire de recherche. De plus, nous disposions déjà de données quantitatives sur leurs parcelles et notamment sur leurs infestations en adventices.

L'objectif était d'appréhender *a priori* une certaine diversité dans les observations faites sur les parcelles. En effet, les agriculteurs retenus se trouvent dans quatre petites régions, caractérisées par des conditions pédoclimatiques différentes : le Diois (quatre agriculteurs), la Plaine de Lyon (un agriculteur), la Plaine de Montélimar (un agriculteur) et la Plaine de Valence (deux agriculteurs). De plus, ces agriculteurs recouvrent une diversité de systèmes de production : des systèmes mixtes avec élevage sur l'exploitation ou à proximité (type 1), des systèmes céréaliers intensifs (type 2) et des systèmes céréaliers extensifs (type 3) (David *et al.*, 2007). Le tableau ci-contre donne les principales caractéristiques des agriculteurs sollicités et de leurs exploitations (Tab. 4.1.). En effet, nous faisons l'hypothèse que l'activité de prise d'information peut être influencée par le degré d'insertion des agriculteurs dans des réseaux

professionnels, par le nombre d'années de production biologique depuis leur conversion, mais aussi par leur personnalité.

2.1.2. La première série d'enquêtes : entretiens « en salle »

Pour accéder au vécu de l'action des agriculteurs, nous avons choisi de nous appuyer sur la technique de « l'entretien d'explicitation » (Vermersch, 1994). L'objectif de ce type d'entretien est de faire verbaliser à l'agriculteur l'implicite de son vécu de manière explicite, en faisant se remémorer à l'agriculteur ses actions en privilégiant la dimension procédurale, c'est-à-dire l'action dans son déroulement effectif, sans induire les réponses de celui-ci. Pour cela, l'intervieweur doit solliciter des réponses précises sans poser de questions qui induisent la réponse (Vermersch, 2004). Les questions ne doivent donc pas nommer de réalités qui n'ont pas encore été exprimées par l'agriculteur, ni utiliser de formulations qui traduisent dans le langage de l'intervieweur ce que dit l'agriculteur. Il faut donc éviter les questions fermées (auxquelles on répond par oui ou non par exemple). Pour relancer, il faut poser des questions ouvertes qui renvoient à un aspect vécu de l'expérience (Vermersch, 2004), par exemple : « *qu'est-ce qui se passe pour vous au moment où vous décidez d'apporter de l'azote ?* ». Cela permet de faire passer l'interviewé à un état de perception interne. Une autre technique consiste à reprendre les verbes d'action utilisés par l'agriculteur pour relancer. Par exemple : « *en quoi consiste le fait de désherber ?* ». L'explicitation est alors engendrée par le fait de faire spécifier l'action.

Afin de mener ces entretiens auprès des huit agriculteurs, nous avons élaboré un guide d'entretien (voir Annexe I) autour de quatre thèmes. Dans un premier temps, l'objectif était de présenter à l'agriculteur les personnes présentes à l'entretien : deux agronomes (Christine Bouchard et moi-même) et une sociologue (Nathalie Joly), pour que l'agriculteur cerne le type de chercheurs auxquels il avait affaire et se sente plus à l'aise. Ensuite, nous précisions rapidement les attentes vis-à-vis de cet entretien.

Thème 1 : Objectifs généraux de l'exploitant et objectifs visés pour la culture du blé.

L'objectif de ce premier thème était d'avoir une description du système d'exploitation dans ses grandes lignes (différents ateliers, main-d'œuvre, changements récents) et de recueillir quelques informations sur la situation de l'exploitant et sa personnalité (discours sur le métier, intérêt pour l'agriculture biologique, habitudes de travail avec des agriculteurs, des conseillers ou des chercheurs). Le second objectif de ce thème était de cerner la place de la culture du blé dans le système de production d'un point de vue économique et le type de suivi réalisé sur cette culture (fréquence des visites des parcelles, connaissance des rendements et autres données spontanément fournies).

Thème 2 : Conduite de la culture en général

Pour ce second thème, le premier objectif était d'identifier l'itinéraire technique habituel, c'est-à-dire les procédures de routine de l'exploitant, « la combinaison d'outils qu'ils ont tendance à vouloir appliquer autant que faire se peut » (Cerf, 1996a). Cela supposait

d'accéder aux repères temporels et spatiaux qui jalonnent la culture du blé, aux phases-clés d'observation (dans le temps et l'espace), de diagnostic et d'interventions. Le second objectif était d'identifier les indicateurs de l'exploitant pour évaluer les performances de la culture et déclencher des pratiques. Il s'agissait de préciser ce qui est observé et déduit des observations, ce qui est mobilisé comme connaissances, comme informations (internes ou externes à l'exploitation). Pour nous aider sur l'exploration de ce thème, nous avons utilisé une grille reprenant les principales pratiques intervenant dans le cycle du blé (voir Annexe II) afin de les garder à l'esprit et d'éventuellement orienter l'entretien si l'une ou l'autre des pratiques étaient omises.

Thème 3 : Gestion des aléas et de situations atypiques

L'objectif ici était de soumettre des cas d'aléas ou des situations atypiques aux agriculteurs afin d'identifier les adaptations que ces cas nécessitent (recherche orientée d'informations pour établir un diagnostic, appel à des compétences externes, changement dans les modes opératoires).

Thème 4 : Echanges autour des documents de l'exploitant

L'objectif était d'identifier à grands traits la nature des informations consignées par écrit et les modes de traitement de ces informations (transfert d'un support primaire à un support secondaire, récapitulatifs, lecture simple). Ce quatrième thème n'étant pas primordial par rapport à notre problématique (puisque nous cherchions à accéder aux informations prélevées « en situation »), il n'a pas été systématiquement abordé.

Les quatre thèmes n'ont pas forcément été abordés dans cet ordre, car nous voulions éviter d'induire une rationalisation trop poussée de la part des agriculteurs. De plus, d'après Kaufmann (2004), il est important de suivre « la pente du discours » de l'interviewé pour pénétrer son raisonnement.

2.1.3. La seconde série d'enquêtes : entretiens « sur la parcelle »

L'objectif de cette seconde série d'enquêtes était de compléter les données recueillies lors de la première phase et notamment d'affiner la description des informations recueillies « en situation ». L'enquête « en salle » permettait d'accéder à l'organisation générale des pratiques et à leur logique directrice, tout au long de l'itinéraire technique mené sur le blé. Il s'agissait, dans un second temps, de placer l'agriculteur « en situation » et d'explorer plus avant sa façon d'observer, de porter un diagnostic sur l'état de la parcelle. En somme, nous espérions lever les limites de l'entretien « en salle » évoquées dans la section 1.3.

Pour cet entretien, nous avons donc proposé aux agriculteurs de les accompagner sur leurs parcelles. Se présentent alors deux cas de figure :

(i) L'agriculteur avait prévu de se rendre sur ses parcelles pour faire des observations dans les jours qui suivent dans le but de déclencher une opération. On se rapproche alors des « conditions naturelles ». On se concentre d'abord sur les préoccupations du moment,

l'agriculteur est déjà en situation, on n'a pas besoin de lui demander de se projeter artificiellement dans une prise de décision. Pour les autres pratiques, celles qui ne sont pas d'actualité à cette période, on aide l'agriculteur à se mettre en situation avec des introductions du type : « *Si vous deviez... passer la herse... faire un apport d'azote..., que feriez-vous avant ?* »

(ii) L'agriculteur n'avait pas prévu de se rendre sur ses parcelles au moment de notre venue. On se place dans une situation pédagogique (« si j'étais votre stagiaire, comment m'expliqueriez-vous ce que vous êtes en train de faire ? ») et/ou dans une simulation de situation de travail. Pour cela, on a recours à des questions du type : « *Quelle sera votre prochaine intervention ? Si vous deviez passer la herse, que feriez-vous ? Si vous deviez m'apprendre à décider de déclencher telle intervention, que dois-je savoir/regarder pour prendre la décision ?* »

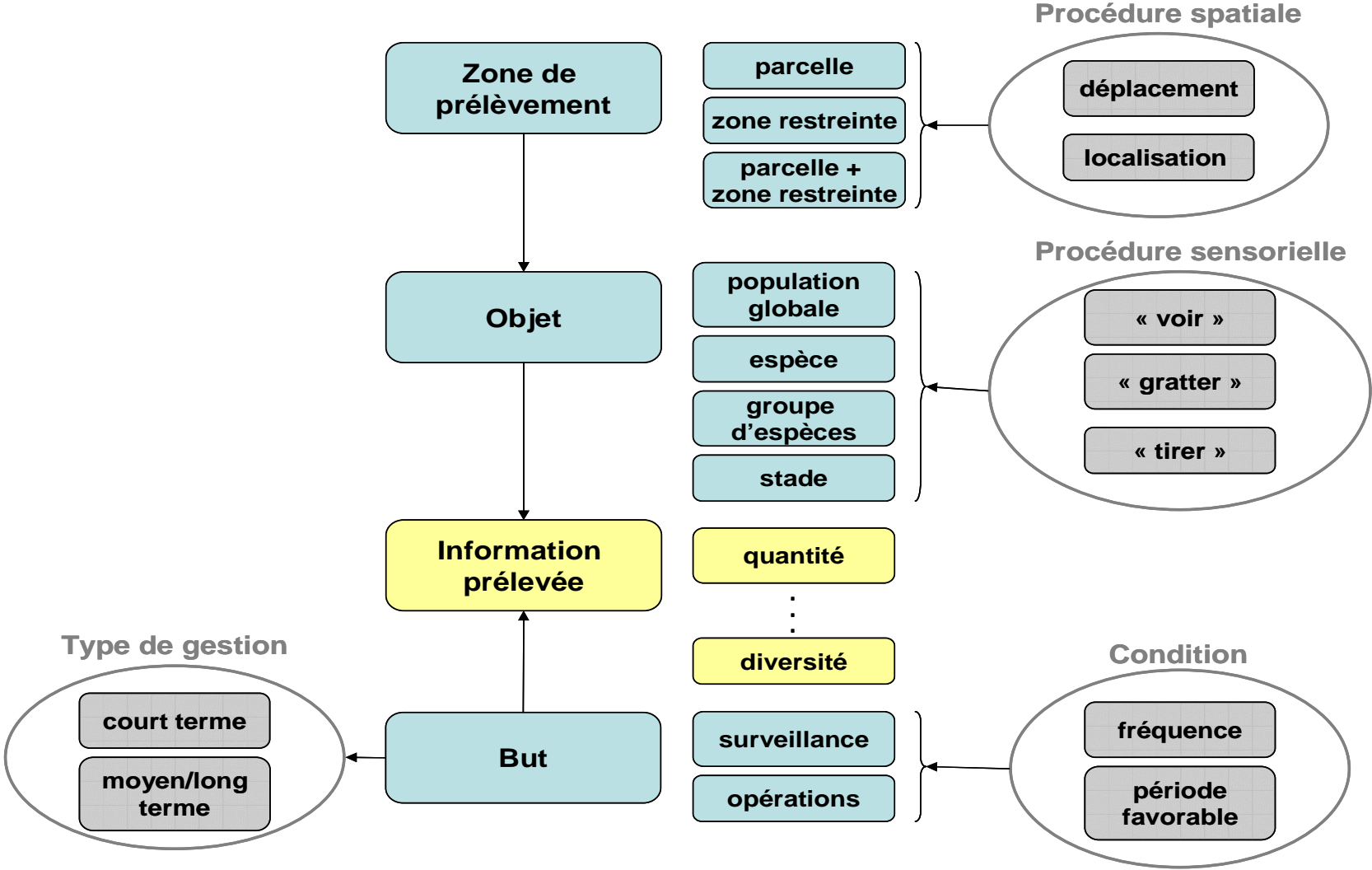
Pour préparer ces entretiens, nous avons repris les données recueillies lors de la première phase afin de préparer une fiche adaptée pour chaque agriculteur. Ces fiches contenaient une liste d'observations que l'agriculteur avait déclaré réaliser lors de l'entretien précédent. Elles nous ont donc servi de pistes de relances pour mener l'entretien. Pour inviter l'agriculteur à davantage expliciter sa façon d'observer et ses décisions, nous avons parfois eu recours à la comparaison entre parcelles : « *Pour vous, quelle est la différence entre ces parcelles du point de vue des adventices ?* ». Notons enfin, que certaines interventions ne pouvant avoir lieu à n'importe quel moment du cycle, nous avons été contraintes de demander aux agriculteurs de se placer dans la situation où ils auraient eu à décider d'une intervention (par exemple, pour la fertilisation ou le désherbage) alors que ce n'était pas le bon moment dans le cycle.

2.2. L'analyse des données recueillies

Pour analyser les données recueillies à l'aide des deux phases d'enquêtes que nous venons de décrire, nous nous référons au cadre conceptuel des environnements dynamiques et à une méthode d'analyse proposée par Hoc et Amalberti (1999) qui paraît adaptée à notre étude. Rappelons que selon ces auteurs, la construction de l'activité peut être répartie en trois phases : la prise d'information, le diagnostic et la décision d'intervention. Dans notre étude, nous nous intéresserons à la phase de prise d'informations.

La méthode que proposent Hoc et Amalberti (1999) permet de coder les données issues d'entretiens pour ensuite les analyser. Ils déroulent pour cela un « schème de codage » qui se présente comme un squelette que nous devons assortir de notions propres à notre domaine d'application. Pour chaque activité élémentaire (dans notre cas la prise d'information), ils distinguent des arguments qui correspondent à des variables dont la valeur spécifie une dimension de l'activité considérée. Dans leur schème de codage, à propos de l'élaboration de l'information, ils identifient trois classes différentes : (i) la prise d'information non interprétée, (ii) la gestion de la prise d'information et (iii) la récupération d'information en mémoire. Dans le cadre de notre analyse, nous nous intéresserons uniquement aux informations prélevées en situation.

Figure 4.3. Représentation du schème de codage utilisé pour coder les données recueillies lors des deux phases d'enquêtes



Pour ces informations, nous distinguerons huit arguments nous permettant de les caractériser. Ces arguments sont repris dans la figure 4.3., qui permet de mettre en évidence les liens entre eux :

Zone de prélèvement de l'information : ce sont les espaces physiques où a lieu le prélèvement de l'information. Ils correspondent à la parcelle, considérée dans sa globalité, ou à une zone restreinte dans la parcelle. Les zones restreintes correspondent à des zones connues pour leur forte infestation potentielle en adventices.

Procédure spatiale : la procédure spatiale se rapporte à la zone de prélèvement de l'information. A l'échelle de la parcelle, la procédure spatiale renseigne sur les déplacements effectués dans la parcelle ou sur le point de localisation de l'agriculteur pour prélever ses informations. A l'échelle des zones restreintes, cela correspond aux caractéristiques qui définissent les zones (exemple : zones sans cailloux) qui, de ce fait, localise la zone au sein de la parcelle.

Objet : l'objet correspond à ce qui est observé sur la zone de prélèvement de l'information. Dans notre cas, il peut s'agir soit de la population d'adventices dans sa globalité (« population globale »), soit d'une espèce particulière d'adventice, soit d'un stade de développement particulier des adventices.

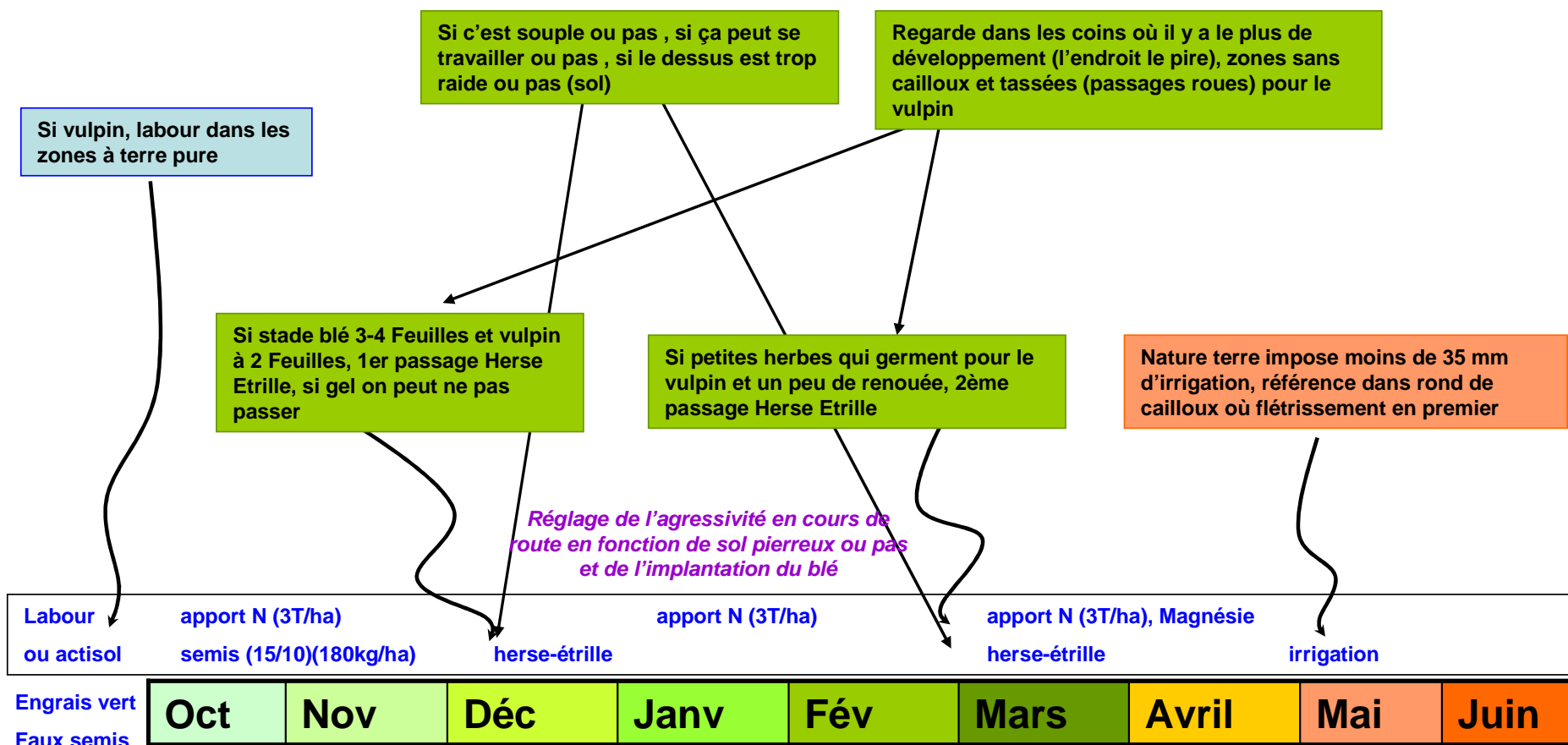
Procédure sensorielle : la procédure sensorielle se rapporte à l'objet observé. Pour chaque information prélevée, cela renseigne sur la manière dont l'agriculteur prélève l'information (en regardant, en touchant, en grattant, en tirant).

L'information prélevée : dans notre cas, cela correspond aux informations prélevées sur les objets, lesquelles renseignent sur son état. Ces informations peuvent être relatives (*e.g.* hauteur des adventices par rapport au blé, quantité par rapport au blé) ou absolues (*e.g.* stade, quantité, diversité d'espèces). La quantité correspond à une évaluation qualitative du nombre mais n'est jamais chiffrée (pas de comptage précis). La diversité des espèces correspond à l'identification d'espèces différentes.

But : ce sont les activités qui motivent la prise d'information. Elles peuvent être de surveillance, les informations prélevées servent alors à alimenter la représentation de l'environnement mais ne sont pas nécessairement mobilisées tout de suite pour agir. On peut opposer à ces activités de surveillance des activités qui seront effectuées rapidement après le prélèvement. L'information prélevée va servir alors (combinée à d'autres) à déclencher ou non une action telle que le désherbage ou la fertilisation.

Type de gestion : l'information prélevée va servir pour deux types de gestion. Elle peut servir pour la surveillance ou pour des opérations qui auront lieu plus tard (par exemple, le choix de la culture suivante) donc pour une gestion à moyen/long terme. Elle peut également être utilisée pour des opérations qui seront déclenchées rapidement après la prise d'information, elles sont alors mobilisées pour de la gestion à court terme. On regroupe dans la gestion à court terme toutes les opérations qui ont lieu lors du cycle du blé durant lequel on prélève

Figure 4.4. Itinéraire technique type pour l'agriculteur G, établi à la suite de la première phase d'enquêtes (pour les autres agriculteurs, se référer à l'annexe III).



N.B. L'azote apporté est du fumier de volailles

l'information. Le type de gestion est donc directement lié aux buts pour lesquels l'information est prélevée.

Condition : c'est la situation dans laquelle l'information est prélevée. Il peut s'agir d'une fréquence d'observation, dans le cas où le but visé est une activité de surveillance. Cela peut correspondre également à une période possible pour une action précise, comme le désherbage par exemple. Dans ce cas, cela correspond à la combinaison de différents facteurs : conditions météo favorables, gestion de la charge de travail, période adaptée par rapport au cycle du blé.

Les données recueillies au cours des deux phases d'enquêtes ont donc été codées selon le schème de codage suivant :

<zone de prélèvement de l'information>, <procédure spatiale>, <objet>, <procédure sensorielle>, <information prélevée>, <but>, <type de gestion>, <condition>

Par exemple, l'agriculteur A, lors de la première phase d'enquête a déclaré : « *si jamais j'ai des graminées dès le début du cycle, à ce moment-là, j'amènerai même pas d'azote du tout* ». Cette donnée a été codée de la façon suivante :

<parcelle>, <->, <graminées>, <voir>, <quantité>, <apport d'azote>, <court terme>, <début du cycle>.

On remarque donc que tous les arguments ne sont pas forcément renseignés à chaque fois que l'on code, car l'information n'est pas disponible (dans cet exemple, il manque l'information sur la procédure spatiale). Ici on fait également l'hypothèse que l'agriculteur se réfère à un état global de la parcelle, puisque ce n'est pas précisé.

3. Résultats

3.1. Les résultats des premières enquêtes : caractéristiques des exploitations et itinéraires techniques types

Le premier résultat de cette série d'entretiens est que tous les agriculteurs enquêtés prélèvent des informations relatives aux adventices sur leurs parcelles, ce qui était un présupposé de notre étude. De plus, cette première phase nous a permis de dégager des caractéristiques générales des exploitations agricoles telles que la date de conversion à l'agriculture biologique, l'insertion technico-économique, la part de SAU cultivée en blé, (voir Tab. 4.1.).

Ces enquêtes nous ont également permis d'identifier les itinéraires techniques types mis en œuvre par chacun des agriculteurs sur leur culture de blé. L'objectif était d'obtenir une vision globale de l'itinéraire technique suivi en blé qui ne contienne pas uniquement les opérations nécessitant le prélèvement d'informations relatives aux adventices. La figure 4.4. illustre l'itinéraire technique type de l'agriculteur G. Les itinéraires techniques des autres agriculteurs sont disponibles en annexe (Annexe III). Ces schémas nous donnent une idée des règles d'action qui régissent le déclenchement des opérations chez ces agriculteurs et mettent en

évidence les informations relatives aux adventices qui sont prélevées pour prendre des décisions. Néanmoins, ces enquêtes n'ayant pas pour objectif de décrire finement ces règles, les résultats obtenus ne se veulent pas exhaustifs.

Ces premiers résultats nous ont permis de préparer la phase d'enquête suivante, et notamment d'avoir une idée des règles d'actions pour pouvoir aider les agriculteurs à se mettre en situation de prise de décision pendant l'enquête en parcelle. De plus, nous avons identifié les informations qui nous intéressaient afin de les compléter si besoin lors de la seconde phase. Globalement, les résultats de cette phase nous ont guidés pour mener à bien la phase suivante.

Les résultats de cette première phase ont été codés d'après le schème de codage présenté précédemment. Les résultats issus de ce traitement sont présentés conjointement avec ceux issus de la seconde phase qui sont codés avec le même schème.

3.2. Diversité des valeurs prises par les arguments

3.2.1. Zone de prélèvement de l'information et procédure spatiale

La « **zone de prélèvement de l'information** » peut être de 3 types : la parcelle dans sa globalité, une ou des zone(s) restreinte(s) connues de l'agriculteur comme particulièrement infestée(s) ou la parcelle globalement et une ou des zone(s) restreinte(s) connue(s). Cela signifie que l'information a été observée soit au niveau d'une petite zone, soit au niveau de la parcelle globalement, soit au niveau des deux.

La « **procédure spatiale** » renseigne sur la manière dont l'information est prélevée sur la parcelle c'est-à-dire qu'elle peut correspondre à un ordre dans lequel les déplacements sont effectués, au lieu de prélèvement de l'information ou aux caractéristiques du lieu de prélèvement (notamment pour les zones restreintes). La procédure spatiale prend donc des valeurs différentes selon qu'elle se rapporte à la parcelle, à une zone restreinte ou à la combinaison parcelle et zone(s) restreinte(s).

Les zones restreintes correspondent à des zones connues des agriculteurs pour leur potentiel élevé en adventices. En effet, ici nous nous intéressons aux informations prélevées sur les adventices, par conséquent nous ne nous intéressons pas aux zones sur lesquelles uniquement des informations relatives à l'état du blé sont collectées. Ces zones deviennent le lieu de prélèvement d'informations utilisées pour déclencher des opérations qui visent à limiter la population en adventices (désherbage mécanique, faux-semis, labour) ou pour surveiller l'évolution de la population d'adventices. Ces zones sont définies comme potentiellement plus infestées selon des critères qui diffèrent d'un agriculteur à l'autre, leur localisation variant donc selon l'opérateur. Les différentes procédures spatiales associées aux zones restreintes dans l'échantillon d'agriculteurs enquêtés sont les suivantes, certains agriculteurs observant plusieurs types de zones témoins différentes :

- *les zones connues comme infestées*. L'agriculteur se réfère à sa connaissance de la répartition spatiale des mauvaises herbes dans la parcelle d'une année sur l'autre. Il fait alors appel à ses connaissances en mémoire (agriculteurs D, G et H).
- *les zones séchantes de la parcelle*, avec des cailloux. Elles sont considérées comme les plus infestées pour un des agriculteurs enquêtés (agriculteur A).
- *les zones de passage de roues*, plus tassées et sans blé. Dans ces zones, la population d'adventices est « en avance » par rapport au reste de la parcelle. D'une part, il n'y a pas de compétition entre adventices et blé, les adventices se développent *a priori* plus vite que dans le reste de la parcelle. D'autre part, les zones tassées peuvent favoriser l'émergence des adventices (Jurik et Zhang, 1999). Ces zones donnent donc une idée du potentiel d'infestation. (agriculteurs B, E, G et H)
- *les zones sur le tour de la parcelle*, tassées (car soumises à plus de passages d'engins agricoles). Elles sont considérées comme potentiellement plus infestées par un des agriculteurs (agriculteur C).
- *les zones sans blé* (un des agriculteurs ajoute également que ce sont des zones de « terre pure, sans cailloux »). Ces zones sans culture sont dues à un problème de semis ou à une mauvaise levée qui a empêché le développement de la culture. Il n'y a donc pas de compétition entre culture et adventices sur ces zones qui peuvent donc révéler le potentiel d'infestation des adventices (agriculteur H).
- *les zones entre les rangs de blé*. Ces zones sont observées pour évaluer la population de folle avoine (*Avena fatua* L.) pour un des agriculteurs (agriculteur B).
- *les zones sur les rangs de blé*. Elles sont observées pour évaluer la population de vulpin (*Alopecurus myosuroides* H.). En effet, les graminées se trouvent souvent dans les rangs de blé car elles bénéficient du lit de semence réalisé pour la culture de blé. Elles entrent en compétition avec la culture, y compris sur les rangs, grâce à convergence de forme (par comparaison, les dicotylédones sont moins adaptées à une concurrence « rapprochée », et s'établissent plutôt entre les rangs) (agriculteur G).

A l'échelle de la parcelle, parmi les agriculteurs enquêtés, les procédures spatiales suivantes ont été évoquées :

- observation à pied, depuis l'angle de la parcelle (agriculteur D),
- observation depuis la voiture ou le tracteur, l'agriculteur ne rentre pas dans la parcelle (agriculteur E),
- observation depuis les bords de la parcelle puis en travers de la parcelle (agriculteurs C et F).

Lorsqu'il y a prélèvement d'information à la fois à l'échelle de la parcelle et des zones restreintes, c'est-à-dire à une échelle assez large puis à une échelle plus fine, les procédures spatiales sont les suivantes :

- observation du tour de la parcelle et des zones restreintes connues comme habituellement infestées en adventices (agriculteur D),
- observation en passant en travers de la parcelle puis des zones restreintes et notamment les zones de passages de roues (agriculteur B).

3.2.2. Objet et procédure sensorielle

L'« **objet** » correspond à ce qui est étudié au niveau de la zone de prélèvement. C'est la variable sur laquelle l'agriculteur prélève l'information. Elle peut être de plusieurs types :

- la population globale d'adventices considérée dans son ensemble sans distinctions particulières (tous les agriculteurs s'intéressent à cet objet),
- un type particulier d'adventices : une espèce (par exemple, le vulpin ou la folle avoine) ou une famille d'espèces (par exemple, les graminées) (objets considérés par tous les agriculteurs sauf l'agriculteur F),
- un certain stade d'adventices. Dans notre échantillon, certains agriculteurs différencient les « filaments », qui correspondent aux radicules issues de la germination des graines d'adventices (objet considéré par les agriculteurs B, D, E et H).

La « **procédure sensorielle** » correspond à la manière dont l'information est prélevée. Plus exactement, cela se réfère au sens mobilisé ou à l'action réalisée pour prélever l'info. Il peut être de trois types :

- « voir » : c'est le fait de regarder la variable qui intéresse l'agriculteur (tous les agriculteurs).
- « tirer » : cela correspond au fait d'essayer d'arracher à la main ou avec le pied les adventices pour tester leur enracinement (agriculteurs A, B, C, D et F).
- « gratter et voir » : c'est le fait de gratter le sol avec la main pour y déterrer des « filaments » d'adventices et ensuite les observer (agriculteurs B, D et E).

3.2.3. But, type de gestion et condition

Chaque information est prélevée ou se trouve associée, dans un « **but** » particulier. Cela suppose que l'agriculteur prélève l'information avec un objectif précis et défini *a priori*. Cette information peut être utilisée pour agir à court terme (par exemple, pour une action de désherbage à venir) ou à moyen/long terme (pour une activité de surveillance, mais aussi pour une action qui aura lieu plus tard telle que le choix de la culture suivante). Cela correspond au « **type de gestion** ». Dans le cadre des actions situées, ce prélèvement d'informations a lieu à un moment particulier, c'est la « **condition** ».

On peut distinguer deux types de buts : des buts de surveillance et des buts d'action. Lorsqu'il s'agit de déclencher des actions (*e.g.* désherbage, apport d'azote), l'information prélevée est associée à d'autres informations prélevées en même temps, ou combinée à des informations déjà en mémoire et permet une gestion à court terme. L'information prélevée dans les activités de surveillance n'est pas utilisée immédiatement mais mise en mémoire pour alimenter le référentiel, soit pour une pratique à venir dans le cycle (gestion à moyen terme), soit pour alimenter le référentiel pour les années suivantes (gestion à long terme). Cela correspond aux différents niveaux d'abstraction de la représentation évoqués par Hoc et Amalberti (1999) et représentés sur la figure 4.1. Cette information est donc impliquée dans une gestion à moyen/long terme.

Le moment du prélèvement des observations de surveillance n'est pas souvent précisé, probablement car la surveillance est rarement préméditée. Néanmoins, des indications sur la fréquence de prélèvement de ce type d'informations sont parfois disponibles, elles correspondent alors à la « condition » associée au but de surveillance. Parmi les buts d'action, on distingue les pratiques suivantes : l'apport d'azote de printemps, le choix de la culture suivante, le type de déchaumage, le désherbage mécanique pendant la culture (herse-étrille), l'écimage⁵, le faux-semis et le labour. Toutes ces actions nécessitent le prélèvement d'informations relatives aux adventices et impliquent que les agriculteurs se rendent sur leurs parcelles pour les prélever. Cela relève de la planification : l'agriculteur veut réaliser une action et dans ce but, il va prélever de l'information

Souvent, le fait de prélever ou non l'information dépend de la période. En effet, si une période est favorable à la réalisation de l'action, alors l'information va être prélevée. Parfois l'action est déclenchée sans prélèvement d'information au moment de sa mise en œuvre, soit car les conditions de réalisations sont favorables, soit parce que l'information prélevée antérieurement est remobilisée (mais ce cas ne nous intéresse pas directement ici). Cette période favorable correspond à la combinaison d'un « intervalle de temps autorisé » qui prend en compte la disponibilité vis-à-vis des autres chantiers sur l'exploitation (correspondant soit à des dates calendaires, soit à un stade de la culture) et des « conditions de faisabilité » qui se rapportent plutôt à des conditions météorologiques (Chatelin *et al.*, 2004). La « condition » pour la réalisation d'une pratique correspond donc fréquemment à une période favorable à la réalisation de la pratique.

3.2.4. Les informations prélevées

Les informations relatives aux adventices prélevées par les agriculteurs peuvent être de natures différentes. Ces informations se rapportent à l'objet sur lequel elles sont prélevées (population globale, espèce, groupe d'espèce ou stade). Dans l'échantillon enquêté, nous avons identifié onze informations différentes, certaines étant absolues, d'autres étant relatives à la culture de blé :

- la date de levée des adventices par rapport au blé,
- le développement des adventices,
- la diversité des espèces d'adventices,
- l'enracinement des adventices,
- la hauteur absolue des adventices,
- la quantité, qui ne correspond pas à un nombre d'adventices mais à une appréciation non chiffrée,
- le stade des adventices,
- la surface du sol recouverte par les adventices,

⁵ **Ecimage** : opération culturale qui consiste à couper les adventices qui dépassent en hauteur de la culture de blé avant d'éviter qu'elles produisent des graines

Tableau 4.2. Présentation des informations prélevées par les agriculteurs, et du nombre et de la fréquence des arguments qui leur sont associés.

	Part d'agriculteurs qui citent l'information	Procédure sensorielle associée la plus fréquente	Zone de prélèvement la plus fréquente	Nombre d'objets différents associés	Objet associé le plus fréquent	Nombre de buts différents associés	But associé le plus fréquent	Type de gestion le plus fréquent
date levée/blé	13%	voir	-	1	-	1	-	-
développement	38%	voir	zone restreinte	1	population globale	2	surveillance	moyen/long terme
diversité	100%	voir	parcelle = zone restreinte	1	population globale	3	surveillance	moyen/long terme
enracinement	63%	tirer	parcelle	1	population globale	2	désherbage	court terme
hauteur	63%	voir	parcelle	2	population globale	3	désherbage	court terme
hauteur/blé	25%	voir	-	2	-	2	-	-
nb/nb pieds blé	13%	voir	-	1	-	1	-	-
quantité	100%	voir	parcelle	6	population globale	7	désherbage	court terme
stade	63%	voir	zone restreinte	2	population globale	3	désherbage	court terme
surface	25%	voir	-	1	population globale	2	-	-
volume	13%	voir	-	1	-	1	-	-
Toutes informations confondues	-	voir	parcelle ≈ zone restreinte	7	population globale	8	désherbage	-

« - » : signifie que la donnée n'est pas pertinente car la fréquence a peu d'intérêt pour un nombre inférieur ou à égal à deux

- le volume (estimation à la fois de la surface, de la hauteur et de la biomasse potentielle),
- la hauteur des adventices par rapport à celle du blé,
- le nombre estimé d'adventices par rapport au nombre de pieds de blé.

Les informations les plus fréquemment prélevées par les agriculteurs sont la quantité et la diversité (citées par 100% des agriculteurs) (Tab. 4.2.). Le stade, la hauteur et l'enracinement sont également fréquemment utilisés (cités par 62,5% des agriculteurs). Dans la suite de ce travail, on s'intéressera plus particulièrement à la quantité et à la diversité qui sont les informations les plus fréquentes.

3.3. Comment les informations prélevées sont-elles associées aux différents arguments ?

Quelle que soit l'information, l'objet le plus fréquemment associé est la population globale (Tab. 4.2.). Cela n'exclut pas que les agriculteurs prélèvent également leurs informations sur des groupes d'espèces, des espèces ou de stades particuliers. Les groupes d'espèces ou les espèces qui sont différenciées sont : les chardons, les chénopodes, la folle avoine, le vulpin et les graminées. Ces espèces ont la particularité d'être invasives et difficilement contrôlables. L'information prélevée se rapporte donc rarement à un type d'adventices précis (groupe d'espèces, espèces ou stades) et les adventices sont, le plus souvent, considérées dans leur ensemble. La principale procédure sensorielle mise en œuvre est le fait de « voir » (Tab. 4.2.). En effet, elle est mobilisée pour quasiment toutes les informations prélevées, sauf pour l'enracinement qui nécessite de « tirer ». Le fait de « tirer » est essentiellement associé au désherbage, car il permet de juger de la potentielle efficacité de celui-ci. Notons que dans le cas où l'objet correspond à des filaments, la procédure sensorielle associe « gratter » et « voir ». De plus, l'information prélevée le plus fréquemment, quelle que soit la zone d'observation (parcelle ou zones restreintes), est la quantité (Tab. 4.3.).

3.3.1. Procédures spatiales et conditions de prélèvement des informations

Les informations sur les procédures spatiales ne sont pas toujours renseignées car nous n'avons pas systématiquement interrogé les agriculteurs sur ces procédures. Cependant, on peut noter qu'à l'échelle de la parcelle, on recense trois types de procédures spatiales : par les bords puis en travers (2 agriculteurs), depuis l'angle de la parcelle (1 agriculteur) et depuis la voiture ou le tracteur (1 agriculteur). Lorsqu'on passe à l'échelle parcelle et zones restreintes, il y a deux types de procédures : faire le tour puis aller aux zones restreintes (1 agriculteur), regarder globalement puis aller aux zones restreintes, notamment les passages de roues (1 agriculteur). On remarque donc que les procédures sont assez spécifiques de chacun des agriculteurs. Néanmoins, lorsqu'il s'agit de regarder la parcelle et les zones restreintes, on retrouve le même comportement, à savoir, dans un premier temps une vision globale, puis l'agriculteur observe plus en détail au niveau des zones restreintes.

Tableau 4.3. Nombre d'informations différentes et information la plus fréquente en fonction de la zone d'observation

	Nombre d'informations différentes	Information la plus fréquente
parcelle	10	quantité
zone restreinte	8	quantité

Tableau 4.4. Nombre d'informations différentes, information la plus fréquente et zone de prélèvement associée la plus fréquente en fonction des buts pour le réseau d'agriculteurs échantillonné.

	Nombre d'informations différentes	Information la plus fréquente	Zone de prélèvement associée la plus fréquente
Apport d'azote	1	quantité	parcelle
Choix de la culture suivante	6	quantité	parcelle
Désherbage mécanique	8	quantité	parcelle = zone restreinte
Ecimage	1	hauteur/blé	parcelle
Faux-semis	1	quantité	parcelle
Labour	1	quantité	zone restreinte
Déchaumage	1	quantité	parcelle
Surveillance	8	quantité	zone restreinte

Tableau 5.5. Combinaison des informations prélevées en fonction des buts pour l'ensemble des agriculteurs enquêtés.

	apport azote	choix culture suivante	désherbage	écimage	faux-semis	labour	déchaumage	surveillance
date levée/blé			X					
développement			X					X
diversité des espèces		X	X					X
enracinement			X					X
hauteur		X	X					X
hauteur/blé				X				X
nb/nb pieds blé								X
quantité	X	X	X		X	X	X	X
stade		X	X					X
surface recouverte		X	X					
volume		X						

Pour ce qui est des moments où l'information est prélevée, les informations relatives à des pratiques sont prélevées en général dans les périodes favorables à la réalisation de la pratique. A cet effet, un des agriculteurs précise une date à partir de laquelle il commence à observer (agriculteur A). Seuls trois agriculteurs donnent des précisions sur leur fréquence d'observation lorsqu'ils ont des activités de surveillance : une fois par semaine (agriculteur H), tous les 10 à 15 jours (agriculteur B), ou à chaque fois qu'il va sur la parcelle (agriculteur G). D'autres donnent des informations sur une date limite d'observation, à partir de laquelle ils jugent ne plus avoir d'intérêt à surveiller (agriculteurs C et H). Globalement, lorsque la fréquence est indiquée, on peut dire qu'elle est assez élevée. Il semble que les enquêtes n'aient pas permis de bien renseigner ces indications de fréquence.

3.3.2. Informations prélevées en fonction des buts

On remarque que certaines informations se rapportent plus spécifiquement à certains buts que d'autres car le nombre de buts pour lesquels elles sont mobilisées est réduit (Tab. 4.2.). Par exemple, l'enracinement et la hauteur ne sont mobilisés que pour deux ou trois buts différents. L'enracinement est mobilisé surtout pour le désherbage mais aussi pour la surveillance. La hauteur est mobilisée pour le désherbage surtout, mais aussi pour le choix de la culture suivante et pour la surveillance. De plus, ces informations sont souvent prélevées par les agriculteurs (62,5 % des agriculteurs). Elles sont donc assez spécifiques puisqu'elles sont associées à un nombre réduit de buts et, dans les deux cas, le but associé le plus fréquent est le désherbage. On peut alors considérer ces informations comme spécifiques au désherbage. Par opposition, l'information quantité est mobilisée pour sept buts différents (la fertilisation, le choix de la culture suivante, le déchaumage, le désherbage, le faux-semis, le labour et la surveillance), tout en étant citée par 100 % des agriculteurs. Cela montre que cette information peut être utilisée pour des buts différents et par tous les agriculteurs, c'est donc l'information la plus générique. Cette information est utilisée de façon différente selon les buts, elle est alors prélevée à des moments différents du cycle et donc dans des conditions différentes, puis combinée à d'autres informations, pour déclencher différentes opérations. Par exemple, elle peut être prélevée pendant la période favorable au désherbage ou pendant la période favorable à l'apport d'azote

On peut faire l'hypothèse qu'en fonction du type de but, surveillance ou déclenchement de pratiques, les observations se font davantage sur certaines zones d'observation. Les données recueillies lors des enquêtes montrent que les activités de surveillance se font surtout sur les zones restreintes tandis que le déclenchement de pratiques mobilise l'observation de l'ensemble de la parcelle combinée parfois à l'observation des zones restreintes (Tab. 4.4.). Le fait que les activités de surveillance se réalisent surtout dans les zones restreintes s'inscrit dans une logique d'économie de temps passé sur la parcelle. En effet, en allant directement sur les zones restreintes, l'agriculteur utilise les informations pour se représenter l'état général de la parcelle et garde cette information en mémoire pour alimenter sa représentation de la situation. Notons que les zones restreintes vont indiquer un état d'infestation maximal qui

Tableau 4.6. Informations prélevées en fonction des agriculteurs

Agriculteur	Nombre d'informations différentes	Information la plus fréquente	Type de gestion le plus fréquent	Nombre d'informations différentes prélevées sur la parcelle	Nombre d'informations prélevées sur les zones restreintes	Nombre d'informations prélevées sur la parcelle et les zones restreintes
A	5	quantité	court terme	2	5	0
B	7	quantité	moyen/long terme	7	4	4
C	5	quantité	moyen/long terme	5	1	0
D	5	quantité	court terme	6	4	2
E	3	quantité	court terme	3	3	0
F	5	-	court terme	5	0	0
G	3	stade=quantité	court et moyen/long terme	2	3	0
H	4	quantité	court terme	3	5	0

permet à l'agriculteur d'anticiper sur la gestion du risque (ce sont en quelque sorte des pratiques d'assurance).

Pour l'apport d'azote, le faux-semis, le labour et le déchaumage, la seule information mobilisée est la quantité et pour l'écimage seule la hauteur par rapport au blé est utilisée (Tab. 4.4. et 4.5.). Sous réserve que les autres conditions permettant la mise en œuvre de ces pratiques soient remplies, le déclenchement ne nécessite pas la combinaison de plusieurs informations relatives aux adventices. En revanche, pour le choix de la culture suivante, le désherbage et la surveillance, six à huit informations différentes peuvent être prélevées (Tab. 4.4. et 4.5.). Le tableau 4.5. montre que ces buts nécessitent la combinaison d'indicateurs différents, ces combinaisons étant variables d'un agriculteur à l'autre. Globalement, ces trois buts nécessitent le prélèvement d'un plus grand nombre d'informations que les pratiques citées précédemment.

3.3.3. Informations prélevées en fonction des agriculteurs

Quel que soit l'agriculteur considéré, la quantité est toujours l'information citée le plus fréquemment, même si cette information partage parfois cette première place avec d'autres informations (Tab. 4.6.). On remarque également que le nombre d'informations différentes recueillies varie d'un agriculteur à l'autre (Tab. 4.6.). En effet, certains agriculteurs n'utilisent que trois informations alors que d'autres en consultent jusqu'à sept. Il n'est pas impossible que cette différence soit liée à un biais de l'enquête et que certains agriculteurs aient été plus poussés à exprimer des informations différentes. Néanmoins, il est possible que les agriculteurs n'aient pas recours aux mêmes types et nombres d'informations pour réactualiser leur représentation de l'environnement. On peut alors distinguer trois types d'agriculteurs, ceux qui observent très peu sur des zones témoins (agriculteurs C et F), ceux qui observent surtout sur les zones restreintes (agriculteurs A et H), et ceux qui observent indifféremment à l'échelle de la parcelle et des zones restreintes (agriculteurs B, D, E et G). On suppose alors que, pour les agriculteurs qui prélèvent surtout à l'échelle de la parcelle, la prise d'information sera moins coûteuse en temps que pour ceux qui entrent dans la parcelle pour accéder aux zones restreintes.

Il est également intéressant de regarder si la combinaison des informations prélevées pour chacun des buts diffère d'un agriculteur à l'autre. Nous nous intéressons ici plus particulièrement aux opérations qui jouent directement sur la population d'adventices (faux-semis et désherbage) ainsi qu'aux activités de surveillance (nous excluons ici l'écimage qui est une pratique mise en œuvre par un seul agriculteur dans l'échantillon). Le tableau 4.7. présente les informations que combinent les agriculteurs pour chacune de ces actions.

En ce qui concerne la pratique de désherbage, nous identifions trois types d'agriculteurs (Tab. 4.7.a.). Un premier groupe (agriculteurs B et C), ne mobilise qu'une seule information : l'enracinement ou le stade. Ces deux agriculteurs semblent s'intéresser surtout à l'évaluation

de l'efficacité potentielle de leur désherbage mécanique. On distingue un second groupe (agriculteurs A, F et D) qui s'intéresse également à l'efficacité du désherbage mécanique (enracinement et/ou stade) mais aussi à l'évaluation de la concurrence entre la culture et les adventices via des informations telles que la hauteur, le développement ou la quantité. Notons que l'agriculteur D évalue encore plus finement la population puisqu'il s'intéresse également à la diversité des espèces présentes. Enfin, les agriculteurs E, G et H constituent un troisième groupe qui ne semble pas évaluer l'efficacité du désherbage via des informations comme le stade et l'enracinement, mais qui s'intéresse globalement à la population d'adventices via la quantité et la diversité.

Pour la pratique de faux-semis, tous les agriculteurs, ayant répondu pour cette pratique, privilégient l'information « quantité » (pour l'objet « filaments » surtout, sauf pour l'agriculteur H, qui s'intéresse aux graminées) (Tab. 4.7.b.). Pour cette pratique, les agriculteurs ne combinent pas différentes informations relatives aux adventices (ce qui n'exclut pas qu'ils utilisent des informations relatives à d'autres variables telles que les conditions climatiques par exemple).

Les informations prélevées pour la surveillance se combinent différemment selon les agriculteurs (Tab. 4.7.c.). L'agriculteur D ne semble pas prélever d'informations pour la surveillance, du moins, les enquêtes ne les ont pas fait apparaître. L'agriculteur F, quant à lui, ne regarde que la diversité pour se représenter l'état de sa parcelle lorsqu'il ne prend pas de décision de déclenchement de pratiques. Les agriculteurs E et G combinent diversité et quantité (l'agriculteur G regarde également le stade des adventices) : leur représentation de la parcelle est alimentée à l'aide de peu d'informations. En revanche, les agriculteurs A, B, C et H prélèvent plus d'informations : à la diversité et la quantité s'ajoutent des informations qui expriment la concurrence entre le blé et les adventices telles que la hauteur ou le nombre d'adventices par rapport au nombre de pieds de blé. Ces agriculteurs actualisent la représentation de leur parcelle à la fois en s'attardant sur la population d'adventices (quantité et diversité) mais aussi en se représentant la concurrence entre culture et adventices.

Ces combinaisons d'informations prélevées permettent de donner des pistes pour ce qui est de la description des règles d'action des agriculteurs. Néanmoins, il est évident que les informations sur les adventices seules ne sont pas suffisantes pour déclencher des pratiques et qu'elles sont également combinées à d'autres informations (état du blé, état du sol, conditions climatiques, concurrence avec d'autres chantiers, etc.).

3.4. Les informations les plus mobilisées par les agriculteurs : la quantité et la diversité

3.4.1. La quantité

Comme nous l'avons vu précédemment cette information est la plus générique car elle est citée par tous les agriculteurs et associée à sept buts différents (voir section 3.3.2.). Le but le plus fréquemment associé est le désherbage (Tab. 4.5.). Cette information est plus souvent

associée à des déclenchements de pratiques et donc à de la gestion à court terme (Tab. 4.2.) qu'à de la surveillance.

De plus, quel que soit le but visé, la quantité est l'information qui revient le plus fréquemment (Tab. 4.4.). Cependant, le fait qu'il y ait plusieurs buts associés à une même prise d'information montre bien qu'il n'y a pas de bijection entre information et action dans le cas de l'échantillon observé. Cette information est plus souvent observée à l'échelle de la parcelle que sur les zones restreintes. La quantité peut se rapporter à six objets différents (chardon, vulpin, filaments, folle avoine, graminées et population globale), mais est principalement évaluée pour la population globale. Cette information est prélevée par la vue quel que soit l'objet, sauf dans le cas des filaments, où la vue est alors associée au « gratter ». Enfin, elle est prélevée à différents moments du cycle du blé, notamment à chaque fois qu'une pratique doit être déclenchée et que cette information est requise, mais également dans les situations de surveillance, donc potentiellement à chaque fois que l'agriculteur se rend sur sa parcelle pour observer les adventices. Cette information est donc prélevée et actualisée régulièrement mais elle reste tout de même sujette à la subjectivité puisqu'elle ne correspond pas à des pratiques de comptage.

3.4.2. La diversité des espèces

La diversité est citée par tous les agriculteurs enquêtés (Tab. 4.2.). Elle est prélevée aussi bien au niveau de la parcelle qu'au niveau des zones restreintes, et le plus souvent, sur l'objet « population globale ». Elle est prélevée en lien avec trois buts différents (le choix de la culture suivante, le désherbage et la surveillance) (Tab. 4.5.). Le but le plus fréquent est la surveillance, et par conséquent, le type de gestion le plus fréquemment associé est la gestion à moyen/long terme. Cette information permet également de choisir la culture suivante. Ce choix conditionne ensuite les techniques de travail du sol appliquées en interculture qui peuvent permettre de lutter contre les adventices. Le fait que le but le plus souvent associé soit la surveillance montre que c'est une information qui sert principalement à alimenter la représentation que l'agriculteur se fait de sa parcelle.

3.4.3. Comparaison quantité et diversité des espèces

Ces deux informations sont citées par tous les agriculteurs. Cependant, alors que la quantité est surtout évaluée à l'échelle de la parcelle, l'identification des espèces a lieu autant sur les zones restreintes que sur la parcelle. Cela est certainement dû au fait que les agriculteurs connaissent les zones dans leurs parcelles qui sont susceptibles d'avoir certaines espèces particulières. Ils vont donc vérifier, dans ces zones à risques plus élevés, la présence ou non des espèces qu'ils redoutent. Notons que la quantité est une information qui est utilisée pour presque tous les types de buts répertoriés, alors que la diversité est évoquée seulement pour trois buts différents. La quantité est donc une information moins spécifique et plus générique. Enfin, la quantité est une information qui reflète bien l'état général de la parcelle puisqu'elle permet de déclencher surtout des pratiques de désherbage. Pour la diversité, la surveillance

étant le but principal, cela signifie que cette information est mise en mémoire et sera ensuite utilement remobilisée lors des observations suivantes, ou lors des prises de décision suivantes. Ces deux informations ne sont donc pas prélevées dans le même but. La diversité des espèces présentes aide donc moins que la quantité à déclencher des pratiques. Cela laisse présager de leur complémentarité et suggère qu'elles n'ont pas la même temporalité. La quantité est prélevée pour des actions à court terme alors que la diversité servira plutôt à la gestion à moyen/long terme.

4. Discussion

4.1. Surveiller, alerter, agir : quelles compétences développées et quelles informations prélevées dans l'action ?

Les résultats obtenus ont montré que la prise d'informations pour les agriculteurs enquêtés pouvait constituer une activité en soi lorsque cette prise d'informations est liée à une activité de surveillance. Travaillant en situation d'environnement dynamique et confronté à de nombreuses incertitudes, l'agriculteur doit pouvoir actualiser sa représentation de la parcelle. Il décide, à certains moments, de prélever de l'information dans ce but. Ceci rejoint les analyses d'Arrow (1974, cité par Le Moigne, 1979) qui distingue deux types de décisions : « les décisions d'agir concrètement et les décisions de réunir de l'information ». Dans notre cas, cela correspond respectivement aux décisions de déclenchement de pratiques et aux activités de surveillance. L'accent mis dans notre analyse sur l'intention de l'agriculteur va dans le sens des théories de la planification puisqu'il suggère que l'opérateur décide à l'avance de ce qu'il veut faire. Cela s'oppose en partie à la vision de Suchman (1990) pour qui « l'homme n'agit pas par rapport à un plan » mais c'est dans le contexte qu'il planifie. Dans notre cas, il est possible que les agriculteurs décident de prélever – et d'interpréter – des informations, une fois qu'ils sont sur la parcelle afin d'accorder au mieux leur activité aux circonstances. Dans le cadre de notre étude, nous avons observé que, parfois, l'agriculteur veut savoir s'il peut/doit réaliser une opération (par exemple, désherber en passant la herse-étrille). Dans ce cas, il va observer dans ce sens et anticiper la date à laquelle il interviendra et éventuellement préparer les réglages de son intervention technique. Parfois, il visite ses parcelles en routine et c'est la situation qu'il observe qui l'amène à prendre des décisions. L'agriculteur fait donc appel à des informations qui ont valeur d'« indicateur d'alerte ». Ces informations reflètent un état de la parcelle que l'agriculteur, selon les circonstances, traduit en action immédiate (déclenchement de pratique) ou garde en mémoire pour des actions futures ou simplement pour actualiser la représentation de sa parcelle.

D'après Leplat (1995), dans l'analyse de l'activité, il est souvent difficile d'accéder à des commentaires des opérateurs sur leurs « compétences incorporées », qu'il définit comme des compétences qui s'expriment bien dans l'action mais moins bien ou pas du tout par le discours. Le prélèvement d'informations par les agriculteurs relève de ce type de compétences,

difficilement verbalisables et que, par conséquent, nous avons eu du mal à faire expliciter et qui ont nécessité une phase spécifique d'entretiens sur les parcelles, en situation. Par exemple, nous avons eu du mal à faire expliciter la notion de quantité d'adventices : l'appréciation de cette quantité par les agriculteurs peut donc être qualifiée de « compétence incorporée ». Au cours de l'acquisition de ces compétences incorporées, l'activité est réorganisée entraînant l'allègement de la charge de travail (Leplat, 1995). La notion de compétence incorporée est à rapprocher de l'analyse de Gibson (1977), pour qui l'action procède d'indices perceptuels directs situés dans l'environnement, qu'il nomme « affordances ». Ces indices permettent de se dispenser d'un passage par une réactualisation de la représentation de l'environnement et par un raisonnement pour prendre des décisions. L'agriculteur s'appuie alors sur son savoir-faire ainsi que sur ses habitudes d'action pour agir et fait ainsi des économies cognitives. L'agriculteur H, qui est en phase d'acquisition « par l'action » de ses compétences incorporées, n'est pas encore dans cette phase qui lui permet de faire des économies cognitives. Néanmoins dans quelques années, il aura acquis ces compétences qui lui permettront d'alléger ses raisonnements et probablement ses activités de prise d'informations.

4.2. Relation entre les informations prélevées et les caractéristiques des exploitations agricoles

Nous avons montré précédemment qu'il existait une diversité de combinaison des informations en fonction des agriculteurs (voir section 3.3.4.). Nous supposons que le nombre d'informations prélevées et leurs combinaisons peuvent s'expliquer par des caractéristiques propres au fonctionnement des exploitations agricoles. En ce qui concerne l'activité de surveillance, nous avons identifié trois groupes d'agriculteurs : ceux qui ne prélevaient pas ou peu d'informations (agriculteurs D et F), ceux qui s'intéressaient uniquement à la diversité et à la quantité (agriculteurs E et G) et ceux qui relevaient diversité et quantité mais aussi des informations renseignant sur la concurrence entre culture et adventices (agriculteurs, A, B, C et H). Lorsque l'on s'intéresse au premier groupe, on remarque que, pour ces agriculteurs, la culture de blé n'est pas prioritaire (résultats issus de la première enquête). En effet, pour l'agriculteur E, ce sont de nouvelles cultures spécialisées et à haute valeur ajoutée (maïs doux et courges) qui sont prioritaires et pour l'agriculteur F, ce sont les vignes qui sont prioritaires et représentent plus de 85% du chiffre d'affaire de l'exploitation. On suppose alors que ces agriculteurs attachent plus d'importance, de temps et d'attention à ces cultures à haute valeur ajoutée, et que, par conséquent, ils sont moins attentifs à l'évolution de leurs parcelles de blé. Le second groupe correspond à des céréaliers intensifs (système de type 2), ce sont des agriculteurs pour lesquels le blé a une place importante dans l'exploitation. Ces agriculteurs prélèvent leurs informations aussi bien à l'échelle de la parcelle que des zones restreintes (Tab. 4.6.). On peut faire l'hypothèse que ces agriculteurs ont une certaine expertise et que, pour évaluer l'état d'infestation de leurs parcelles, peu d'informations leur sont nécessaires (voir la notion de « compétence incorporée » et d'« affordance » évoquées dans la section précédente). Enfin, le troisième groupe semble plus hétérogène. Il regroupe des agriculteurs pour lesquels l'importance de la culture de blé dans l'exploitation est variable. Pour un des

agriculteurs (agriculteur H), la multiplicité des informations prélevées peut s'expliquer par le fait que, d'une part, son installation est récente et que, d'autre part, la reprise de l'exploitation se fait hors cadre familial. Cet agriculteur est donc en train de constituer son référentiel pour gérer ses parcelles. Globalement, dans ce dernier groupe, les agriculteurs semblent avoir des habitudes d'observation des adventices plus fines que dans les autres groupes. On suppose que pour ces agriculteurs, les adventices constituent une des difficultés majeures à gérer dans leurs parcelles de blé et plus largement au sein même de la rotation, ce qui explique qu'ils réalisent une surveillance assez fine. Les informations prélevées dépendent également de la perception qu'ont les agriculteurs des adventices en tant que facteur limitant du blé.

Nous avons montré ici qu'il est possible de mettre en relation des façons de prélever et gérer l'information d'une part, avec des caractéristiques d'exploitations et des stratégies d'exploitants d'autre part. Néanmoins, nous ne l'avons mis en évidence que pour l'activité de surveillance. Il serait intéressant d'avoir le même type de démarche sur un échantillon d'agriculteurs plus large afin de vérifier les hypothèses que nous avons avancées ici, mais également afin de tenter d'établir le même type de lien entre informations prélevées et caractéristiques des exploitations agricoles et des exploitants pour d'autres buts (désherbage, fertilisation, etc.).

4.3. Intérêts et limites de la méthode retenue

4.3.1. Limites des enquêtes réalisées

Tout d'abord, il est intéressant de noter que la seconde phase d'enquêtes « sur les parcelles » a permis d'obtenir plus de données sur les informations prélevées que la première phase « en salle ». Cela peut s'expliquer par le fait que les agriculteurs, mis en situation sur la parcelle, étaient plus aptes à reproduire leur comportement habituel. En effet, en salle, l'explicitation de leurs habitudes de prises d'information demande une formalisation de leur savoir qui peut les amener à passer sous silence leurs « micro-pratiques » (voir section 2.1). La deuxième phase d'entretiens a donc été utile pour accéder de manière plus fine aux informations prélevées par les agriculteurs.

Néanmoins, les entretiens n'ont pas toujours permis d'accéder à une description fine des informations prélevées car il était parfois difficile d'accéder à l'explicitation du prélèvement des informations. Par exemple, la notion de quantité reste floue, ne correspondant pas réellement à une densité, car les agriculteurs ne comptent jamais les adventices. Dans la mesure où nous avons identifié les principales informations prélevées, il serait intéressant de définir plus précisément ces informations par d'éventuels entretiens complémentaires auprès des agriculteurs. De plus, il est possible que nous n'ayons pas mené les entretiens de façon similaire dans la mesure où, au fur et à mesure des entretiens, nous avons acquis de l'expérience pour faire ressortir les données qui nous intéressaient. Par conséquent, les derniers entretiens menés ont peut-être été plus riches en résultats, introduisant un biais dans les résultats.

L'échantillon choisi est restreint (huit agriculteurs) et limite la généralité de nos résultats. En effet, un échantillon plus grand aurait pu mettre en évidence d'autres types d'informations prélevées ou d'autres combinaisons d'informations. Cependant, l'étude en profondeur d'un échantillon restreint permet d'éviter de se contenter d'appréhender des « variables de surface » (Hoc et Amalberti, 1999). Les résultats obtenus ici donnent donc des pistes à creuser pour évaluer les informations prélevées par les agriculteurs et méritent d'être confirmés sur un échantillon plus large.

Le suivi de parcelles, nécessaire à l'expérimentation, nous a permis de créer une relation privilégiée avec les agriculteurs en amont de ces phases d'entretiens, qui peut sembler être un obstacle au recueil de données objectives. Cependant, d'après Floux (à paraître), l'influence réciproque de l'observateur et de l'observé peut être considérée comme un outil garant de scientificité que l'on ne doit pas chercher à annuler.

4.3.2. Intérêts d'utiliser les concepts et méthodes d'analyse des environnements dynamiques

Nous avons repris la méthode proposée par Hoc et Amalberti (1999) en utilisant la trame de schème de codage qu'ils proposaient tout en définissant des arguments *ad hoc* pour adapter ce schème à notre cas d'étude (par exemple : les zones de prélèvement d'informations ou les types de gestion). Nous n'avons pas rencontré de difficultés pour exploiter les entretiens à partir de ce schème de codage. De plus, celui-ci a permis de disposer de données homogènes quel que soit l'agriculteur enquêté, et donc de s'affranchir du déroulement des entretiens eux-mêmes, ce qui en a facilité l'analyse des données. Il a également permis de traiter conjointement les données issues des premiers et seconds entretiens. Les arguments choisis ont parfois été trop fins et peu valorisés (notamment en raison de données manquantes, par exemple pour l'argument « condition ») mais le choix d'analyser à un niveau de spécification plus précis que ce qui est requis permet d'éviter les erreurs de codage (Hoc et Amalberti, 1999).

Un des avantages de cette méthode est que nous avons établi un schème de codage qui nous permet d'analyser les données pour répondre à la question que l'on se pose. Il a permis de mettre en évidence les invariants entre les agriculteurs mais également de montrer la variabilité des informations prélevées et des arguments qui s'y rapportent. Ce schème de codage pourra être réutilisé pour analyser les résultats issus d'entretiens complémentaires sur un échantillon d'agriculteurs plus large et qui pourront être moins coûteux en temps de réalisation et d'analyse puisque le modèle permettant de décrire l'activité est déjà établi. Cette méthodologie propose donc une méthode de codage et d'analyse reproductible.

La méthode d'analyse que nous avons choisie nous a permis de mettre l'accent sur les informations prélevées par les agriculteurs pour prendre leurs décisions ou actualiser la représentation de leurs parcelles. Cette approche n'est pas en contradiction avec des approches cognitives des décisions de production précédemment mises en œuvre dans des

contextes agricoles (Cerf, 1996a ; Cerf, 1996b ; Cerf et Sebillotte, 1997). En effet, ces approches proposent des schémas décisionnels mettant en évidence le rôle des fonctions cognitives dans les décisions. Néanmoins, ces études accordent plus d'importance à l'articulation des décisions et des actions qu'à une étude fine de la prise d'information pour déclencher les décisions, l'objectif étant de modéliser la décision dans sa globalité

4.4. Mise en regard des informations prélevées par les agriculteurs avec les indicateurs mis en évidence dans le chapitre 4

Rappelons tout d'abord qu'un des objectifs de ce chapitre était d'évaluer la compatibilité des informations prélevées par les agriculteurs avec les indicateurs permettant de quantifier les effets des populations d'adventices sur le rendement et la teneur en protéines mis en évidence dans le chapitre précédent.

Dans cette étude, nous avons montré que la quantité d'adventices est l'information qui est la plus utilisée, que ce soit pour des activités de surveillance ou de prises de décision, à l'échelle de la parcelle ou de zones restreintes, et qu'elle est surtout liée au déclenchement du désherbage (voir section 3.4.1.). Or, dans le chapitre précédent, nous avons montré que la quantité d'adventices, exprimée à travers une densité d'adventices mesurée précocement (autour du stade épi 1 cm du blé), permet de prédire des distributions de rendement et de densités à floraison. Nous avons également montré que ces prédictions permettaient d'une part d'ajuster les pratiques de fertilisation azotée, et d'autre part d'évaluer l'opportunité de désherber. Les résultats obtenus dans ces deux chapitres sont donc compatibles car l'évaluation de la quantité d'adventices sur une parcelle apparaît comme une pratique courante pour les agriculteurs.

Cependant, l'évaluation de la quantité par les agriculteurs (l'information prélevée) ne saurait être directement utilisée en tant que densité (indicateur). En effet, il y a deux problèmes à résoudre : le premier est celui de la temporalité et le second est celui de la « traduction » de la quantité en densité.

En ce qui concerne la temporalité, nous avons montré, dans le chapitre 3, que la densité d'adventices observée précocement dans le cycle (autour du stade épi 1 cm du blé) permet de prédire rendement et densité tardive. Or, nous avons montré dans ce chapitre que dans le cadre d'activités de surveillance certains agriculteurs se rendaient régulièrement sur leurs parcelles (toutes les semaines ou toutes les quinzaines). Nous pouvons alors imaginer que ces agriculteurs se rendent au moins une fois sur leur parcelle autour du stade épi 1 cm. Pour les agriculteurs qui se rendent sur les parcelles uniquement lorsque la période est favorable au désherbage, si les conditions ne sont pas favorables autour du stade épi 1cm, le fait de se rendre sur leurs parcelles pour évaluer la quantité d'adventices est plus coûteux. Cela peut être problématique puisque les modèles qui prédisent le rendement et la densité à floraison ont été établis pour des densités d'adventices à un moment précis. Par conséquent, on peut s'interroger sur l'acceptabilité d'un prélèvement d'information à ce stade précis. A l'inverse,

on peut aussi s'interroger sur la stabilité des modèles mis au point dans le chapitre précédent face à un changement de date de prélèvement de la densité.

L'évaluation de la quantité par les agriculteurs est rarement précisée et reste de l'ordre de l'expertise, puisque les agriculteurs ne comptent jamais les adventices pour évaluer une densité. Il convient alors de s'interroger sur la manière de traduire cette information (la quantité) en indicateur (la densité). On pourrait imaginer un dispositif qui permette de relier les « quantités » des agriculteurs à des densités objectivées. Pour cela, nous pourrions utiliser des supports photographiques représentant des états d'infestation en adventices variés dans des parcelles de blé autour du stade épi 1 cm dont nous connaissons la densité associée. Nous aurions alors une information du type « *si vous observez cela sur votre parcelle (en se référant à la photographie), c'est que la densité d'adventices est d'environ ... adventices* ». Cela permettrait de faire le lien ensuite avec les modèles prédictifs. Une alternative serait de préconiser des comptages sur les parcelles permettant d'estimer les densités d'adventices. Pour cela, il faut mettre au point une méthode d'échantillonnage fiable et peu coûteuse en temps. Il faut également s'interroger sur la compatibilité des échelles considérées. En effet, dans le chapitre 3, les densités ont été évaluées sur des placettes de 0.25 m² alors que les agriculteurs estiment les quantités d'adventices à l'échelle de la parcelle ou de zones restreintes qui sont plus grandes que les placettes. Nous reviendrons sur ces différentes questions dans le cadre de la discussion générale.

Nous rejoignons ici Leplat (1995) qui s'interroge sur la possibilité de mobiliser des compétences élémentaires incorporées (ici, c'est l'évaluation de la quantité) pour d'autres activités que celles pour lesquelles elles sont mises en œuvre initialement. En effet, la difficulté peut résider dans le fait que les compétences sont très intégrées au but et deviennent difficilement transposables. En gardant cela en tête, il semble que l'évaluation de la quantité d'adventices, effectuée par les agriculteurs pour leurs prises de décision et la surveillance, sera plus facilement transposable, pour l'utilisation des modèles, si elle est liée à des activités auxquelles l'agriculteur l'associe déjà par ailleurs. Or, dans notre cas, l'évaluation de la quantité d'adventices est souvent liée au désherbage, elle sera *a priori* facilement mobilisable pour les modèles permettant de raisonner le désherbage. En revanche, elle est moins fréquemment associée aux pratiques de fertilisation, ce qui laisse présager que ce sera peut-être plus difficile de transposer cette information pour aider au raisonnement des pratiques de fertilisation.

Conclusion

Les informations les plus mobilisées par les agriculteurs pour prendre leur décision de désherbage et de fertilisation de couverture sont la quantité et la diversité d'adventices. De plus, les agriculteurs utilisent de nombreuses informations qui se combinent de manière différente en fonction du but visé, des conditions au moment du prélèvement ou encore en fonction de caractéristiques de l'exploitation agricole. L'utilisation générique que font les agriculteurs de la quantité ouvre une perspective d'utilisation facilitée des modèles mis en évidence dans le chapitre 4, puisque les agriculteurs évaluent les populations d'adventices sur leurs parcelles. Néanmoins, cette transposition des informations des agriculteurs vers des indicateurs utilisés dans des modèles soulève un certain nombre de questions qui doivent être résolues si l'on veut passer d'un modèle prédictif à un outil d'aide à la décision.

CHAPITRE 5

**Discussion générale, perspectives
et conclusion**

Chapitre 5

Discussion générale, perspectives et conclusion

1. Retour sur les objectifs et bilan du travail réalisé

L'objectif de ce travail de thèse était d'identifier et de hiérarchiser les facteurs limitants et les pratiques qui expliquent la variabilité des performances du blé biologique en parcelles agricoles. Il s'agissait également de quantifier l'effet des principaux facteurs sur ces performances et de proposer des indicateurs précoces qui permettent de prévoir leur nuisibilité et qui soient actionnables par les agriculteurs, afin d'adapter les techniques culturales appliquées.

La première question concernait l'identification des facteurs expliquant la variabilité de la teneur en protéines et du rendement du blé biologique à l'aide d'une méthode statistique innovante basée sur un mélange de modèles.

Le statut azoté de la culture favorise à la fois le rendement et la teneur en protéines. Les adventices ont un effet négatif sur le poids de mille grains et un effet positif sur la teneur en protéines, ce qui peut s'expliquer par un effet de concentration. Le quotient photothermique a un effet positif sur le nombre de grains par m² avant floraison, alors qu'il limite la teneur en protéines après floraison. Pendant la période de remplissage des grains, le stress hydrique et les températures au-delà de 25°C limitent la teneur en protéines. Les maladies foliaires limitent le poids de mille grains pendant cette même période. Enfin, la classe de panification est un facteur expliquant très fortement les variations du rendement et de la teneur en protéines. Les variétés BPS permettent d'augmenter le rendement, car elles augmentent le nombre de grains, alors que les variétés BAF expliquent de fortes teneurs en protéines.

Nous avons également montré que l'utilisation d'une base de données élargie et d'une méthode statistique différente permettaient d'obtenir des résultats sensiblement différents lors de la réalisation d'un diagnostic sur le rendement. De plus, les résultats obtenus avec la méthode de mélange de modèles sont plus robustes que ceux obtenus avec des méthodes de régression stepwise « classiques ».

Enfin, ce travail nous permet de conclure que, pour améliorer le rendement et la teneur en protéines du blé biologique en région Rhône-Alpes, les variétés à haute valeur boulangère et résistantes à la rouille brune, telles que Lona, sont à recommander. L'introduction ou le maintien des légumineuses fourragères dans la rotation est à conseiller et il faut éviter de semer le blé trop tardivement. Ces conclusions sont en accord avec des résultats obtenus sur la même région d'étude à partir d'un grand nombre de parcelles dont les pratiques ont été collectées (David *et al.*, 2007). Cette étude montre que les variétés améliorantes permettent

d'atteindre des teneurs en protéines plus élevées alors que les variétés meunières (BPS) montrent des rendements plus élevés. Les semis tardifs pénalisent également le rendement. Enfin, cette étude a montré l'intérêt des précédents légumineuses, riches en azote, pour améliorer les performances.

Nos travaux ont montré que les adventices avaient un effet négatif sur le rendement. De plus, ce facteur reste considéré comme une difficulté majeure dans les systèmes biologiques par les agriculteurs, c'est pourquoi nous avons cherché à expliciter plus finement l'effet des adventices sur les performances du blé biologique.

La seconde question de recherche concernait donc la quantification des effets des adventices, en parcelles agricoles, sur les performances du blé biologique. A cet effet, nous avons adapté des modèles quantifiant l'effet des adventices sur le rendement dans des situations de populations monospécifiques vers des cas de populations plurispécifiques en utilisant des méthodes de régression quantile. Il s'agissait également de tester l'effet de la diversité des adventices sur les performances du blé biologique et l'effet du désherbage sur toutes ces relations. Enfin, nous souhaitions utiliser ces relations pour raisonner les pratiques de désherbage et de fertilisation azotée. Nous avons montré l'intérêt d'utiliser des méthodes de régression quantile pour établir des relations entre les adventices et les performances du blé biologique, en présence d'autres facteurs limitants. La densité d'adventices, mesurée à un stade précoce, a permis de prédire une distribution des rendements atteignables et une distribution de la densité d'adventices à floraison. Ces prédictions de rendement peuvent alors être utilisées pour les pratiques de fertilisation. Néanmoins, nous n'avons pas réussi à isoler l'effet de la diversité d'une population d'adventices sur les performances du blé. De même, les variations de teneur en protéines n'ont pu s'expliquer uniquement en fonction des adventices, et ce, malgré leur effet avéré sur le TP (chapitre 2). Par ailleurs, nous avons montré que le désherbage mécanique permettait de réduire la densité d'adventices durant le cycle de la culture sans favoriser le rendement. Toutefois, ces techniques semblent limiter le stock semencier et les dommages potentiels des adventices pour les années suivantes. L'intérêt du désherbage mécanique est avant tout de gérer la population d'adventices à long terme, sans espérer d'effet direct de cette technique sur le rendement de la culture désherbée. Enfin, nous avons présenté des utilisations possibles de ces modèles pour ajuster les pratiques de fertilisation azotée et de désherbage en fonction d'une population précoce d'adventices.

La troisième question de recherche concernait l'identification des informations relatives aux adventices que les agriculteurs mobilisent pour décider de déclencher leurs pratiques. Ces informations ont ensuite été comparées aux indicateurs précoces que nous avons identifiés dans la partie précédente pour prévoir le rendement et la densité d'adventices à floraison. Nous avons montré que les agriculteurs prélèvent de nombreuses informations sur leurs parcelles pour juger de l'infestation en adventices. Nous avons également établi que ces

informations pouvaient être utilisées pour déclencher des pratiques ou pour surveiller l'état des parcelles. Nous avons également montré qu'en fonction des agriculteurs et de l'utilisation qui est faite de l'information, les combinaisons d'informations prélevées pouvaient varier. Enfin, la quantité d'adventices évaluée par les agriculteurs est l'information la plus fréquemment utilisée par les agriculteurs. Or c'est l'information qui se rapproche le plus de la densité, indicateur identifié dans la partie précédente. Cela laisse présager que les indicateurs précoces des adventices vont être relativement faciles à mettre en place en situations réelles, même s'il va falloir transposer cette notion de quantité, évaluée par expertise, en densité, qui est un indicateur mesuré.

2. Retour sur la démarche et les méthodes mobilisées

2.1. Retour sur la démarche

Nous avons choisi de mettre en évidence d'abord des indicateurs de l'effet des adventices sur les performances du blé pour ensuite les confronter aux informations relatives aux adventices prélevées par les agriculteurs. Cependant, nous aurions pu adopter une autre démarche. En effet, nous aurions pu envisager de mettre d'abord en évidence les informations prélevées par les agriculteurs et ensuite essayer de traduire ces informations en indicateurs. Reprenons l'exemple de la quantité : après avoir mis en évidence que les agriculteurs prélevaient cette information, nous aurions pu alors imaginer un dispositif expérimental permettant de suivre cette variable ainsi que le rendement et la teneur en protéines sur leurs parcelles. Nous aurions ensuite mis au point les modèles permettant de relier cette variable au rendement et à la teneur en protéines à partir des données recueillies. Cette démarche amène des questions de recherche quelque peu différentes de celles que nous avons choisies de traiter. Tout d'abord, il aurait fallu traduire la notion de quantité en variable mesurable en parcelle. Nous pouvons alors envisager plusieurs options : traduction directe en densité, mesure de biomasse, mesure de surface foliaire, détermination de classes d'infestation (soit avec des classes de densité réellement mesurées sur la parcelle, soit avec des photos classées par les agriculteurs selon leur niveau d'infestation), etc. De même, si l'on avait choisi d'étudier la diversité, il aurait fallu traduire les informations que prélèvent les agriculteurs en variables mesurables : nombre d'espèces différentes, dominance de certaines espèces (comment la mesurer ?), espèces d'alerte, etc. Une deuxième question aurait été celle du choix de l'échelle d'observation des variables mesurées. Dans notre dispositif, nous avons choisi de suivre des placettes de 0.25 m² sur les parcelles. Avec cette autre démarche, il aurait fallu s'interroger sur l'échelle pertinente pour mesurer ces indicateurs : échelle de la parcelle, échelle de la placette, taille des placettes, observation uniquement sur les zones restreintes, etc.

Avec cette démarche alternative, afin de mettre en évidence les informations prélevées par les agriculteurs, il aurait fallu élargir l'échantillon enquêté. En effet, un échantillon restreint (similaire au nôtre) aurait été nécessaire dans un premier temps, mais nous n'aurions pas pu nous passer d'un échantillon complémentaire pour confirmer les informations identifiées. Cette démarche aurait certainement nécessité une observation des agriculteurs dans le travail

plus importante. Le fait d'étudier d'abord l'activité des agriculteurs aurait peut-être retardé la mise en place du dispositif expérimental et l'analyse des données recueillies. Par ailleurs, il est probable que les indicateurs mis en évidence par cette démarche alternative soient plus adaptés aux agriculteurs que ceux que nous avons mis en évidence. Le problème de transposition des indicateurs auquel nous devons faire face aurait été moindre puisque nous aurions pris en compte cette difficulté dès le début. La démarche que nous avons adoptée a certainement permis de bien mettre au point les modèles quantifiant les effets de la population d'adventices, mais elle reste limitée pour ce qui est de la mise au point d'un indicateur directement utilisable par les agriculteurs. Enfin, en adoptant la démarche alternative, la mise au point d'un protocole d'évaluation de la population d'adventices adapté aux agriculteurs aurait été prise en charge dès le début.

Afin de trouver un indicateur de la population d'adventices qui permette de quantifier la nuisibilité des adventices sur les performances du blé biologique, nous aurions pu envisager de tester d'autres indicateurs que la densité et la diversité, qui auraient été ensuite confrontés aux informations prélevées par les agriculteurs. Dans le cadre de notre travail, l'objectif était de suivre l'effet continu de la compétition des adventices sur les performances du blé. Par conséquent, nous avons travaillé sur des placettes suivies durant tout le cycle et récoltées à la maturité du blé. Cela exclut donc l'utilisation d'indicateurs destructifs tels qu'une surface foliaire mesurée (après prélèvement des adventices) ou une quantité d'azote absorbée. Nous aurions pu alors tester un indicateur visuel et non destructif de la pression en adventices, car de nombreux travaux montrent l'intérêt d'utiliser la surface foliaire (Lotz *et al.*, 1996 ; Florez *et al.*, 1999) ou une estimation visuelle du volume des adventices (Harvey et Wagner, 1994) pour évaluer les pertes de rendement liées aux adventices. Cependant, ce type d'indicateurs reste soumis à la subjectivité du notateur lorsqu'il est estimé visuellement en parcelle. Il reste, de plus, difficile d'objectiver ce type d'indicateur, car il n'existe pas à l'heure actuelle de méthode permettant de distinguer une surface recouverte par des adventices d'une surface recouverte par une culture à partir de photographies. Dans cet objectif de tester plusieurs indicateurs, nous aurions pu envisager de prévoir un dispositif expérimental plus analytique que le suivi réalisé sur les parcelles. Ce dispositif aurait alors permis, d'une part, de maîtriser les infestations en adventices (semis d'adventices) et d'autre part, de contrôler les autres facteurs limitants pouvant interférer sur la relation entre adventices et performances de la culture.

2.2. Changements d'échelle et extrapolation des résultats

Dans le cadre de notre travail, nous avons exploité plusieurs échelles. Pour réaliser les diagnostics agronomiques régionaux de la teneur en protéines et du rendement, nous avons travaillé à l'échelle des parcelles agricoles, jugées homogènes. Pour traiter de la question des effets des adventices sur les performances du blé biologique, nous avons travaillé à l'échelle de placettes (0.25 m²), présentes de façon répétée sur chaque parcelle (afin de couvrir la diversité intra-parcellaire). Enfin, pour mettre en évidence les informations prélevées par les

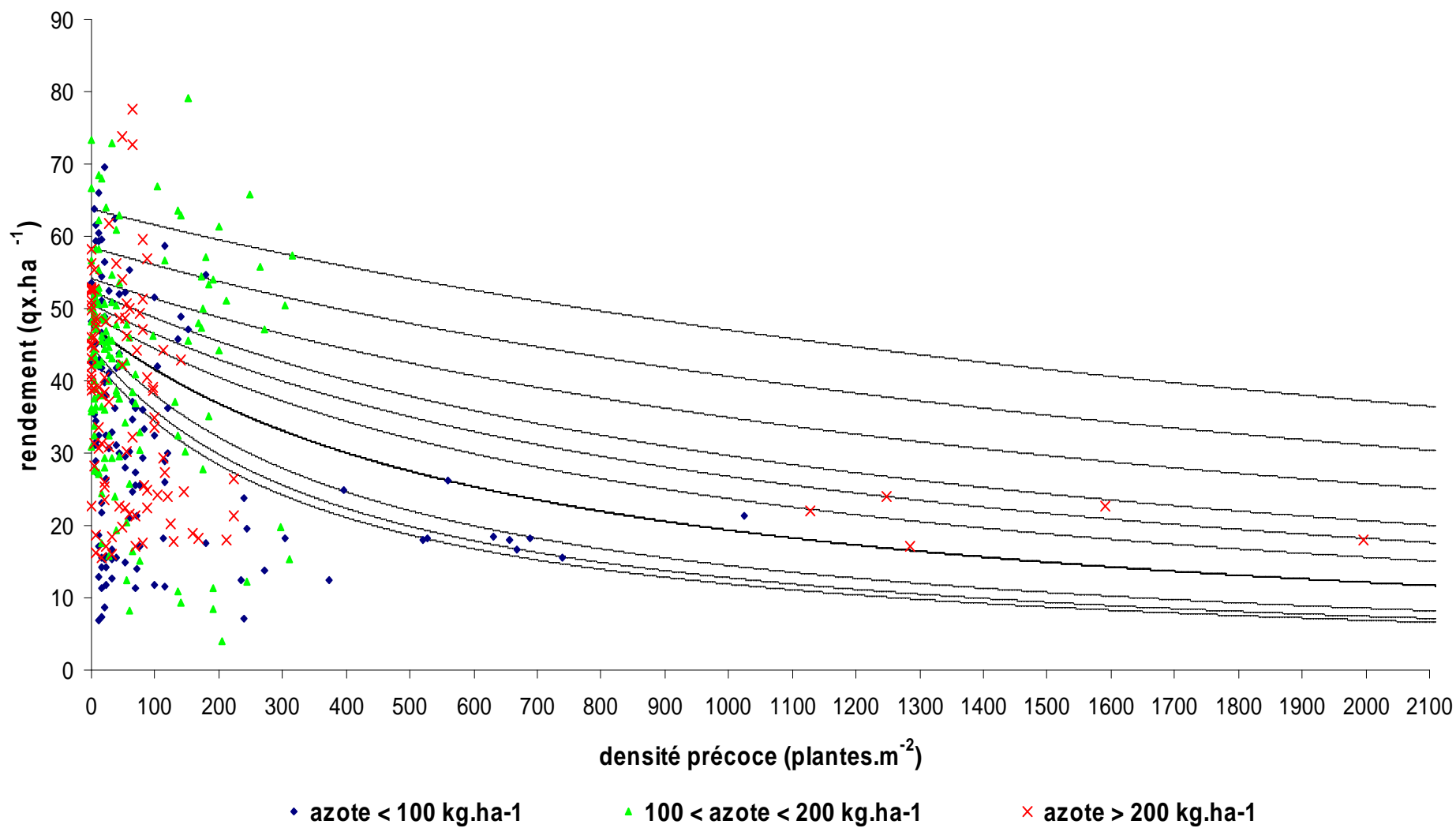
agriculteurs, nous nous sommes intéressés à ce qu'ils observaient à l'échelle de la parcelle, mais aussi parfois à l'échelle de zones restreintes, tout en prenant en compte les caractéristiques et stratégies des exploitations agricoles.

Les systèmes biologiques sont caractérisés par une grande hétérogénéité inter et intra-parcellaire, à la fois des performances (teneur en protéines et rendement), mais aussi des facteurs limitants. L'hétérogénéité inter-parcellaire a été exploitée dans le cadre du diagnostic agronomique, permettant d'étudier des situations différentes d'une parcelle à l'autre, afin de représenter au mieux les différences observables au sein de la région étudiée (Doré *et al.*, 2008). Cependant, la variabilité intra-parcellaire n'est généralement pas ou peu prise en compte dans le diagnostic et les mesures sont effectuées sur des zones homogènes dans la parcelle (Boiffin *et al.*, 1981 ; Aubry *et al.*, 1994 ; Leterme *et al.*, 1994). Les répétitions de mesures réalisées sur une parcelle très hétérogène vont présenter une variance très importante, et la moyenne obtenue représentera mal les performances de la parcelle. Choisir une zone homogène de la parcelle, si par ailleurs la parcelle est hétérogène, permettra de réduire la variance des résultats mais représentera mal les performances de la parcelle dans sa globalité. On peut alors se poser la question de savoir si, dans le cadre d'un diagnostic en agriculture biologique où la variabilité intra-parcellaire est importante, la réalisation d'un diagnostic à l'échelle de placettes ne serait pas intéressante. Néanmoins, dans ce cas, certaines mesures des facteurs limitants (*e.g.* le tassement du sol ou les facteurs climatiques) et les pratiques effectuées (*e.g.* précédent, travail du sol, fertilisation) seraient communes à un grand nombre de placettes, puisque ces caractéristiques sont identiques pour une parcelle donnée, biaisant ainsi la base de données. De plus, certaines mesures destructives comme la mesure de la teneur en azote des plantes ne seraient pas réalisables, puisqu'elles empêchent l'évaluation des performances en fin de cycle sur la placette. Dans le cadre de nos diagnostics, nous avons fait le choix de réduire en partie la variabilité intra-parcellaire en choisissant au sein de chaque parcelle une zone de mesures qui soit homogène par rapport au type de sol et à l'état du peuplement de blé à la levée. Néanmoins, au cours du cycle de la culture, cette zone de mesures a pu montrer une certaine variabilité vis-à-vis des adventices. Cette variabilité intra-parcellaire, relative aux adventices, a été exploitée pour mettre au point les modèles prédisant les distributions de rendement ou de densité des adventices. En effet, au sein même de la parcelle, les placettes ont été définies sur des zones dont l'infestation en adventices s'est révélée variable, permettant de couvrir une large gamme de densités au sein d'une même parcelle. De plus, afin d'extrémiser la gamme d'infestation sur une même parcelle, des traitements différents ont été réalisés sur certaines parcelles (avec ou sans désherbage, avec ou sans irrigation et avec ou sans fertilisation de printemps). Le fait d'utiliser une gamme de densité extrémisée nous a permis de mieux estimer les paramètres des modèles (Moffitt et Bhowmik, 2006). La variabilité intra-parcellaire a également été évoquée par les agriculteurs puisqu'ils distinguent des zones restreintes plus infestées et/ou le développement de la culture est moindre pour prélever leurs informations.

Comme nous l'avons montré dans le chapitre 2, les résultats obtenus par la méthode de diagnostic agronomique sont dépendants de la base de données sur laquelle le diagnostic est réalisé. De plus, un grand nombre de ces facteurs sont des facteurs liés directement au climat (*e.g.* le quotient photothermique ou le stress hydrique), et donc très dépendants de la région d'étude. Par conséquent, l'identification et le classement des facteurs limitants des performances du blé biologique obtenus ne sauraient être extrapolés à d'autres régions que celle où le diagnostic a été réalisé (Doré *et al.*, 1997). Néanmoins, comme nous avons couvert une gamme d'années assez large, nous pouvons penser que ces résultats seront extrapolables à d'autres années climatiques, dans la même région. La méthode statistique utilisée (mélange de modèles) s'est révélée mieux adaptée pour réaliser des diagnostics que les méthodes classiques de régression stepwise puisqu'elle évite de sélectionner des facteurs limitants en réalité peu importants et de ne pas sélectionner des facteurs en réalité importants. Elle pourra être remobilisée pour la réalisation de diagnostics agronomiques régionaux ultérieurs. De plus, les résultats obtenus peuvent donner des pistes pour identifier les facteurs limitants principaux dans des systèmes agricoles proches de l'agriculture biologique (mais dans la même région) tels que les systèmes à bas niveau d'intrants. Ces systèmes se rapprochent des systèmes biologiques dans la mesure où ils utilisent des variétés résistantes aux maladies, des doses de fertilisation réduites, des semis clairs ainsi que des doses et des fréquences d'application réduites des produits phytosanitaires (Rolland *et al.*, 2003). On peut faire l'hypothèse que ces systèmes connaissent des gammes de facteurs limitants intermédiaires entre celles observées en agriculture biologique et celles observées en agriculture conventionnelle.

Les modèles mis au point pour prédire des distributions de rendement et de densité tardive en adventices à partir d'une densité précoce ont été mis au point à partir de données issues de parcelles biologiques, mais peuvent être extrapolés à des systèmes conventionnels. En effet, on peut supposer que l'effet d'une population d'adventices plurispécifique sera similaire quel que soit le mode de production. D'ailleurs, nous avons adapté des modèles mis au point en agriculture conventionnelle pour établir ces relations. En agriculture biologique, la gamme de variation du rendement, des densités d'adventices et des facteurs limitants présents dans les parcelles, venant « perturber » la relation à établir, est accrue par rapport à un système conventionnel. Néanmoins, dans les systèmes conventionnels, lorsque les adventices ne sont pas contrôlées, il est plus facile d'avoir accès aux données qui définissent la courbe-enveloppe de la distribution $\text{rendement} = f(\text{densité})$ car il y a, *a priori*, plus de points pour lesquels seules les adventices limitent le rendement (les autres facteurs limitants comme l'azote ou les maladies pouvant être contrôlés en agriculture conventionnelle). Notons que la méthode de régression quantile appliquée ici est une méthode appropriée lorsque l'on souhaite établir une relation entre deux variables et que l'on sait qu'il existe d'autres facteurs influençant la relation qui ne sont pas mesurés. Ceci est fréquemment le cas dans des expérimentations en parcelles agricoles où il est impossible de contrôler tous les facteurs.

Figure 5.1 Relation entre rendement et densité d'adventices, quantile associés (de $\tau = 0.5$ à $\tau = 0.95$) et dose d'azote apportée pour chacune des placettes.



2.3. Prise en compte de l'interaction des adventices avec les autres facteurs limitants et les pratiques agricoles

Dans les diagnostics que nous avons menés, nous avons testé des combinaisons linéaires des facteurs limitants potentiels sans prendre en compte les interactions potentielles entre ces facteurs. D'une part, nous avons préalablement testé s'il existait d'éventuelles corrélations entre ces facteurs, et nous avons montré qu'il n'y avait pas de corrélations significatives entre les facteurs quantitatifs testés. D'autre part, s'il avait fallu tester ces interactions, nous aurions été limités par la taille de notre base de données qui n'aurait pas permis d'estimer des paramètres supplémentaires du fait du nombre déjà important de facteurs testés.

Cependant, il semble évident, d'un point de vue agronomique, qu'il existe des interactions entre certains facteurs. Nous avons étudié, de manière qualitative, comment s'organisent les résultats dans la relation entre rendement et densité d'adventices en fonction de la dose d'azote apportée (Fig. 5.1). Sur la figure 5.1, nous observons que lorsque les densités sont élevées (supérieures à 400 plantes.m⁻²), le rendement est du même ordre pour des densités très élevées (supérieures à 1100 plantes.m⁻²) avec une dose d'azote élevée (supérieure à 200 kg.ha⁻¹) que pour des densités moins élevées (entre 400 et 1100 plantes.m⁻²) avec des doses d'azote inférieures à 100 kg.ha⁻¹. Cela laisse penser qu'une dose d'azote élevée permet de compenser l'effet négatif de densités très élevées. L'absence de placettes correspondant à des densités très élevées (supérieures à 1100 plantes.m⁻²) avec peu d'azote et l'absence de placettes avec une densité comprise entre 400 et 1100 plantes.m⁻² avec beaucoup d'azote, nous empêche toutefois de conclure formellement. Pour les densités entre 200 et 400 plantes.m⁻², des doses d'azote élevées semblent permettre d'obtenir des rendements plus élevés. Entre 100 et 200 plantes.m⁻², des doses d'azote supérieures à 200 kg.ha⁻¹ ne permettent pas d'atteindre des rendements élevés, ce qui laisse supposer que d'autres facteurs limitants jouent sur le rendement. Enfin pour les densités inférieures à 100 plantes.m⁻², la dose apportée a un effet variable, même si les rendements les plus élevés sont obtenus avec les doses d'azote les plus élevées et les rendements les plus faibles avec les doses les plus faibles. Cette variabilité s'explique par le fait que d'autres facteurs limitants jouent sur le rendement. Des études ont montré que les ressources en azote, et donc la fertilisation azotée, jouaient sur les populations d'adventices et leur nuisibilité sur la culture (Angonin *et al.*, 1996 ; Cathcart et Swanton, 2003 ; Blackshaw *et al.*, 2005). Les pertes de rendement dues aux adventices varient alors en fonction des doses d'azote apportées comme dans notre étude. En effet, Angonin *et al.* (1996) ont montré que les pertes de rendement d'un blé dues aux véroniques à feuilles de lierre (*Veronica hederifolia* L.), décrites par un modèle non-linéaire (selon la relation de Cousens (1985a) que nous avons également utilisée dans le chapitre 3), variaient en fonction de la dose d'azote apportée. Les paramètres estimés des modèles étaient donc différents selon les doses d'azote, impliquant des pertes dues aux véroniques plus importantes dans les traitements avec moins d'azote. Ce résultat est en accord avec ceux de Cathcart et Swanton (2003) qui montrent que les pertes de rendement du maïs dues aux adventices (sétaire verte, *Setaria*

viridis) augmentent lorsque la dose d'azote diminue. Ils suggèrent d'ailleurs d'augmenter les doses d'azote pour limiter les pertes dues aux adventices dans des systèmes où les herbicides seraient limités ou interdits. Notons que cette augmentation de dose peut conduire à une moindre efficacité de l'azote apporté, qui est alors également absorbé par les adventices, et à une augmentation des pertes vers l'environnement. De plus, Blackshaw *et al.* (2005) ont montré que l'effet de l'azote apporté sur les densités d'adventices et sur la compétition avec du blé d'hiver dépend du type d'azote apporté (azote minéral, fumier, fumier composté). Les formes minérales apportées en surface conduisent à des stocks semenciers plus importants. En outre, Angonin *et al.* (1996) ont montré que les dates d'apports de l'azote minéral jouaient également sur la compétition entre blé et adventices et notamment que les apports tardifs permettent d'augmenter le poids de mille grains et de limiter l'effet des adventices sur le rendement. Il serait donc intéressant d'étudier plus précisément l'effet des modalités d'apport d'azote (date, dose et nature) sur les parcelles de notre réseau pour mieux comprendre comment la fertilisation azotée agit sur la compétition entre le blé et les adventices et, par conséquent, sur la relation entre densité d'adventices et rendement. Pour cela, il est possible d'utiliser des données recueillies lors du suivi expérimental que nous n'avons pas encore valorisées dans ce travail. Des données sur l'azote absorbé respectivement par le blé et par les adventices sont disponibles à différents moments du cycle cultural et pourraient être utilisées pour déterminer si le ratio entre azote absorbé par les adventices et azote absorbé par le blé dépend de la date, de la dose et de la nature de l'azote absorbé, et si cela a un effet sur les rendements observés. Néanmoins, nos données risquent de ne pas nous permettre de conclure formellement puisque le réseau de parcelles n'a pas été choisi afin de répondre à cette question, et que, par conséquent, toutes les combinaisons de dates, doses et types d'apport ne seront pas disponibles. À terme, la prise en compte de la fertilisation dans la modélisation de l'effet des adventices sur le rendement pourrait permettre d'améliorer le modèle.

Notons tout de même, que le fait d'avoir utilisé une méthode de régression quantile nous a permis d'utiliser toutes les placettes suivies pour établir la relation entre rendement et adventices, même si d'autres facteurs limitants (dont vraisemblablement l'azote) étaient présents. Par contre, cette méthode ne permet pas de distinguer l'effet des différents autres facteurs limitants dans la relation. Seul un effet global de ces facteurs limitants est accessible.

Nous avons également étudié, de manière qualitative, l'effet des systèmes de production, des dates de semis et des précédents sur la relation entre adventices et rendement. En effet, ces trois facteurs se sont révélés déterminants pour expliquer la densité d'adventices à floraison (voir chapitre 2). Nous faisons donc l'hypothèse qu'ils peuvent avoir un effet sur la relation entre densité précoce d'adventices et rendement.

La figure 5.2. montre que les rendements les plus faibles associés aux densités les plus fortes (supérieures à 400 plantes.m⁻²) correspondent au système de type 3. Ce sont des systèmes céréaliers extensifs qui limitent au maximum les charges de production et les moyens humains

Figure 5.2. Relation entre rendement et densité d'adventices, quantile associés (de $\tau = 0.5$ à $\tau = 0.95$) et type de système (système 1, 2 ou 3) pour chacune des placettes.

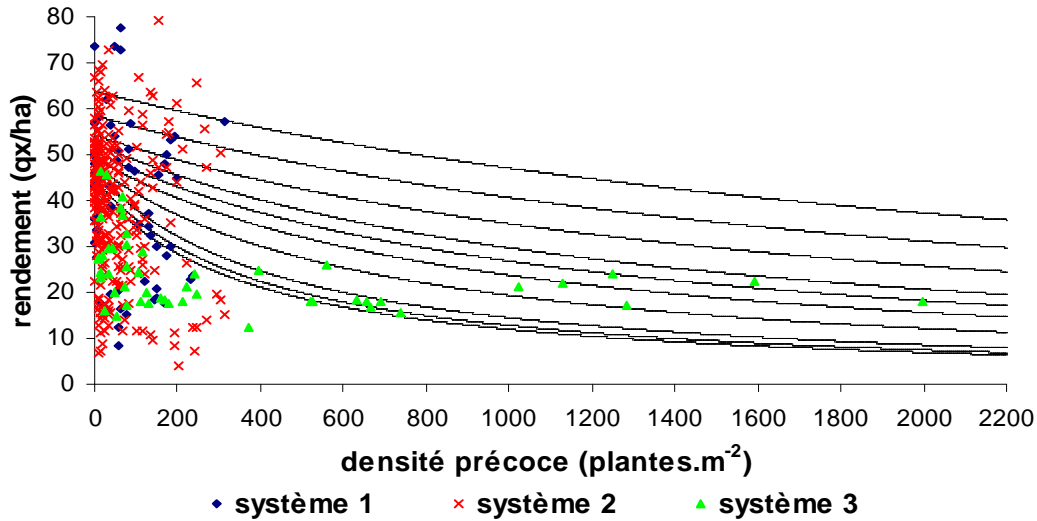


Figure 5.3. Relation entre rendement et densité d'adventices, quantile associés (de $\tau = 0.5$ à $\tau = 0.95$) et date de semis (précoce, tardive ou optimale) pour chacune des placettes.

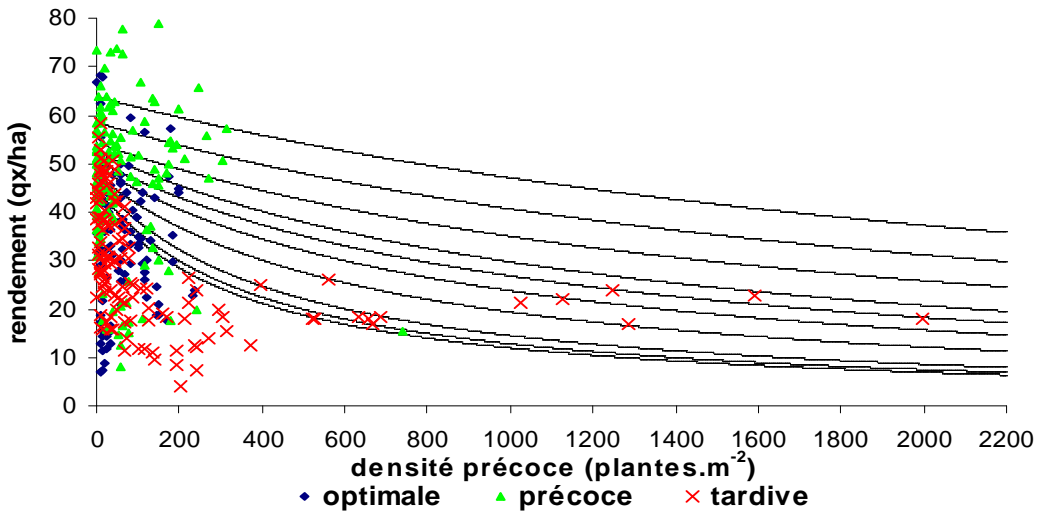
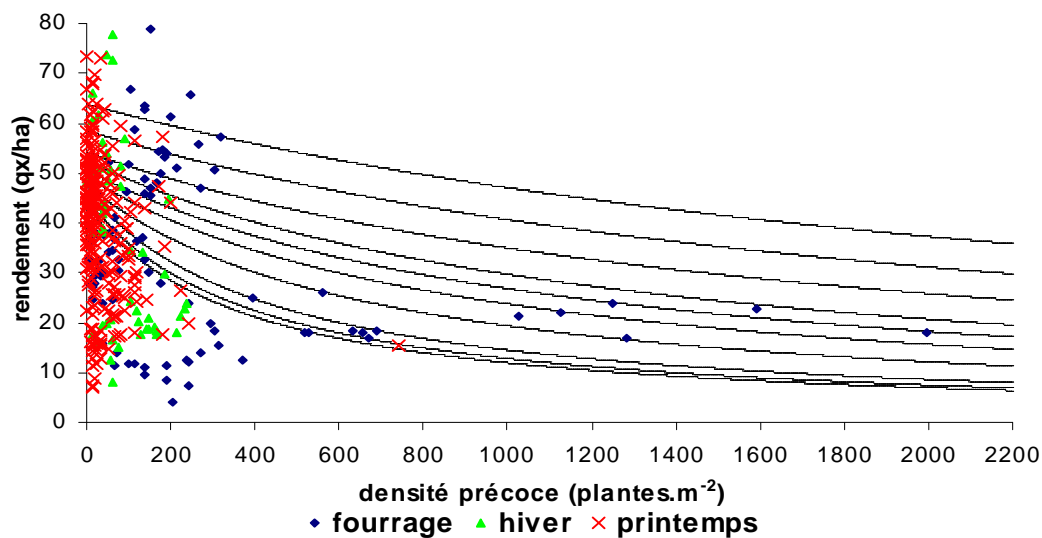


Figure 5.4. Relation entre rendement et densité d'adventices, quantile associés (de $\tau = 0.5$ à $\tau = 0.95$) et précédent (fourrages, culture d'hiver ou culture de printemps) pour chacune des placettes.



affectés à la sole céréalière. Les rotations à dominante céréalière, qui les caractérisent, intègrent des précédents variés et peu riches et la fertilisation est nulle ou limitée dans ces systèmes (David *et al.*, 2007). Les placettes pour lesquelles les densités sont comprises entre 200 et 400 plantes.m⁻² correspondent surtout au système de type 2 et atteignent des rendements variables. Ce sont des systèmes céréaliers intensifs avec des rotations diversifiées, des passages fréquents de herse-étrille (1,75 passages par an en moyenne) et un niveau de fertilisation important (David *et al.*, 2007). Entre 0 et 200 plantes.m⁻², le système mixte polyculture élevage (système 1) permet d'atteindre des rendements plutôt élevés et le système extensif (système 3) des rendements plutôt faibles, tandis que le système intensif (système 2) connaît des rendements variables. Le système mixte (système 1) associe des productions fourragères (majoritairement la luzerne et le trèfle) à la production de blé dominante sur la sole céréalière. Les rotations sont longues et le blé est toujours placé derrière une légumineuse fourragère qui a tendance à limiter la population d'adventices. Les pratiques de fertilisation associées sont variées. Or nous avons montré dans les diagnostics (voir chapitre 2) que les systèmes 2 et 3 avaient un effet positif sur la densité d'adventices à floraison (voir Tab. 2.I.4.). Nous retrouvons ce résultat ici où les plus fortes densités sont associées au système extensif et les densités moyennes plutôt au système intensif. Lorsque la densité est faible, et donc, *a priori*, lorsque les adventices ne sont pas le facteur limitant majeur, le système mixte semble permettre d'atteindre les rendements les plus élevés certainement en raison de la fourniture d'azote issue des légumineuses et/ou des amendements organiques.

La figure 5.3. montre que les semis tardifs sont associés à des rendements faibles pour des densités supérieures à 400 plantes.m⁻². Notons que ces points correspondent aux points caractérisés par le système 3 (extensif) où la présence d'autres ateliers sur l'exploitation peut limiter la disponibilité de l'agriculteur pour sa culture de blé. Entre 0 et 400 plantes.m⁻², les dates tardives correspondent aux rendements faibles. Pour les semis précoces, les rendements sont élevés tant que la densité est faible ou moyenne (inférieure à 400 plantes.m⁻²) et pour les semis aux dates optimales, les rendements sont variables. Cela est en accord avec le fait que le diagnostic avait révélé un fort effet positif des dates tardives sur la densité d'adventices à floraison.

La figure 5.4. montre que, dans notre réseau, les densités supérieures à 400 plantes.m⁻² étaient associées à des rendements faibles pour des précédents fourragers (luzerne, sainfoin ou trèfle) peu entretenus, ce qui a conduit à un enherbement important du blé suivant. Les densités entre 200 et 400 plantes.m⁻² sont associées surtout à des précédents fourragers mais les rendements sont variables. Entre 0 et 200 plantes.m⁻², on retrouve les trois types de précédents (cultures d'hiver, cultures de printemps et légumineuses fourragères) associés à des rendements variables. Les précédents de cultures d'hiver et de printemps semblent donc associés aux densités d'adventices faibles alors que les densités plus élevées sont essentiellement associées aux précédents fourragers. Ces observations sont donc en accord avec les résultats du diagnostic agronomique qui mettaient en évidence un effet négatif des cultures de printemps et d'hiver par rapport aux précédents fourragers sur les densités d'adventices à floraison.

Les observations faites pour ces trois facteurs (systèmes de production, dates de semis et précédents) avec les placettes observées précocement sur 26 parcelles pour mettre au point les modèles du troisième chapitre sont en accord avec les résultats obtenus par le diagnostic agronomique réalisé dans le second chapitre sur un réseau de 51 parcelles. Cela nous laisse penser que les résultats du diagnostic sur l'effet de ces facteurs sur la densité d'adventices sont fiables puisqu'ils sont corroborés par l'étude des placettes sur des gammes de variations plus larges. Par ailleurs, ces facteurs ayant un effet sur la population d'adventices, leur prise en compte pourrait permettre d'améliorer le modèle qui relie rendement et densité d'adventices. Cela rejoint la vision de Colbach et Debaeke (1998) qui mettent en évidence l'intérêt d'intégrer l'effet des pratiques culturales et des rotations dans des modèles de dynamique des populations d'adventices afin d'améliorer l'évaluation et la gestion des systèmes de culture.

2.4. Modélisation de l'effet des adventices

2.4.1. Effet des adventices sur le taux de protéines

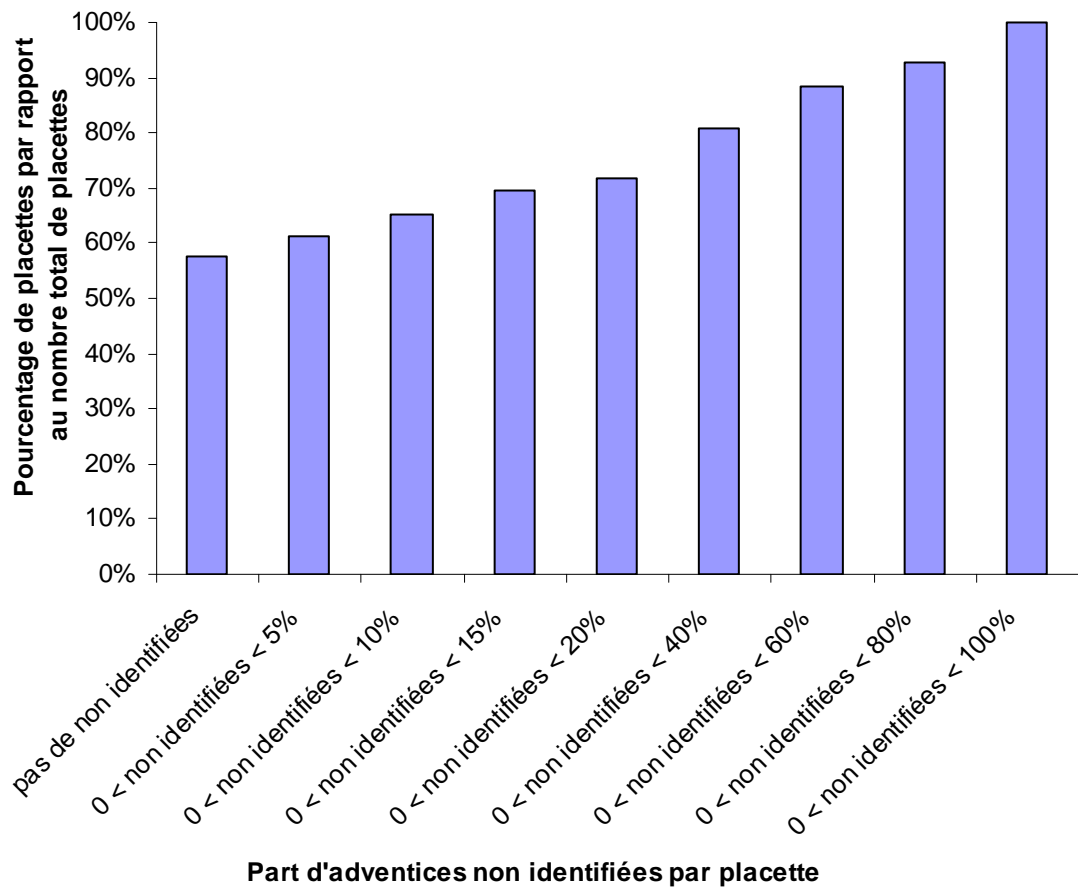
Dans le diagnostic agronomique, nous avons montré que la densité d'adventices à floraison avait un effet positif significatif sur la teneur en protéines. Or nous n'avons pas réussi à modéliser cet effet dans le chapitre 3. Cette difficulté peut s'expliquer, soit par le fait que le modèle à tester n'était pas bien adapté, soit par le fait que l'indicateur choisi n'était pas adéquat. En effet, en l'absence de références traitant de cet effet dans la littérature, nous avons testé uniquement des modèles simples (linéaires et quadratiques). L'indicateur choisi était une densité précoce alors que dans le diagnostic, c'est la densité à floraison qui était fortement liée à la teneur en protéines. Néanmoins, densité précoce et tardive étant fortement liée au cours du cycle, il semble donc que ce soit la forme du modèle choisi qui soit à remettre en cause.

Nous avons également tenté de modéliser l'effet de la diversité sur la teneur en protéines. Globalement, les résultats n'étaient pas satisfaisants, même si un modèle linéaire (ne prenant pas en compte le désherbage) permettait de modéliser une partie de la distribution des quantiles (seulement pour les quantiles au-delà de 0.65) (voir chapitre 3, section 5.3.1.). Ce résultat suggère qu'il y a bien un effet de la diversité sur le taux de protéines mais que l'on n'a pas réussi à le modéliser de façon satisfaisante.

2.4.2. Effet de la diversité des adventices sur les performances du blé

Dans le troisième chapitre, nous avons tenté sans succès de modéliser l'effet de la diversité des adventices sur les performances du blé biologique. Cette difficulté peut être due à la façon dont nous avons représenté la diversité. Nous avons choisi d'utiliser l'indice de Shannon. Or, d'une part, il est possible que la valeur de cet indice ait été mal calculée car nous avons rencontré des difficultés lors du recueil des données. D'autre part, cet indice n'était peut-être

Figure 5.5. Représentation du pourcentage de placettes par rapport au nombre total de placettes étudiées en fonction de la part d'adventices non identifiées parmi les adventices dénombrées sur la placette.



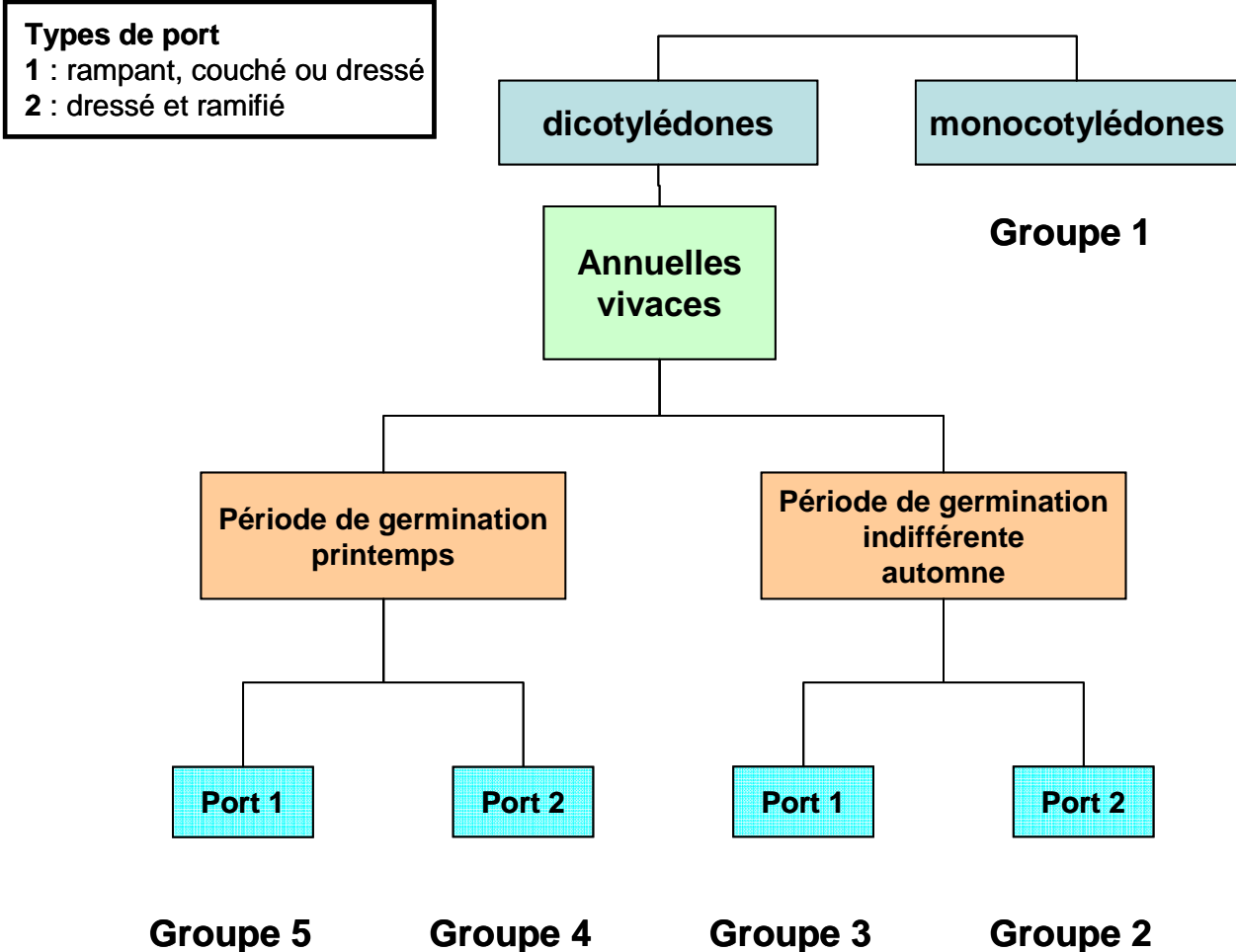
pas pertinent pour bien représenter un effet potentiel de la diversité sur les performances du blé.

Lors du suivi de placettes utilisées pour tester les modèles reliant les populations d'adventices et les performances du blé biologique, nous avons compté les adventices sur chacune des placettes. A chaque date, les espèces ont été identifiées et la densité correspondante à chaque espèce a été établie. Cependant, certaines adventices, à des stades très précoces (stade cotylédons) n'ont pas pu être identifiées sur certaines placettes. Dans ces cas, nous avons créé une catégorie « adventices non identifiées » pour laquelle nous avons également déterminé la densité. Cette catégorie a été prise en compte dans le calcul de l'indice de Shannon comme si elle correspondait à une espèce particulière. De ce fait, il est possible que la valeur de l'indice de Shannon soit quelque peu erronée pour certaines placettes où la densité d'adventices non identifiées est élevée. Les adventices non identifiées peuvent, soit correspondre à des espèces identifiées et dénombrées par ailleurs, soit à une ou des espèce(s) qui n'apparaissent pas par ailleurs sur la placette. Nous nous sommes intéressés au nombre d'adventices non identifiées sur chacune des placettes par rapport à la densité totale observée par placette. La figure 5.5. montre que pour la majorité des placettes (57,4 %), toutes les adventices ont été identifiées. De plus, 71,8 % des placettes ont moins de 20 % du nombre total des adventices qui ne sont pas identifiées. Cependant, 11,7 % des placettes ont plus de 60 % du nombre total d'adventices qui ne sont pas identifiées. Il est donc probable que pour ces placettes, la valeur de l'indice de Shannon ne reflète pas la diversité observée de manière satisfaisante. On pourrait donc envisager de n'utiliser que les placettes pour lesquelles il n'y a pas d'espèces non identifiées pour modéliser l'effet de la diversité des adventices sur le rendement et le taux de protéines. Une autre piste serait de tester la sensibilité de la valeur de l'indice de Shannon aux variations des adventices non identifiées. L'idée serait alors de faire des hypothèses sur la répartition de ses adventices non identifiées parmi les espèces déjà identifiées sur la placette ou parmi des « nouvelles » espèces. On pourrait alors tester, pour des nombres d'adventices totaux différents, avec des parts d'adventices non identifiées différentes et des nombres d'espèces identifiées différents, les hypothèses suivantes :

- dans le cas où l'on ne crée pas de « nouvelles » espèces :
 - quel est l'effet d'une répartition équitable des adventices non identifiées parmi les espèces déjà identifiées ?
 - quel est l'effet d'une répartition aléatoire des adventices non identifiées parmi les espèces déjà identifiées ?
- dans le cas où l'on crée de « nouvelles » espèces, il faut alors :
 - déterminer le nombre « nouvelles » espèces à créer (autant que le nombre d'adventices non identifiées ou moins)
 - répartir les adventices non identifiées parmi ces nouvelles espèces (répartition équitable ou aléatoire).

On testerait alors l'effet de ces différentes hypothèses sur les valeurs prises par l'indice de Shannon pour évaluer l'effet de ces adventices non identifiées sur la valeur de l'indice de

Figure 5.6. Définition des groupes fonctionnels d'adventices en fonction de leur compétitivité par rapport au blé. Les groupes sont classés du plus nuisible (groupe 1) au moins nuisible (groupe 5).



Shannon. On pourra conclure sur la sensibilité de l'indice de Shannon et/ou déterminer un seuil maximal à partir duquel le nombre d'adventices non identifiées modifie la valeur de l'indice de Shannon de manière trop importante.

Il est possible aussi que l'indice de Shannon ne soit pas pertinent pour rendre compte de l'effet de la diversité sur les performances du blé biologique car cet indice est trop intégrateur. Il prend en compte uniquement le nombre d'espèces rencontrées et le nombre d'individus par espèce. Avec cet indice, toutes les espèces sont considérées comme équivalentes. Cependant, on peut faire l'hypothèse que les adventices n'ont pas toutes la même nuisibilité vis-à-vis du blé (Wilson et Wright, 1990 ; Swanton *et al.*, 1999). Nous avons exploré cette piste en déterminant des groupes d'espèces ayant, *a priori*, une nuisibilité différente. Pour cela, nous avons identifié des groupes fonctionnels d'adventices (Garnier *et al.*, 2004) en fonction de critères de compétition vis-à-vis de la culture de blé. Nous avons alors fait l'hypothèse que des espèces ayant des profils écophysologiques similaires vont avoir une compétitivité similaire vis-à-vis de la culture (Storkey, 2006). Nous avons retenu les critères suivants (voir Fig. 5.6.):

- la classe (monocotylédones ou dicotylédones). Les monocotylédones ont une convergence de forme avec le blé c'est-à-dire un appareil végétatif morphologiquement proche de celui du blé. Elles affecteront donc plus facilement son rendement en rentrant en compétition sur les ressources nutritives (Dutoit *et al.*, 2001),
- la période de germination (printemps, automne ou indifférent). En fonction de leur période de germination, les adventices ne rentrent pas en concurrence avec le blé au même moment, leur nuisibilité est donc différente (Cousens *et al.*, 1987),
- le type de port. Dutoit *et al.* (2001) ont montré que les adventices à fort développement (biomasse et hauteur) étaient plus compétitives vis-à-vis du blé. Nous traduisons cela ici par l'idée que les adventices à port rampant, couché ou dressé sont moins compétitives que celles à port dressé et ramifié.

Chacune des espèces rencontrées a été classée dans un des cinq groupes fonctionnels définis à l'aide des trois critères retenus¹. Nous avons ensuite essayé de voir si la densité précoce de l'un ou l'autre de ces groupes fonctionnels pouvaient expliquer le rendement et la teneur en protéines des placettes. Pour cela, nous avons testé les mêmes modèles que ceux testés sur la population globale, avec et sans désherbage, et avec la méthode de régression quantile (voir chapitre 3). Nous avons alors montré que pour les adventices des groupes 4 et 5 (c'est-à-dire les annuelles vivaces ayant une germination printanière), qui sont *a priori* les moins nuisibles, les modèles testés étaient adaptés puisque les paramètres estimés étaient différents de 0. Les figures 5.7. et 5.8. montrent les courbes de quantiles qui ont été ajustées pour ces deux

¹ La classification des espèces rencontrées est présentée en Annexe VII

Figure 5.7. Rendement et densité précoce du groupe 4 représentés avec les régressions quantiles estimées pour le modèle qui prend en compte le désherbage ($\tau = 0.5$ à $\tau = 0.95$)

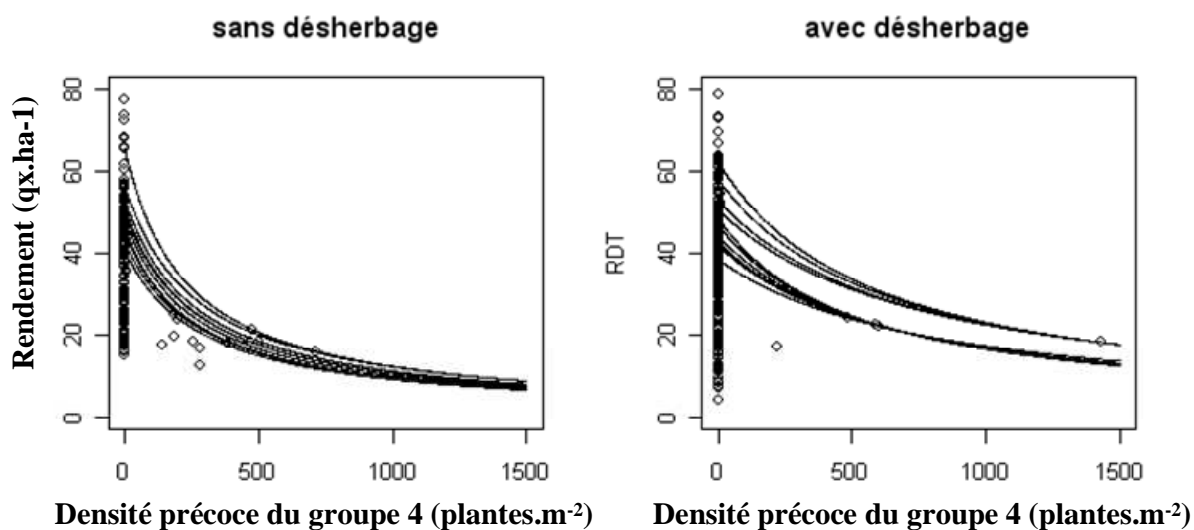
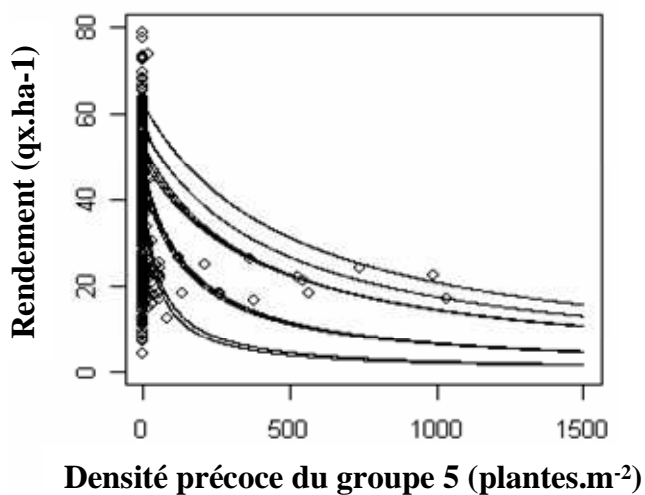


Figure 5.8. Rendement et densité précoce du groupe 5 représentés avec les régressions quantiles estimées pour le modèle qui ne prend pas en compte le désherbage ($\tau = 0.5$ à $\tau = 0.95$)



groupes. Pour le groupe 4, les printanières à port dressé et ramifié, nous avons montré un effet positif du désherbage sur le rendement, c'est-à-dire que le désherbage a permis de réduire les pertes de rendement. Pour le groupe 5, les printanières à port rampant, couché ou dressé, nous n'avons pas mis en évidence d'effet du désherbage. Il semble donc que la densité des groupes d'espèces printanières permette de bien rendre compte de l'effet des adventices sur le rendement, même si on peut penser qu'elles sont moins nuisibles que des espèces qui apparaissent plus tôt dans le cycle (adventices à germination automnale). On peut alors penser que la compétition entre les adventices et le blé est plus dommageable pour le rendement lorsque ce sont des espèces printanières qui entrent en compétition. Pour la teneur en protéines, quel que soit le groupe fonctionnel, les modèles testés ne s'ajustaient pas aux données. Il est apparu donc difficile de relier la teneur en protéines à un groupe fonctionnel. Notons tout de même que tous les groupes identifiés n'étaient pas représentés sur toutes les placettes. Sur ces placettes, la densité associée au groupe était alors égale à zéro. De ce fait les données étaient relativement déséquilibrées puisqu'un grand nombre de placettes avaient une densité égale à zéro, pour chacun des groupes fonctionnels considérés. Il est probable que cela rende difficile l'ajustement des courbes de régression quantile. Avoir, pour chaque groupe fonctionnel, un réseau de placettes qui représente une large gamme de densités pourrait permettre de confirmer les résultats obtenus pour les groupes 4 et 5 et de tester des modèles pour expliquer la teneur en protéines.

3. Vers un outil d'aide à la décision

Les résultats obtenus dans les chapitres 3 et 4 peuvent être valorisés en contribuant à la mise au point d'outils d'aide à la décision orientés vers le raisonnement des pratiques de fertilisation et de désherbage. Néanmoins, la mise au point d'un tel outil nécessite de compléter le travail déjà réalisé. Tout d'abord, les résultats obtenus dans le chapitre 4 peuvent être approfondis en mobilisant à nouveau le réseau d'agriculteurs enquêtés afin de rendre opérationnelle l'utilisation des indicateurs qui permettent de raisonner le désherbage et la fertilisation. De plus, pour valoriser les indicateurs mis au point dans le chapitre 3, il faut résoudre le problème de « traduction » des informations prélevées par les agriculteurs en indicateurs compatibles avec les modèles mis au point dans le chapitre 3.

3.1. Evaluation de la population d'adventices

3.1.1. Vers un indicateur défini collectivement

Dans le chapitre 4, nous avons montré que la « quantité » d'adventices sur une parcelle constituait, pour les agriculteurs, un indicateur de nuisibilité des adventices qui permettait également de déclencher certaines pratiques. Il serait alors intéressant de traduire cette appréciation globale et empirique en indicateur normalisé et utilisé par tous. Pour ce faire, il faudrait proposer des réunions collectives avec ces agriculteurs afin de leur permettre d'échanger, entre pairs, sur leur façon de prélever mais aussi de qualifier cette information. Il s'agit de mettre en évidence les seuils de « quantité » utilisés par les agriculteurs et de les

Encadré 5.1. L'approche par confrontation (Cahour et al., 2007)

« L'idée générale de l'approche par confrontation est de fournir à un sujet ou à un groupe de sujets des traces d'une activité (écrits, schémas, annotations, acquisitions automatiques d'actions sur ordinateur et, plus fréquemment, enregistrements audio et vidéo) dans le but de collecter des commentaires verbaux ou une description de cette activité. Le terme d'« autoconfrontation » s'applique au cas où le sujet, regardant un enregistrement de sa propre activité dans le but de le remettre dans le contexte de l'expérience passée, est interrogé à propos de cette activité. »

« L'autoconfrontation a parfois été utilisée simplement pour permettre au chercheur de se familiariser avec un domaine de tâches ; elle peut aussi être mise en œuvre pour confronter les sujets avec des enregistrements de l'activité d'autres sujets, dans un objectif d'apprentissage ou de développement. Mais historiquement parlant, l'approche « orthodoxe » considère l'« autoconfrontation » avant tout comme une méthode destinée à rassembler des données verbales sur les actions et l'expérience des sujets. C'est dans ce sens-là que nous l'utilisons ici. La vidéo est présentée aux sujets dans le but d'obtenir d'eux des rappels et des descriptions de leur expérience de la situation, pendant une séquence donnée d'événements, et ainsi nous fournir des informations relatives à des aspects non observables de leur activité. L'analyste peut éventuellement contrôler l'adéquation entre la description verbale produite par le sujet et les traces de l'activité observée. »

« Nous utilisons ici la technique d'« autoconfrontation » avec le même arrière-plan théorique que celui de l'entretien d'explicitation et avec le même objectif de resituer les utilisateurs dans le contexte passé de leur activité pour les conduire à recontacter (par acte d'évocation) et à décrire leur expérience cognitive, émotionnelle et corporelle. »

« L'intervieweur doit mettre en œuvre un ensemble minimal de principes lorsqu'il pratique un entretien d'autoconfrontation. Principes tels que faciliter la re-contextualisation de l'expérience personnelle en évitant les questions pouvant induire des rationalisations en après-coup (tout comme l'entretien d'explicitation), ou bien fournir des indicateurs de l'activité en utilisant des petits retours en arrière sur la bande lorsque le sujet souhaite commenter une séquence particulière. La signification d'une action ou d'un événement particulier ne peut pas être rendue indépendamment du flux de l'activité ; de ce point de vue, la reconstitution de la dynamique de l'activité est un prérequis crucial pour obtenir des données significatives et le choix d'un média préservant la dynamique de l'action est donc d'une grande importance. »

normaliser. L'idée serait d'aboutir collectivement à une information à prélever qui fasse consensus et rassemble leurs façons de se représenter la population d'adventices.

Dans ce but, nous avons réalisé des enregistrements vidéo lors de la phase d'entretien sur les parcelles. Ces enregistrements présentent une partie du discours de l'agriculteur mais aussi les « savoir-faires », c'est-à-dire les gestes qu'ils effectuent sur leurs parcelles pour prélever de l'information. Nous pouvons alors envisager d'utiliser ces enregistrements pour avoir une approche par confrontation (voir encadré 5.1. ci-contre). Il s'agit de confronter les agriculteurs aux enregistrements de leurs activités, d'une part pour rassembler des données verbales sur les actions et les expériences des sujets, et d'autre part pour qu'ils échangent collectivement sur leurs « savoir-faires ». L'objectif final serait de définir collectivement un indicateur de quantité mais également un protocole de prélèvement de ce dernier, garantissant une homogénéité de la qualité des informations recueillies.

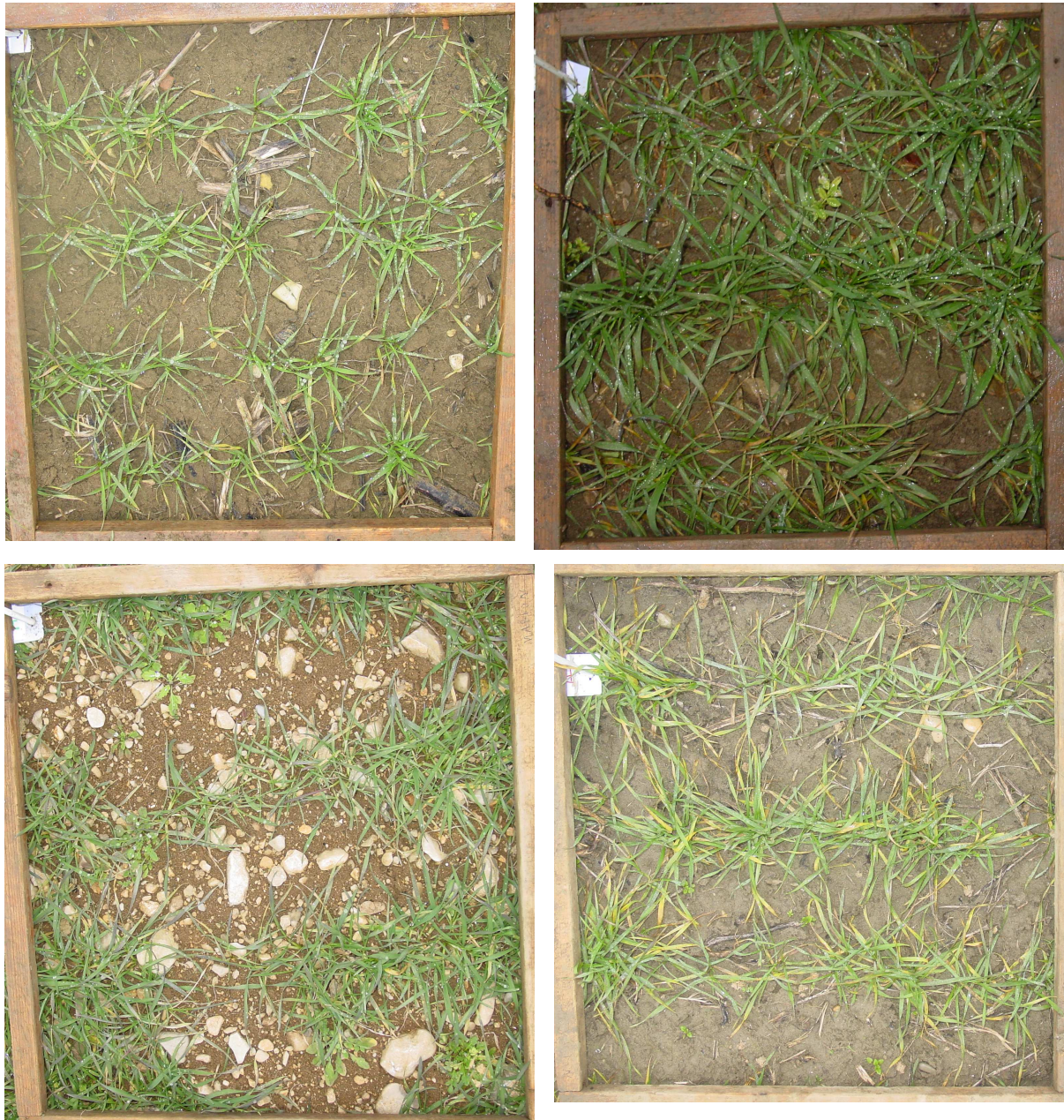
Enfin, on peut envisager que les chercheurs réalisent des prototypes d'indicateurs et de processus de prélèvement à l'issue de ces réunions qui seront rediscutés et éventuellement modifiés collectivement par la suite.

3.1.2. Traduction de la notion de « quantité »

Pour traduire cette notion de « quantité » exprimée par les agriculteurs, nous pouvons envisager deux démarches. La première consiste à traduire la notion de « quantité » en une valeur de densité à l'aide de photographies, qui sera directement réutilisée dans les modèles du chapitre 3. La seconde repose sur la mise au point d'un protocole d'évaluation de la densité qui prenne en compte ce que l'on connaît des modes de prélèvement des informations par les agriculteurs.

Afin de traduire la notion de « quantité » qui est visuelle pour les agriculteurs en une densité, c'est-à-dire un nombre de plantes par m², nous pouvons utiliser des photographies. Lors du suivi de la population d'adventices effectué pour le chapitre 3, nous avons fait des photographies de chacune des placettes. Nous avons donc à notre disposition des photographies de placettes de 0,25 m² à une date précoce (autour du stade épi 1 cm) et la densité mesurée correspondante. Il s'agit alors de déterminer des classes de densité pertinentes du point de vue de l'effet sur le rendement et sur la densité tardive. Pour choisir ces classes, on pourra s'inspirer de la grille de classe de densités proposée par Barralis (1976). De plus, Primot *et al.* (2006) ont montré que l'utilisation de classes de densités ne diminuait pas la qualité prédictive de modèles qui estiment une biomasse d'adventices en fonction d'une densité. Cela nous laisse penser que l'utilisation de classes dans nos modèles ne devrait pas être problématique. Pour chacune des classes définies, il faut associer des photographies ayant des densités correspondantes, de préférence avec des compositions de flore variées afin de balayer une gamme la plus complète possible de ce que l'on peut rencontrer comme population d'adventices pour une densité donnée. Un exemple de photographies qui

Figure 5.9. Photographies représentant des placettes pour lesquelles la densité d'adventices est comprise entre 0 et 100 plantes.m⁻²



pourraient être utilisées est disponible ci-contre (Figure 5.9.). On pourra également envisager des photographies supplémentaires afin de compléter la gamme. Des fiches seront alors créées, pour chacune des classes de densité, qui serviront de référence pour traduire la quantité en densité lorsque l'agriculteur se rendra sur sa parcelle. La seconde démarche propose d'établir un protocole d'évaluation de la densité. On demande alors aux agriculteurs d'effectuer des comptages précis d'adventices sur leurs parcelles sur une surface de référence.

Dans les deux cas, se pose alors la question de savoir comment aller observer sur la parcelle : combien de répétitions par parcelle doit faire l'observateur ? Dans quelles zones de la parcelle l'agriculteur doit-il observer ? De quelle taille doivent être les placettes observées ?

En effet, sur une parcelle, les adventices ne sont jamais réparties aléatoirement et ont tendance à être regroupées (Marshall, 1988 ; Wiles, 1992), ce qui limite la précision des estimations de pertes de rendement qui sont basées sur des densités d'adventices moyennes (Brain et Cousens, 1990). Par conséquent, il est nécessaire de réfléchir à la meilleure manière de prélever les échantillons spatialement. Colbach *et al.* (2000) ont testé trois méthodes d'échantillonnage de quadrats de 0,1 m² pour estimer les densités d'adventices sur une parcelle. Ils ont montré que globalement, l'échantillonnage systématique (échantillonnage le long d'une diagonale ou d'un tracé en zig-zag) permettait de réduire les erreurs d'estimation de la densité par rapport à une méthode d'échantillonnage aléatoire ou une méthode utilisant des cartes d'infestation de la parcelle (qui permettent de compter plus d'échantillons sur les zones plus infestées). Cependant, ces méthodes systématiques ne sont satisfaisantes que pour un nombre d'échantillons observés entre 15 et 20, ce qui semble être un nombre relativement élevé pour un tour de plaine classiquement réalisé par les agriculteurs. Lorsque l'on veut diminuer le nombre d'échantillons, les méthodes aléatoires (imposant une distance minimale entre échantillons) sont plus adaptées (Colbach *et al.*, 2000). Dans notre cas, il nous semble plus adapté d'utiliser ces méthodes systématiques, car les prélèvements aléatoires peuvent être biaisés par le fait que l'agriculteur est toujours inconsciemment guidé par quelque chose pour choisir ces zones d'observations, et notamment il peut être tenté de se rendre sur ses zones restreintes, où il sait que l'infestation est plus importante. On peut alors envisager d'exploiter cette connaissance « cartographique » qu'un agriculteur a de sa parcelle. On pourrait donc imaginer une procédure d'échantillonnage qui préconise de prélever uniquement dans les zones d'infestations connues. La densité d'adventices de la parcelle serait certainement surestimée. Dans la mesure où l'on se situe dans des stratégies de gestion de risque, peut-être est-ce plus pertinent d'évaluer les dommages maximaux (pour le rendement et la densité d'adventices à floraison) pour prendre une décision.

Ces procédures d'échantillonnage proposent de relever la densité d'adventices sur un certain nombre de quadrats par parcelle dont la moyenne correspond à une densité de la parcelle. Cette densité moyenne est ensuite introduite dans les modèles pour estimer les distributions de rendement et de densité à floraison. Cependant, notons que dans notre cas, les modèles ont été

testés à l'échelle de la placette, par conséquent, la validité de nos modèles n'a pas été testée pour des données moyennées (que ce soit les densités ou les rendements). Avant de préconiser l'utilisation de nos modèles à l'échelle de la parcelle, il faudra vérifier, à l'aide de nos données, que les relations sont valables également pour des moyennes de densités et des moyennes de rendements. On pourrait même envisager de faire des expérimentations supplémentaires afin de tester, d'une part, deux méthodes d'échantillonnage (une systématique et l'autre « experte », *i.e.* sur les zones à risques), et, d'autre part, l'effet de l'utilisation des moyennes de densités sur la prédiction des modèles.

3.2. Vers un outil d'aide à la décision pour gérer les pratiques de désherbage

Lorsque le protocole de prélèvement de l'indicateur de densité sera défini, il sera possible d'utiliser le modèle mis au point dans le chapitre 4 pour gérer les pratiques de désherbage. En effet, nous avons mis au point un modèle qui permet de prédire, en absence ou en présence de désherbage, la distribution des densités d'adventices à floraison à partir d'une densité précoce. Ce modèle permet donc d'évaluer, à partir d'une densité précoce, le risque de production de graines pour l'année suivante, limitée ou non par le désherbage.

Ce modèle ne permet pas de prédire directement la densité d'adventices de l'année suivante, mais la densité à floraison nous donne une indication sur une infestation potentielle due à une augmentation du stock semencier. Par conséquent, pour compléter notre modèle, il faudrait pouvoir relier cette densité à floraison à une infestation l'année suivante. Pour cela, on peut envisager d'utiliser des modèles dynamiques des populations d'adventices tels que ceux cités par Colbach et Debaeke (1998). Ces modèles représentent la totalité du cycle d'une espèce d'adventices en définissant les taux de mortalité et de survie d'un stade de la plante à l'autre. Récemment, ces types de modèles ont été améliorés et prennent en compte l'effet de pratiques culturales sur le cycle de l'adventice étudiée tel que celui de Colbach *et al.* (2007) pour le vulpin (*Alopecurus myosuroides*). Dans notre cas, il s'agirait de connaître la relation entre la densité à floraison et la production de graines, puis la relation entre le stock de graines dans le sol et l'émergence des adventices. Cependant, comme nous considérons des populations plurispécifiques, il semble difficile de mettre au point ces relations. Toutefois, l'objectif doit être de limiter au maximum le risque de production de graines, quelle que soit l'espèce d'adventice, en contrôlant la densité à floraison ce que confirme Riemens *et al.* (2007) en démontrant que les stratégies de désherbage les plus efficaces sont celles qui limitent au maximum l'alimentation du stock semencier.

Dans un premier temps, nous pouvons envisager de nous contenter de cette densité à floraison pour aider les agriculteurs à prendre leurs décisions de désherbage. Néanmoins, cela implique que les agriculteurs soient capables de définir un seuil d'adventices à floraison qu'ils ne veulent pas risquer d'atteindre. Une fois ce seuil défini, avec une population d'adventices observée précocement, ils auront à leur disposition une estimation de la distribution de la densité à floraison dans le cas où ils désherberaient et dans le cas où ils ne désherberaient pas.

Ces éléments leur permettront de décider s'ils souhaitent déclencher un désherbage mécanique ou non. Pour définir ce « seuil de tolérance », il est évident qu'il faut fournir aux agriculteurs des informations sur le lien entre la densité à floraison et la densité observée l'année suivante. Ce type d'informations est disponible via des modèles qui décrivent l'évolution interannuelle de certaines espèces d'adventices et qui permettent également d'évaluer l'intérêt d'utiliser un seuil de décision (Munier-Jolain *et al.*, 2002). Ces étapes préalables retardent *a priori* l'opérationnalité d'un potentiel outil d'aide à la décision.

Il existe par ailleurs un outil d'aide à la décision pour le désherbage du blé conduit en agriculture biologique qui permet d'évaluer les pratiques de désherbage et fournit des recommandations (Davies et Neuhoff, 2004 ; Neuhoff *et al.*, 2004). Cet outil est destiné aux agriculteurs et utilise comme entrées des informations sur la flore (abondance et composition), les conditions du site et les pratiques culturales. L'outil permet d'évaluer si la pression en adventices est contrôlable à l'aide de méthodes de lutte indirecte seulement, ou si des méthodes directes doivent les compléter (désherbage mécanique notamment). Il donne également des préconisations sur les variétés de blé adaptées du point de vue de leur compétitivité par rapport aux adventices présentes et évalue la compétitivité de la culture en fonction de l'espacement des rangs, de la fertilisation ou du travail du sol par exemple. Contrairement à notre modèle, cet outil exclut l'utilisation de seuils pour raisonner les pratiques. C'est un outil de gestion stratégique, principalement axé sur la compétitivité de la culture par rapport aux adventices, qui fournit une évaluation globale du système. Dans notre cas, le modèle que nous proposons se situe à l'échelle du cycle cultural et renseigne sur la gestion tactique des adventices. Dans les deux cas, l'objectif n'est pas de préconiser directement un déclenchement de pratiques mais plutôt de donner des informations aux agriculteurs pour raisonner leurs pratiques. Les deux outils peuvent donc s'avérer complémentaires pour aider les agriculteurs à gérer leurs pratiques de désherbage.

3.3. Vers un outil d'aide à la décision pour gérer les pratiques de fertilisation azotée

Dans le chapitre 3, nous avons montré qu'il était possible de prédire des distributions de rendement à partir de densités précoces d'adventices. Ces distributions peuvent être utilisées pour déterminer un rendement objectif qui permet de calculer des doses d'azote à apporter pour la fin du cycle grâce à la méthode du bilan (voir chapitre 3 section 6.3.2.).

Le modèle AZODYN-ORG est un modèle dynamique, mis au point par David *et al.* (2004b, 2005b), qui permet de prédire le rendement et la teneur en protéines d'une parcelle de blé biologique en fonction de l'azote disponible dans le sol, de l'eau disponible et des conditions climatiques (rayonnement et précipitations). Il permet de classer des stratégies de fertilisation azotée en fonction de leurs marges brutes respectives. Cependant, David *et al.* (2005b) soulignent que les prédictions et le classement des stratégies ne sont satisfaisants que dans les

cas où l'azote et les conditions climatiques sont les seuls facteurs qui limitent le rendement, car le modèle ne prend pas en compte les autres facteurs limitants.

Dans sa construction, le modèle utilise une valeur de « rendement-plafond », c'est-à-dire un rendement maximal qui ne peut être dépassé et qui dépend de la variété utilisée. On pourrait envisager d'utiliser la relation que l'on a établie entre rendement et densité d'adventices pour déterminer un « rendement-plafond » qui prenne en compte l'effet des adventices sur le rendement. Pour cela, il faut utiliser l'équation de la courbe de régression quantile établie pour $\tau = 0,95$. En effet, cette courbe correspond à la courbe-enveloppe, c'est-à-dire qu'elle est ajustée sur les points pour lesquels on suppose que les adventices étaient le seul facteur limitant plafonnant le rendement. Dans ce cadre, en connaissant la densité précoce d'adventices sur la parcelle, ou en faisant une hypothèse sur celle-ci, on peut établir le rendement correspondant pour $\tau = 0,95$. Ce rendement devient alors le « rendement-plafond » dans AZODYN-ORG s'il est inférieur au « rendement-plafond » de la variété. Dans le cas où le « rendement-plafond » de la variété serait inférieur à celui défini pour la densité d'adventices donnée, il serait conservé dans le modèle. Une fois ce « rendement-plafond » remplacé, le modèle permettrait de classer les stratégies de fertilisation en prenant en compte à la fois l'azote, l'eau et le rayonnement mais aussi la pression en adventices.

On peut également envisager d'utiliser notre travail pour calculer de nouvelles marges brutes. Ainsi, on peut valoriser la distribution que nous avons mise au point dans le chapitre 3 pour donner des exemples de marge brute associée à des stratégies de fertilisation pour des niveaux d'adventices donnés. La démarche serait la suivante : on choisit une densité (qui correspond à une densité observée sur une parcelle par exemple) et on détermine alors la distribution de rendement pour cette densité (voir Fig. 3.3., par exemple) à l'aide des courbes de régression quantile. Pour avoir des valeurs extrémisées, on utilise cette distribution pour déterminer le rendement que l'on a 50 % de chances d'atteindre ($\tau = 0,50$) et celui que l'on a 5 % de chances d'atteindre ($\tau = 0,95$). On choisit également plusieurs stratégies de fertilisation que l'on veut tester et on calcule la marge brute en fonction des rendements espérés et des types de fertilisation. On obtient alors deux classements de stratégies de fertilisation azotée : un pour le rendement faible (50 % de chances) et un pour le rendement élevé (5 % de chances). Cela permet d'avoir des éléments pour décider des stratégies de fertilisation à appliquer en fonction de l'état d'infestation des adventices sur une parcelle.

3.4. Vers un outil pour faciliter la collecte

La prédiction de la teneur en protéines des grains peut permettre de faciliter la collecte des lots de blé biologique. En effet, il est intéressant pour les organismes de collecte de connaître avant la récolte la teneur en protéines attendue sur une parcelle pour pouvoir organiser la collecte des lots à l'échelle d'un bassin de production et anticiper leur position sur les marchés.

Pour cela, une perspective est d'utiliser la méthode de diagnostic agronomique sur la teneur en protéines avec une méthode de mélange de modèles, mais en l'appliquant à des modèles de régressions logistiques. Les variables à tester seront alors les facteurs limitants et les pratiques

mis en évidence dans le diagnostic réalisé dans le chapitre 2. Les régressions logistiques permettent de prédire la probabilité de dépasser ou non un seuil (Agresti, 1990) au lieu de prédire une valeur discrète comme dans le cas des régressions linéaires. L'intérêt serait alors de prédire la probabilité de dépasser ou non le seuil de panification de 10,5 % de teneur en protéines en fonction de certaines pratiques culturales et des facteurs limitants observés sur une parcelle. Ce type d'approche peut se révéler d'un grand intérêt pour les organismes de collecte qui peuvent ainsi anticiper leurs allotements (Le Bail, 2000).

4. Conclusion générale

Le travail réalisé dans le cadre de cette thèse apporte de nouvelles connaissances pour améliorer les performances du blé conduit en agriculture biologique. Tout d'abord, il a permis de mettre en évidence les facteurs limitants et les pratiques agricoles qui expliquent la variabilité des rendements et de la teneur en protéines du blé biologique en région Rhône-Alpes. Ces résultats offrent la possibilité de fournir des références techniques supplémentaires aux conseillers et agriculteurs biologiques pour améliorer les performances de cette culture et réduire leur variabilité. De plus, les modèles mis au point pour juger de la nuisibilité des adventices peuvent permettre d'aider à raisonner les pratiques de désherbage et de fertilisation du blé biologique. Enfin, le travail d'identification des informations prélevées par les agriculteurs en cours de cycle permet de prendre en compte la manière dont les agriculteurs prélèvent des informations sur leurs parcelles pour prendre leurs décisions tactiques et stratégiques. A terme, les résultats de ce travail pourront être valorisés dans la construction d'un outil d'aide à la décision (pour raisonner les pratiques de désherbage et de fertilisation). Maîtriser et améliorer les performances du blé biologique va permettre de maintenir voire d'augmenter la production de cette culture afin qu'elle reste économiquement viable pour les agriculteurs dans un contexte où les exigences de qualité sont accrues

Ce travail a également montré l'intérêt d'utiliser des méthodes statistiques telles que le mélange de modèles ou la régression quantile pour des données collectées à partir d'un réseau de parcelles agricoles. En effet, le mélange de modèles permet de pallier le problème de la sensibilité des résultats à une base de données pour la réalisation de diagnostics agronomiques. La régression quantile permet de modéliser des relations dans des contextes de facteurs limitants multiples. Les méthodes choisies dans ce travail, originales dans le domaine agronomique, se sont donc révélées bien adaptées à l'étude de situations agricoles. Enfin, le chapitre 4 a montré que le cadre conceptuel de la gestion des environnements dynamiques était bien adapté pour décrire et analyser les informations utiles aux agriculteurs pour prendre leurs décisions.

REFERENCES

Références

- Agence BIO** (2007). L'agriculture biologique française - Chiffres 2006. *Agence BIO*, Paris, France.
- Agresti, A.** (1990). *Categorical Data Analysis*. Wiley-Interscience, New York, USA.
- Akaike, H.** (1974). A new look at the statistical model identification. *IEEE Transactions on Automatic Control* **19**: 716-723.
- Alakukku, L. et Elonen, P.** (1995). Long-term effects of a single compaction by heavy field traffic on yield and nitrogen uptake of annual crops. *Soil and Tillage Research* **36**: 141-152.
- Albrecht, H.** (2005). Development of arable weed seedbanks during the 6 years after the change from conventional to organic farming. *Weed Research* **45**: 339-350.
- Amalberti, R. et Hoc, J.-M.** (1998). Analyse des activités cognitives en situation dynamique : Pour quels buts ? Comment ? *Le Travail humain* **61**: 209-234.
- Angonin, C., Caussanel, J.-P. et Meynard, J.-M.** (1996). Competition between winter wheat and *Veronica hederifolia* : influence of weed density and the amount and timing of nitrogen application. *Weed Research* **36**: 175-187.
- Arrow, K.** (1974). *Les limites de l'organisation*. PUF, Paris, France.
- Arvalis and Semences de France** (2007). *Mémento des semences : céréales à pailles et protéagineux*. Arvalis and Semences de France.
- Aubry, C.** (1995). Gestion de la sole d'une culture dans l'exploitation agricole. Cas du blé d'hiver en grande culture dans la région picarde. INA P-G. Paris, France.
- Aubry, C.** (2000). Modélisation de la gestion technique d'une culture dans l'exploitation agricole. *Revue Française de Gestion* **129**: 32-46.
- Aubry, C.** (2007). *La gestion technique des exploitations agricoles. Composante de la théorie agronomique*. Institut National Polytechnique de Toulouse. Toulouse, France.
- Aubry, C., Latiri-Souki, K., Dore, T. et Griner, C.** (1994). Analysis of factors limiting durum wheat yield in farmers' fields in a small semi-arid area in Tunisia. *Agronomie* **14**: 213-227.
- Audsley, E., Milne, A. et Paveley, N.** (2005). A foliar disease model for use in wheat disease management decision support systems. *Annals of Applied Biology* **147**: 161-172.
- Awan, N.A., Murdoch, A.J. et Gooding, M.J.** (2001). Interaction of N, herbicides and weeds for the grain yield and breadmaking quality of wheat. *Aspects of Applied Biology* **64**: 165-166.
- Badgley, C., Moghtader, J., Quintero, E., Zakem, E., Chappell, M.J., Avilés-Vazquez, K., Samulon, A. et Perfecto, I.** (2007). Organic agriculture and the global food supply. *Renewable Agriculture and Food Systems* **22**: 86-108.
- Bàrberi, P.** (2002). Weed management in organic agriculture : are we addressing the right issues ? *Weed Research* **42**: 177-193.
- Bàrberi, P. et Bonari, E.** (2005). Weed density and composition in conventional and low-input management systems for a six-year rotation in Central Italy. *Herbologia* **6**.
- Bàrberi, P., Silvestri, N. et Bonari, E.** (1997). Weed communities of winter wheat as influenced by input level and rotation. *Weed Research* **37**: 301-313.

- Barralis, G.** (1976). Méthode d'étude des groupements d'adventices des cultures naturelle : application à la Côte d'Or. *6th International Symposium on the Biology of Weeds*, Dijon, France. pp. 59-68.
- Bengtsson, J., Ahnstrom, J. et Weibull, A.C.** (2005). The effects of organic agriculture on biodiversity and abundance: a meta-analysis. *Journal of Applied Ecology* **42**: 261-269.
- Berti, A. et Zanin, G.** (1997). GESTINF: a decision model for post-emergence weed management in soybean (*Glycine max* (L.) Merr.). *Crop Protection* **16**: 109-116.
- Bhullar, S.S. et Jenner, C.F.** (1985). Differential responses to high temperatures of starch and nitrogen accumulation in the grain of four cultivars of wheat. *Australian Journal of Plant Physiology* **12**: 363-375.
- Biarnès, A.** (1998). La conduite du champ cultivé. Points de vue d'agronomes. ORSTOM, Paris, France.
- Blackshaw, R.E.** (2005). Fertilizer, manure and compost effects on weed growth and competition with winter wheat in western Canada. *Crop Protection* **24**: 971-980.
- Boiffin, J., Caneill, J., Meynard, J.-M. et Sebillotte, M.** (1981). Elaboration du rendement et fertilisation azotée du ble d'hiver en Champagne crayeuse. I. Protocole et méthode d'étude d'un problème technique régional. *Agronomie* **1**: 549-558.
- Bond, W. et Grundy, A.C.** (2001). Non-chemical weed management in organic farming systems. *Weed Research (Oxford)* **41**: 383-405.
- Boote, K.J., Jones, J.W., Mishoe, J.W. et Berger, R.D.** (1983). Coupling pests to crop growth simulators to predict yield reductions. *Phytopathology* **73**: 1581-1587.
- Brain, P. et Cousens, R.** (1990). The effect of weed distribution on predictions of yield loss. *Journal of Applied Ecology* **27**: 735-742.
- Brancourt-Hulmel, M., Lecomte, C. et Meynard, J.M.** (1999). A diagnosis of yield-limiting factors on probe genotypes for characterizing environments in winter wheat trials. *Crop Science* **39**: 1798-1808.
- Brisson, N., Seguin, B. et Bertuzzi, P.** (1992). Agrometeorological soil water balance for crop simulation models. *Agricultural and Forest Meteorology* **59**: 267-287.
- Burnham, K.P. et Anderson, D.R.** (2002). Model selection and multimodel inference: a practical information-theoretic approach. Springer-Verlag, New York, USA.
- Cade, B.S. et Guo, Q.** (2000). Estimating effects of constraints on plant performance with regression quantiles. *OIKOS* **91**: 245-254.
- Cade, B.S. et Noon, B.R.** (2003). A gentle introduction to quantile regression for ecologists. *Frontiers in Ecology and the Environment* **1**: 412-420.
- Cahour, B., Brassac, C., Vermersch, P., Bouraouis, J.-L., Pachoud, B. et Salembier, P.** (2007). Etude de l'expérience du sujet pour l'évaluation de nouvelles technologies : l'exemple de la communication médiée. *Revue d'anthropologie des connaissances* **1**: 85-120.
- Carcea, M., Salvatorelli, S., Turfani, V. et Mellara, F.** (2006). Influence of growing conditions on the technological performance of bread wheat (*Triticum aestivum* L.). *International Journal of Food Science & Technology* **41**: 102-107.
- Cathcart, R.J. et Swanton, C.J.** (2003). Nitrogen management will influence threshold values of green foxtail (*Setaria viridis*) in corn. *Weed Science* **51**: 975-986.
- Caussanel, J.P.** (1989). Nuisibilité et seuils de nuisibilité des mauvaises herbes dans une culture annuelle : situation de concurrence bispécifique. *Agronomie* **9**: 219-240.
- Cellier, J.-M.** (1996). Exigences et gestion temporelle dans les environnements dynamiques. In *La gestion du temps dans les environnements dynamiques*. Cellier, J.-M., De Keyser, V. et Valot, C. (Eds). PUF, Paris, France. pp. 19-48.

- Cerf, M., Papy, F., Aubry, C. et Meynard, J.-M.** (1990). Théorie agronomique et aide à la décision. In *Modélisation systémique et système agraire. Décision et organisation*. Brossier, J., Vissac B. et Le Moigne, J.-L. (Eds). INRA, Paris, France. pp. 181-202.
- Cerf, M.** (1996a). Les connaissances mobilisées par des agriculteurs pour la conception et la mise en oeuvre de dispositifs d'intervention culturale. *Le Travail Humain* **59**: 305-334.
- Cerf, M.** (1996b). Approche cognitive des pratiques agricoles : intérêts et limites pour les agronomes. *Natures Sciences Sociétés* **4**: 327-339.
- Cerf, M. et Sebillotte, M.** (1997). Approche cognitive des décisions de production dans l'exploitation agricole. *Economie Rurale* **239**: 11-18.
- Cerf, M. et Meynard, J.-M.** (2006). Les outils de pilotage des cultures : diversité de leurs usages et enseignements pour leur conception. *Natures Sciences Sociétés* **14**: 19-29.
- Chatelin, M.-H., Aubry, C., Poussin, J.-C., Meynard, J.M., Massé, J., Verjux, N., Gate, P. et Le Bris, X.** (2004). DéciBlé, a software package for wheat crop management simulation. *Agricultural Systems* **83**: 77-99.
- Clark, M.S., Ferris, H., Klonsky, K., Lanini, W.T., Bruggen, A.H.C.v. et Zalom, F.G.** (1998). Agronomic, economic, and environmental comparison of pest management in conventional and alternative tomato and corn systems in northern California. *Agriculture, Ecosystems and Environment* **68**: 51-71.
- Clarke, M.P., Gooding, M.J. et Semenov, M.A.** (2001). The effect of timing of water availability on soil nitrogen, nitrogen uptake and grain protein concentration of winter wheat. *Aspects Applied Biology* **64**: 103-110.
- Cochet, A.** (2005). La gestion de l'information écrite dans les exploitations d'élevage. *INRA/ENESAD*, Dijon, France.
- Colbach, N. et Debaeke, P.** (1998). Integrating crop management and crop rotation effects into models of weed population dynamics: a review. *Weed Science* **46**: 717-728.
- Colbach, N., Dessaint, F. et Forcella, F.** (2000). Evaluating field-scale sampling methods for the estimation of mean plant densities of weeds. *Weed Research* **40**: 411-430.
- Colbach, N., Chauvel, B., Gauvrit, C. et Munier-Jolain, N.M.** (2007). Construction and evaluation of ALOMYSYS modelling the effects of cropping systems on the blackgrass life-cycle: from seedling to seed production. *Ecological Modelling* **201**: 283-300.
- COMIFER** (1996). Calcul de la fertilisation azotée des cultures annuelles. *Comité Français d'Etude et de Développement de la Fertilisation Raisonnée*, Paris, France.
- Cooper, J.M., Schmidt, C.S., Wilkinson, A., Lueck, L., Hall, C.M., Shotton, P.N. et Leifert, C.** (2006). Effect of organic, 'low-input' and conventional production systems on disease incidence and severity in winter wheat. *Aspects of Applied Biology* **80**: 121-126.
- Cousens, R.** (1985a). A simple model relating yield loss to weed density. *Annals of Applied Biology* **107**: 239-252.
- Cousens, R.** (1985b). An empirical model relating crop yield to weed and crop density and a statistical comparison with other models. *Journal of Agricultural Science* **105**: 513-521.
- Cousens, R., Brain, P., O'Donovan, J.T. et O'Sullivan, P.A.** (1987). The use of biologically realistic equations to describe the effects of weed density and relative time of emergence on crop yield. *Weed Science* **35**: 720-725.
- Cowbrough, M.J., Brown, R.B. et Tardif, F.J.** (2003). Impact of common ragweed (*Ambrosia artemisiifolia*) aggregation on economic threshold in soybean. *Weed Science* **51**: 947-954.
- Darré, J.P.** (1985). La parole et la technique. L'univers de pensée des éleveurs du Ternois. L'Harmattan, Paris, France.

- Darré, J.P.** (2001). Veaux bretons et brebis alpines, entre objectivisme abstrait et relativisme. *Travailler* **2**: 89-103.
- David, C., Viaux, P. et Meynard, J.M.** (2004a). Les enjeux de la production de blé tendre biologique en France. *Courrier de l'Environnement de l'INRA* **51**: 43-53.
- David, C., Jeuffroy, M.-H., Recous, S. et Dorsainvil, F.** (2004b). Adaptation and assessment of the Azodyn model for managing the nitrogen fertilization of organic winter wheat. *European Journal of Agronomy* **21**: 249-266.
- David, C., Gelinas, P., Bonti-Ankomah, S. et Henning, J.** (2004c). Organic grains and products. In *Specialty grains for food and feed*. Abdel-Aal, E. et Wood, P. (Eds). American Association of Cereal Chemists, St Paul, USA. pp. 7-35.
- David, C., Jeuffroy, M.-H., Henning, J. et Meynard, J.-M.** (2005a). Yield variation in organic winter wheat : a diagnostic study in the Southeast of France. *Agronomy for Sustainable Development* **25**: 213-223.
- David, C., Jeuffroy, M.-H., Laurent, F., Mangin, M. et Meynard, J.M.** (2005b). The assessment of Azodyn-Org model for managing nitrogen fertilization of organic winter wheat. *European Journal of Agronomy* **23**: 225-242.
- David, C., Joud, S. et Bauer, L.** (2007). Maîtrise de la qualité des blés biologiques à l'échelle d'un bassin d'approvisionnement. Incidence des conditions de production sur les performances des blés biologiques. *Projet Pain Bio ACTA-INRA*, Lyon, France.
- David, C. et Joud, S.** (2008). État des lieux de la collecte du blé biologique panifiable en France. *Industrie des Céréales*: (sous presse).
- Davies, D.H., Hoad, S. et Boyd, L.** (2002). WECOF: A new project developing enhanced weed control through improved crop and plant architecture. *UK Organic Research*, Aberystwyth. pp. 299-302.
- Davies, D.H.K. et Neuhoff, D.** (2004). Development of a Decision Support System (DSS) for weed management in organic winter wheat production. *European weed research society. 6th EWRS workshop on physical and cultural weed control*, Lillehammer, Norway. pp. 9.
- Dawson, J.C., Huggins, D.R. et Jones, S.S.** (2008). Characterizing nitrogen use efficiency in natural and agricultural ecosystems to improve the performance of cereal crops in low-input and organic agricultural systems. *Field Crops Research* **107**: 89-101.
- Debaeke, P., Aussenac, T., Fabre, J.L., Hilaire, A., Pujol, B. et Thuries, L.** (1996). Grain nitrogen content of winter bread wheat (*Triticum aestivum* L.) as related to crop management and to the previous crop. *European Journal of Agronomy* **5**: 273-286.
- Debaeke, P.** (1997). Le désherbage intégré en grande culture: bases du raisonnement et perspectives d'application. *Cahiers Agricultures* **6**: 185-194.
- Détienne, M. et Vernant, J.-P.** (1974). Les Ruses de l'intelligence. La mètis des grecs. Flammarion, Paris, France.
- Dew, D.A.** (1972). An index of competition for estimating crop loss due to weeds. *Canadian Journal of Plant Science* **52**: 921-927.
- Doré, T., Sebillotte, M. et Meynard, J.-M.** (1997). A Diagnostic Method for Assessing Regional Variations in Crop Yield. *Agricultural Systems* **54**: 169-188.
- Doré, T., Clermont-Dauphin, C., Crozat, Y., David, C., Jeuffroy, M.-H., Loyce, C., Makowski, D., Malézieux, E., Meynard, J.-M. et Valantin-Morison, M.** (2008). Methodological progress in on-farm regional agronomic diagnosis. A review. *Agronomy for Sustainable Development* **28**: 151-161.
- Doyle, C.J., Cousens, R. et Moss, S.R.** (1986). A model of the economics of controlling *Alopecurus myosuroides* Huds. in winter wheat. *Crop Protection* **5**: 143-150.
- Dunbabin, V.M., Diggle, A.J., Rengel, Z. et Hugten, R.v.** (2002). Modelling the interactions between water and nutrient uptake and root growth. *Plant and Soil* **239**: 19-38.

- Dupuy, F. et Thoenig, J.-C.** (1985). L'administration en miettes. Fayard, Paris, France.
- Duru, M., Papy, F. et Soler, L.-G.** (1988). Le concept de modèle général et l'analyse du fonctionnement de l'exploitation agricole. *C.R. Académie d'Agriculture Française* **74**: 81-91.
- Dutoit, T., Gerbaud, E., Ourcival, J.M., Roux, M. et Alard, D.** (2001). A prospective research on the duality between morphological traits and plant competitive abilities: the case of weed species and wheat. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences. Serie III, Sciences de la Vie* **324**: 261-272.
- Efron, B. et Tibshirani, R.J.** (1993). An Introduction to the Bootstrap. Chapman and Hall, London, UK.
- Eisele, J.A.** (1998). Strategies for the control of *Vicia hirsuta* (L.) S.F. Gray in organic farming. *Mededelingen - Faculteit Landbouwkundige en Toegepaste Biologische Wetenschappen, Universiteit Gent*. pp. 705-711.
- El-Hage Scialabba, N.** (2007). Organic agriculture and food security. *FAO*, Roma, Italy.
- Fischer, R.A.** (1985). Number of kernels in wheat crops and the influence of solar radiation and temperature. *Journal of Agricultural Science* **105**: 447-461.
- Florez, J.A., Fischer, A.J., Ramirez, H. et Duque, M.C.** (1999). Predicting rice yield losses caused by multispecies weed competition. *Agronomy Journal* **91**: 87-92.
- Floux, P.** (à paraître). "S'il vous plaît... fais-moi voir une morille!" L'ethnographie comme "apprivoisement" de l'observateur par l'observé.
- Fowler, D.B.** (2003). Crop nitrogen demand and grain protein concentration of spring and winter wheat. *Agronomy Journal* **95**: 260-265.
- Gabriel, D., Roschewitz, I., Tschardt, T. et Thies, C.** (2006). Beta diversity at different spatial scales: plant communities in organic and conventional agriculture. *Ecological Applications* **16**: 2011-2021.
- Garnier, E., Cortez, J., Billès, G., Navas, M.-L., Roumet, C., Debussche, M., Laurent, G., Blanchard, A., Aubry, D., Bellmann, A., Neill, C. et Toussaint, J.-P.** (2004). Plant functional markers capture ecosystem properties during secondary succession. *Ecology* **85**: 2630-2637.
- Gautronneau, Y. et Manichon, H.** (1987). Guide méthodique du profil cultural. CEREF/GEARA, Lyon, France.
- Gewin, V.** (2004). Organic FAQs - Can organic farming replace conventional agriculture? *Nature* **428**: 798.
- Gibson, J.** (1977). The theory of affordances. In *Perceiving, Acting, Knowing; Toward an Ecological Psychology*. Shaw, R. et Bransford, J. (Eds). Lawrence Editions, Hillsdale, USA.
- Gooding, M.J., Davies, W.P., Thompson, A.J. et Smith, S.P.** (1993). The challenge of achieving breadmaking quality in organic and low input wheat in the UK - A review. *Aspects of Applied Biology* **36**: 189-198.
- Gooding, M.J., Ellis, R.H., Shewry, P.R. et Schofield, J.D.** (2003). Effects of restricted water availability and increased temperature on the grain filling, drying and quality of winter wheat. *Journal of Cereal Science* **37**: 295-309.
- Gras, R., Benoît, M., Deffontaines, J.-P., Duru, M., Lafarge, M., Langlet, A. et P.-L., O.** (1989). Le fait technique en agronomie. Activité agricole, concepts et méthodes d'étude. INRA L'Harmattan, Paris, France.
- Hald, A.B.** (1999). The impact of changing the season in which cereals are sown on the diversity of the weed flora in rotational fields in Denmark. *Journal of Applied Ecology* **36**: 24-32.
- Harvey, R.G. et Wagner, C.R.** (1994). Using Estimates of Weed Pressure to Establish Crop Yield Loss Equations. *Weed Technology* **8**: 114-118.

- Hatcher, P.E. et Melander, B.** (2003). Combining physical, cultural and biological methods: prospects for integrated non-chemical weed management strategies. *Weed Research* **43**: 303-322.
- Hayward, C.F., Jackson, D.R. et Smith, K.A.** (1993). Nitrogen efficiency of autumn, winter and spring applications of organic manures on winter cereals and its effect on grain yield and quality. *Aspects of Applied Biology* **36**: 301-310.
- Hoc, J.-M.** (1987). Psychologie cognitive de la planification. PUG, Grenoble, France.
- Hoc, J.-M.** (1996). Supervision et contrôle de processus. La cognition en situation dynamique. PUG, Grenoble, France.
- Hoc, J.-M. et Amalberti, R.** (1999). Analyse des activités cognitives en situation dynamique : D'un cadre théorique à une méthode. *Le Travail Humain* **62**: 97-125.
- Hole, D.G., Perkins, A.J., Wilson, J.D., Alexander, I.H., Grice, P.V. et Evans, A.D.** (2005). Does organic farming benefit biodiversity? *Biological Conservation* **122**: 113-130.
- Horowitz, W., Senzel, A. et Reynolds, H.** (1975). Official Methods of Analysis. Association of Official Analytical Chemists, Washington DC, USA.
- Huxham, S.K., Sparkes, D.L. et Wilson, P.** (2005). The effect of conversion strategy on the yield of the first organic crop. *Agriculture, Ecosystems & Environment* **106**: 345-357.
- Jaunereau, A.** (2005). Partir du raisonnement des agriculteurs pour élaborer un simulateur de mise en culture du colza. *Education Permanente* **165**: 115-126.
- Jeuffroy, M.-H. et Bouchard, C.** (1999). Intensity and duration of nitrogen deficiency on wheat grain number. *Crop Science* **39**: 1385-1393.
- Joly, N.** (2004). Ecrire l'événement : le travail agricole mis en mémoire. *Sociologie du travail* **46**: 511-527.
- Joulia, C.** (2005). Mise au point d'un indicateur précoce pour juger du risque d'apparition et de la nuisibilité des adventices. *INA P-G*, Paris, France.
- Jurik, T.W. et Zhang, S.** (1999). Tractor wheel traffic effects on weed emergence in central Iowa. *Weed Technology* **13**: 741-746.
- Justes, E., Mary, B., Meynard, J.M., Machet, J.M. et Thelier-Huche, L.** (1994). Determination of a critical nitrogen dilution curve for winter wheat crops. *Annals of Botany* **74**: 397-407.
- Justes, E., Jeuffroy, M.-H. et Mary, B.** (1997). The nitrogen requirement of major agricultural crops. Chapter 4 : Wheat, barley and durum wheat. *In Diagnosis of N status in crops*. Lemaire, G. (Eds), Springer-Verlag, Heidelberg, Germany. pp. 73-91.
- Kaufmann, J.-C.** (2004). L'entretien compréhensif. Armand Colin, Paris, France.
- Kobata, T., Palta, J.A. et Turner, N.C.** (1992). Rate of development of postanthesis water deficits and grain filling of spring wheat. *Crop Science* **32**: 1238-1242.
- Koenker, R.** (2004). Quantile regression in R: a vignette.
- Korres, N.E. et Froud-Williams, R.J.** (2001). The effects of varietal selection, seed rate and weed competition on quantitative and qualitative traits of grain yield in winter wheat. *Aspects of Applied Biology* **64**: 147-156.
- Korres, N.E. et Froud-Williams, R.J.** (2002). Effects of Winter wheat cultivars and seed rate on the biological characteristics of naturally occurring weed flora. *Weed Research* **42**: 417-428.
- Kouwenhoven, J.K.** (1997). Intra-row mechanical weed control - possibilities and problems. *Soil & Tillage Research* **41**: 87-104.
- Kropff, M.J. et Spitters, C.J.T.** (1991). A simple model of crop loss by weed competition from early observations on relative leaf area of the weeds. *Weed Research* **31**: 97-105.

- Kropff, M.J., Teng, P.S. et Rabbinge, R.** (1995). The challenge of linking pest and crop models. *Agricultural Systems* **49**: 413-434.
- Kwon, T.-J., Young, D.L., Young, F.L. et Boerboom, C.M.** (1995). PALWEED:WHEAT : A Bioeconomic Decision Model for Postemergence Weed Management in Winter Wheat (*Triticum aestivum*). *Weed Science* **43**: 595-603.
- Lahire, B.** (1998). Logiques pratiques : le " faire " et le " dire sur le faire ". *Recherche et Formation* **27**: 15-28.
- Lamine, C. et Bellon, S.** (2008). Conversion to organic farming: a multidimensional research object at the crossroads of agricultural and social sciences. A review. *Agronomy for Sustainable Development* **28**: (sous presse).
- Lampkin, N., Foster, C. et Padel, S.** (1999). The policy and regulatory environment for organic farming in Europe : country reports. In *Organic Farming in Europe : economics and policy*. Dabbert et al. (Eds). Universität Hohenheim, Stuttgart, Germany. pp.
- Landais, E. et Deffontaines, J.-P.** (1988). Les pratiques des agriculteurs. Point de vue sur un courant nouveau de la recherche agronomique. *Etudes Rurales* **109**: 125-158.
- Le Bail, M.** (2000). Du territoire au développement. Qualité des produits végétaux et territoire : contribution de l'agronomie. *Oléagineux, Corps Gras, Lipides* **7**: 499-503.
- Le Bail, M. et Meynard, J.M.** (2003). Yield and protein concentration of spring malting barley: the effects of cropping systems in the Paris Basin (France). *Agronomie* **23**: 23-27.
- Le Gouis, J., Béghin, D., Heumez, E. et Pluchard, P.** (2000). Genetic differences for nitrogen uptake and nitrogen utilisation efficiency in winter wheat. *European Journal of Agronomy* **12**: 163-173.
- Le Moigne, J.-L.** (1979). Informer la décision ou décider l'information. *Economies et Sociétés* **1**: 889-918.
- Le Roux, X., Barbault, R., Baudry, J., Burel, F., Doussan, I., Garnier, E., Herzog, F., Lavorel, S., Lifran, R., Roger-Estrade, J., Sarthou, J.-P. et Trommetter, M.** (2008). Agriculture et biodiversité. Valoriser les synergies. Synthèse du rapport d'expertise. *INRA*, Paris, France.
- Légère, A., Stevenson, F.C. et Benoit, D.L.** (2005). Diversity and Assembly of weed communities: contrasting responses across cropping systems. *Weed Research* **45**: 303-315.
- Lemerle, D., Verbeek, V., Coussens, R.D. et Coombes, N.E.** (1996). The potential for selecting wheat varieties strongly competitive against weeds. *Weed Research* **36**: 505-513.
- Leontiev** (1975). *Activité, conscience, personnalité*. Editions du Progrès, Moscou, Russie.
- Leplat, J.** (1995). A propos des compétences incorporées. *Education Permanente* **123**: 101-114.
- Leterme, P., Manichon, H. et Roger-Estrade, J.** (1994). Analyse intégrée des rendements du blé tendre et de leurs causes de variation dans un réseau de parcelles d'agriculteurs du Thymérais. *Agronomie* **14**: 341-361.
- Liebman, M. et Davis, A.S.** (2000). Integration of soil, crop and weed management in low-external-input farming systems. *Weed Research* **40**: 27-47.
- Lory, J.A. et Scharf, P.C.** (2003). Yield goal versus delta yield for predicting fertilizer nitrogen need in corn. *Agronomy Journal* **95**: 994-999.
- Lotz, L.A.P., Kropff, M.J., Bos, B. et Wallinga, J.** (1992). Prediction of yield loss based on relative leaf cover of weeds. *1st International Weed Control Congress*, Melbourne, Australia. pp. 290-292.
- Lotz, L.A.P., Christensen, S., Cloutier, D., Fernandez Quintanilla, C., Légère, A., Lemieux, C., Lutman, P.J.W., Pardo Iglesias, A., Salonen, J., Sattin, M., Stigliani, L. et**

- Tei, F.** (1996). Prediction of the competitive effect of weeds on crop yields based on the leaf area of weeds. *Weed Research* **36**: 93-101.
- Loyce, C. et Wéry, J.** (2006). Itinéraire technique, système de culture : de la compréhension du fonctionnement du champ cultivé à l'évolution des pratiques agricoles. Les outils des agronomes pour l'évaluation et la conception de systèmes de culture. In *L'agronomie aujourd'hui*. Doré, T., Le Bail, M., Martin, P., Ney, B. et Roger-Estrade, J. (Eds). Quae, Versailles, France. pp. 77-95.
- Lueck, L., Schmidt, C.S., Cooper, J.M., Hall, C.M., Shotton, P.N. et Leifert, C.** (2006). Effect of organic, low-input and conventional production systems on yield and quality of winter wheat. *Aspects of Applied Biology* **80**: 135-140.
- Macilwain, C.** (2004). Organic FAQs - Is organic farming better for the environment? *Nature* **428**: 797-798.
- Mäder, P., Fliessbach, A., Dubois, D., Gunst, L., Fried, P. et Niggli, U.** (2002). Soil Fertility and Biodiversity in Organic Farming. *Science* **296**: 1694-1697.
- Magne, M.-A.** (2007). Modéliser le système d'information des agriculteurs - Le cas des éleveurs de bovins allaitants. Université Montpellier II, Sciences et techniques du Languedoc, Montpellier SupAgro. Montpellier, France.
- Magurran, A.E.** (2003). Measuring biological diversity. Blackwell Publishing, Oxford, UK.
- Makowski, D., Dore, T. et Monod, H.** (2007). A new method to analyse relationships between yield components with boundary lines. *Agronomy for Sustainable Development* **27**: 119-128.
- Marshall, E.J.P.** (1988). Field-scale estimates of grass weed populations in arable land. *Weed Research* **28**: 191-198.
- Marshall, E.J.P., Brown, V.K., Boatman, N.D., Lutman, P.J.W., Squire, G.R. et Ward, L.K.** (2003). The role of weeds in supporting biological diversity within crop fields. *Weed Research* **43**: 77-89.
- Mason, M.G. et Madin, R.W.** (1996). Effect of weeds and nitrogen fertiliser on yield and grain protein concentration of wheat. *Australian Journal of Experimental Agriculture* **36**: 443-450.
- Melander, B., Cirujeda, A. et Jorgensen, M.H.** (2003). Effects of inter-row hoeing and fertilizer placement on weed growth and yield of winter wheat. *Weed Research* **43**: 428-438.
- Menalled, F.D., Gross, K.L. et Hammond, M.** (2001). Weed aboveground and seedbank community responses to agricultural management systems. *Ecological Applications* **11**: 1586-1601.
- Mercer, P.C.** (2006). Growing organic cereals in Northern Ireland - disease and weed problems. *Aspects of Applied Biology* **79**: 229-232.
- Meynard, J.M. et Aubry, C.** (1988). Itinéraires techniques pour le blé en excès d'eau. *Perspectives agricoles* **126**: 80-89.
- Miller, A.** (2002). Subset selection in regression. Chapman and Hall/CRC, New-York, USA.
- Ministère de l'Ecologie du Développement Durable et de l'Aménagement du Territoire MEDDAT** (2007). Le Grenelle de l'environnement. Document récapitulatif des tables rondes tenues à l'hôtel de Roquelaure les 24, 25 et 26 Octobre 2007.
- Miyazawa, K., Tsuji, H., Yamagata, M., Nakano, H. et Nakamoto, T.** (2004). Response of weed flora to combinations of reduced tillage, biocide application and fertilization practices in a 3-year crop rotation. *Weed Biology and Management* **4**: 24-34.
- Moffitt, L.J. et Bhowmik, P.C.** (2006). Design for rectangular hyperbolic crop-weed competition. *Annals of Applied Biology* **149**: 87-89.

- Moreby, S.J., Aebischer, N.J., Southway, S.E. et Sotherton, N.W.** (1994). A comparison of the flora and arthropod fauna of organically and conventionally grown winter wheat in southern England. *Annals of Applied Biology* **125**: 13-27.
- Munier-Jolain, N., Chauvel, B. et Gasquez, J.** (2002). Long-term modelling of weed control strategies : analysis of threshold-based options for weed species with contrasted competitive abilities. *Weed Research* **42**: 107-122.
- Neuhoff, D., Schulz, D.G. et Köpke, U.** (2004). Application of a decision support system (DSS-WECOF) for weed management in organic winter wheat production. *XIIème colloque international sur la biologie des mauvaises herbes*, Dijon, France. pp.
- Ngouajio, M., Leroux, G.D. et Lemieux, C.** (1999). A flexible sigmoidal model relating crop yield to weed relative leaf cover and its comparison with nested models. *Weed Research* **39**: 329-343.
- Oerke, E.C. et Dehne, H.W.** (1997). Global crop production and the efficacy of crop protection-current situation and future trends. *European Journal of Plant Pathology* **103**: 203-215.
- Offermann, F. et Nieberg, H.** (2000). Economic performance of organic farms in Europe. In *Organic farming in Europe: economics and policy*. University of Hohenheim (Eds), Stuttgart, Germany. pp.
- ONIGC** (2006). Céréales bio : collecte 2005/2006. *ONIGC*, Paris, France.
- Oury, F.X., Berard, P., Brancourt-Hulmel, M., Depatureaux, C., Doussinault, G., Galic, N., Giraud, A., Heumez, E., Lecomte, C., Pluchard, P., Rolland, B., Rousset, M. et Trotter, M.** (2003). Yield and grain protein concentration in bread wheat: a review and a study of multi-annual data from a French breeding program. *Journal of Genetics & Breeding* **57**: 59-68.
- Palta, J.A. et Peltzer, S.** (2001). Annual ryegrass (*Lolium rigidum*) reduces the uptake and utilisation of fertiliser-nitrogen by wheat. *Australian Journal of Agricultural Research* **52**: 573-581.
- Palti, J.** (1981). Cultural practices and infectious crop diseases. Springer-Verlag, Berlin, Germany.
- Paolini, R., Principi, M., Froud-Williams, R.J., del Puglia, S. et Biancardi, E.** (1999). Competition between sugarbeet and *Sinapis arvensis* and *Chenopodium album*, as affected by timing of nitrogen fertilization. *Weed Research* **39**: 425-440.
- Papy, F.** (1994). Working knowledge concerning technical systems and decision support. In *Rural and Farming Systems Analysis, European Perspectives*. Dent, J.B. et McGregor, M.J. (Eds). Cab international, Edinburgh, UK. pp. 222- 235.
- Papy, F.** (2001). Interdependence of cultural systems in exploitation. In *Modelisation des agroecosystemes et aide a la decision*. Malezieux, E., Trebuil, G. et Jaeger, M. (Eds). La Librairie du Cirad, Montpellier, France. pp. 51-74.
- Pechanek, U., Karger, A., Groger, S., Charvat, B., Schoggl, G. et Lelley, T.** (1997). Effect of nitrogen fertilization on quantity of flour protein components, dough properties, and breadmaking quality of wheat. *Cereal Chemistry* **74**: 800-805.
- Peigné, J., Call, B.C., Roger-Estrade, J. et David, C.** (2007). Is conservation tillage suitable for organic farming? A review. *Soil Use and Management* **23**: 129-144.
- Penfold, C.M., Miyan, M.S., Reeves, T.G. et Grierson, I.T.** (1995). Biological farming for sustainable agricultural production. *Australian Journal of Experimental Agriculture* **35**: 849-856.
- Pinheiro, J.C. et Bates, D.M.** (2000). Mixed-effects models in S and S-PLUS. Springer, New-York, USA.

- Primot, S., Valantin-Morison, M. et Makowski, D.** (2006). Predicting the risk of weed infestation in winter oilseed rape crops. *Weed Research* **46**: 22-33.
- Prost, L.** (2008). Modéliser en agroécologie et concevoir des outils en interaction avec de futurs utilisateurs : le cas de la modélisation des interactions génotype-environnement et de l'outil Diagvar. AgroParisTech. Paris, France.
- Prost, L., Makowski, D. et Jeuffroy, M.-H.** (2008). Comparison of stepwise selection and Bayesian model averaging for yield gap analysis. *Ecological Modelling*: sous presse.
- Rabbinge, R., Rossing, W.A.H. et van der Werf, W.** (1990). The bridge function of production ecology in pest and disease management. *In Theoretical production Ecology: Reflections and Prospects*(Eds). PUDOC, Wageningen, The Netherlands. pp. 181-195.
- Raffaelli, M., Barberi, P., Peruzzi, A. et Ginanni, M.** (2005). Mechanical weed control in maize: evaluation of weed harrowing and hoeing systems. *Agricoltura Mediterranea* **135**: 33-43.
- 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. *Weed Research* **44**: 12-20.
- Reddiex, S.J., Wratten, S.D., Hill, G.D., Bourdot, G.W. et Frampton, C.M.** (2001). Evaluation of mechanical weed management techniques on weed and crop populations. *New Zealand Plant Protection*, Rotorua, New Zealand, New Zealand Plant Protection Society. pp. 174-178.
- Reganold, J.P., Glover, J.D., Andrews, P.K. et Hinman, H.R.** (2001). Sustainability of three apple production systems. *Nature* **410**: 926-930.
- Riemens, M.M., Groeneveld, R.M.W., Lotz, L.A.P. et Kropff, M.J.** (2007). Effects of three management strategies on the seedbank, emergence and the need for hand weeding in an organic arable cropping system. *Weed Research* **47**: 442-451.
- Riquois, A.** (1997). Pour une Agriculture biologique au coeur de l'agriculture française. Proposition pour un Plan pluriannuel de développement. Rapport d'étape. *Ministère de l'Agriculture et de la Pêche, Conseil général du Génie rural des Eaux et Forêts*, Paris, France.
- Roger-Estrade, J., Richard, G., Bertrand, M., Darboux, F. et Défossez, P.** (2006). Effets des systèmes de culture sur l'évolution des états du milieu cultivé. La composante physique. *In L'agronomie aujourd'hui*. Doré, T., Le Bail, M., Martin, P., Ney, B. et Roger-Estrade, J. (Eds). Quae, Versailles, France. pp. 225-243.
- Rolland, B., Bouchard, C., Loyce, C., Meynard, J.-M., Guyomard, H., Lonnet, P. et Doussinault, G.** (2003). Des itinéraires techniques à bas niveaux d'intrants pour des variétés rustiques de blé tendre : une alternative pour concilier économie et environnement. *Courrier de l'environnement de l'INRA* **49**.
- Roschewitz, I., Gabriel, D., Tschardt, T. et Thies, C.** (2005). The effects of landscape complexity on arable weed species diversity in organic and conventional farming. *Journal of Applied Ecology* **42**: 873-882.
- Samuel, A.M. et East, J.** (1990). Organically grown wheat - the effect of crop husbandry on grain quality. *Aspects of Applied Biology* **25**: 199-208.
- Samurçay, R. et Hoc, J.-M.** (1989). Spécification et évaluation expérimentale d'aides logicielles aux activités de contrôle d'un environnement dynamique : conduite d'un haut fourneau. *Premières Journées nationales PIRTTEM de psychologie du travail, ergonomie et psychopathologie du travail*, Paris, France. pp. 62-72.
- Samurçay, R. et Rogalski, J.** (1992). Formation aux activités de gestion d'environnements dynamiques : concepts et méthodes. *Education Permanente* **111**: 227-242.
- Saulas, P. et Meynard, J.-M.** (1998). Production intégrée et extensification sont-elles compatibles? Cas des céréales à paille. *L'extensification. Les Dossiers de l'environnement de l'INRA* **16**: 9-15.

- Savary, S., Castilla, N.P., Elazegui, F.A., McLaren, C.G., Ynalvez, M.A. et Teng, P.S.** (1995). Direct and indirect effects of nitrogen supply and disease source structure on rice sheath blight spread. *Phytopathology* **85**: 959-965.
- Schneeberger, W., Darnhofer, I. et Eder, M.** (2002). Barriers to the Adoption of Organic Farming by Cash-Crop Producers in Austria. *American Journal of Alternative Agriculture* **17**: 24-31.
- Schoeny, A., Devienne-Barret, F., Jeuffroy, M.-H. et Lucas, P.** (2003). Effect of take-all root infections on nitrate uptake in winter wheat. *Plant Pathology* **52**: 52-59.
- Sebillotte, M.** (1969). Le "tour de plaine". Facteur de rentabilité dans l'entreprise agricole. *Etude FNCETA, Entreprise Agricole*, Paris, France.
- Sebillotte, M.** (1978). Itinéraires techniques et évolution de la pensée agronomique. *C.R. Académie d'Agriculture Française* **11**: 906-913.
- Sebillotte, M.** (1979). Analyse du fonctionnement des exploitations agricoles. Trajectoire et typologie. *INRA*, Toulouse, France.
- Sebillotte, M.** (1980). An analysis of yield elaboration in wheat. In *Wheat technical monograph*(Eds). CIBA-GEIGY, Basel, Suisse. pp. 25-32.
- Sebillotte, M.** (1990). Système de culture, un concept opératoire pour les agronomes. In *Les systèmes de culture*. Combe, L. et Picard, D. (Eds). *INRA*, Paris, France. pp. 165-196.
- Sebillotte, M. et Soler, L.-G.** (1990). Les processus de décision des agriculteurs. Acquis et questions vives. In *Modélisation systémique et systèmes agraires*. Brossier, J., Vissac, B. et Lemoigne, J.-L. (Eds). *INRA*, Paris, France. pp. 103-117.
- Singh, B. et Jenner, C.F.** (1984). Factors controlling endosperm cell number and grain dry weight in wheat : effects of shading on intact plants and of variation in nutritional supply to detached, cultured ears. *Australian Journal of Plant Physiology* **11**: 151-163.
- Sofield, I., Wardlaw, I.F., Evans, L.T. et Zee, S.Y.** (1977). Nitrogen, phosphorus and water contents during grain development and maturation in wheat. *Australian Journal of Plant Physiology* **4**: 799-810.
- Spiertz, A.** (1977). The influence of temperature and light intensity on grain growth in relation to the carbohydrate and nitrogen economy of the wheat plant. *Netherlands Journal of Agricultural Science* **25**: 182-197.
- Spitters, C.J.T., Kropff, M.J. et Groot, W.d.** (1989). Competition between maize and *Echinochloa crus-galli* analysed by a hyperbolic regression model. *Annals of Applied Biology* **115**: 541 - 551.
- Stanford, G.** (1973). Rationale for optimum nitrogen fertilization in corn production. *Journal of Environmental Quality* **2**: 159-166.
- Stiefel, W. et Popay, A.I.** (1990). Weed control in organic arable crops. *34th New Zealand Weed and Pest Control Conference*, New Zealand. pp. 138-141.
- Storkey, J.** (A functional group approach to the management of UK arable weeds to support biological diversity). 2006. *Weed Research* **46**: 513-522.
- Suchman, L.** (1990). Plans d'action - Problèmes de représentation de la pratique en sciences cognitives. *Raisons Pratiques* **1**: 149-170.
- Swanton, C.J., Weaver, S., Cowan, P., Van Acker, R., Deen, W. et Shreshta, A.** (1999). Weed Thresholds : Theory and Applicability. *Journal of Crop Production* **2**: 9-29.
- Swinton, S.M. et Lyford, C.P.** (1996). A test for choice between hyperbolic and sigmoidal models for crop yield response to weed density. *Journal of Agricultural, Biological, and Environmental Statistics* **1**: 97-106.

- Tamm, L.** (2000). The future challenges and prospects in organic crop protection. *IFOAM 2000: the world grows organic. 13th International IFOAM Scientific Conference*, Basel, Switzerland. pp. 106-109.
- Tardieu, F. et Manichon, H.** (1987). Etat structural, enracinement et alimentation hydrique du maïs. II. - Croissance et disposition spatiale du système racinaire. *Agronomie* **7**: 201-211.
- Taylor, B.R., Watson, C.A., Stockdale, E.A., McKinlay, R.G., Younie, D. et Cranstoun, S.A.A.** (2001). Current practices and future prospects for organic cereal production : survey and literature review. *HGCA*, London, UK.
- Tillett, N.D., Hague, T., Blair, A.M., Jones, P.A., Ingle, R. et Orson, J.H.** (1999). Precision inter-row weeding in winter wheat. *Brighton crop protection conference: weeds*, Brighton, UK, British Crop Protection Council. pp. 975-980.
- Tilman, D., Cassman, K.G., Matson, P.A., Naylor, R. et Polasky, S.** (2002). Agricultural sustainability and intensive production practices. *Nature* **418**: 671-677.
- Trewavas, A.** (2001). Urban myths of organic farming. *Nature* **410**: 409-410.
- Trewavas, A.** (2002). Malthus foiled again and again. *Nature* **418**: 668-670.
- Valantin-Morison, M. et Meynard, J.M.** (2008). Diagnosis of limiting factors of organic oilseed rape yield. A survey of farmers' fields. *Agronomy for Sustainable Development*: (DOI: 10.1051/agro:2008026).
- van Bruggen, A.H.C.** (1995). Plant Disease Severity in High-Input Compared to Reduced-Input and Organic Farming Systems. *Plant Disease* **79**: 976-984.
- Van Daele, A. et Carpinelli, F.** (2001). La planification dans la gestion des environnements dynamiques : quelques apports récents de la psychologie ergonomique. *Psychologie Française* **46**: 143-152.
- Vermersch, P.** (1994). L'entretien d'explicitation. ESF, Paris, France.
- Vermersch, P.** (2004). Aide à l'explicitation et retour réflexif. *Education Permanente* **160**: 71-80.
- Wallinga, J. et Oijen, M.v.** (1997). Level of threshold weed density does not affect the long-term frequency of weed control. *Crop Protection* **16**: 273-278.
- Walz, E.** (2004). Final Results of the fourth national organic farmers' survey: Sustaining Organic Farms in a Changing Organic Marketplace. *Organic Farming Research Foundation*, Santa Cruz, USA.
- Walz, E.** (2004). Fourth national organic farmers' survey: Sustaining Organic Farms in a Changing Organic Marketplace. *Organic Farming Research Foundation*, Santa Cruz, USA.
- Wardlaw, I.F.** (1966). The effect of water stress on translocation in relation to photosynthesis and growth. *Australian Journal of Biological Sciences* **20**: 25-39.
- Welsh, J.P., Bulson, H.A.J., Stopes, C.E., Froud-Williams, R.J. et Murdoch, A.J.** (1996). Weed control in organic winter wheat using a spring-tine weeder. *Second international weed control congress*, Copenhagen, Denmark, Department of Weed Control and Pesticide Ecology. pp. 1127-1132.
- Welsh, J.P., Bulson, H.A.J., Stopes, C.E., Froud-Williams, R.J. et Murdoch, A.J.** (1999). The critical weed-free period in organically-grown winter wheat. *Annals of Applied Biology* **134**: 315-320.
- Whittingham, M.J., Stephens, P., Bradbury, R.B. et Freckleton, R.P.** (2006). Why do we still use stepwise modelling in ecology and behaviour? *Journal of Animal Ecology* **75**: 1182-1189.
- Wibawa, G.** (1992). Approche par enquête et expérimentation de l'effet de l'état structural du sol sur la nutrition azotée et l'élaboration du rendement de l'orge de brasserie. INA P-G. Paris, France.

- Wiles, L.J., Oliver, G.W., York, A.C., Gold, H.J. et Wilkerson, G.G. (1992). Spatial distribution of broadleaved weeds in North Carolina soyabean (*Glycine max*) fields. **40**: 554-557.
- Wilkerson, G.G., Modena, S.A. et Coble, H.D. (1991). HERB: Decision Model for Postemergence Weed Control in Soybean. *Agronomy Journal* **83**: 413-417.
- Wilkinson, A., Young, D., Cooper, J.M., Wilkockson, S. et Leifert, C. (2006). Effect of fertility management and variety choice on yield and baking quality of organic spring and winter wheat. *Aspects of Applied Biology* **80**: 147-151.
- Wilkinson, A., Young, D., Lueck, L., Cooper, J.M., Wilkockson, S. et Leifert, C. (2007). Effect of clover management (Rhizobium seed inoculation and greenwaste compost amendments) and variety choice on yield and baking quality of organic spring and winter wheat. *Proceedings of the 3rd International Congress of the European Integrated Project QLIF*, University of Hohenheim, Germany. pp. 185-188.
- Willer, H. et Youssefi, M. (2007). The World of Organic Agriculture. Statistics and Emerging Trends 2007. *IFOAM & FiBL*, Bonn, Germany.
- Wilson, B.J., Cousens, R. et Wright, K.J. (1990). The response of spring barley and winter wheat to *Avena fatua* population density. *Annals of Applied Biology* **116**: 601-609.
- Wilson, B.J. et Wright, K.J. (1990). Predicting the growth and competitive effects of annual weeds in wheat. *Weed Research* **30**: 201-211.
- Yang, Y. (2003). Regression with multiple candidate models: selecting or mixing? *Statistica Sinica* **13**: 783-809.
- Zahedi, M., McDonald, G. et Jenner, C.F. (2004). Nitrogen supply to the grain modifies the effects of temperature on starch and protein accumulation during grain filling in wheat. *Australian Journal of Agricultural Research* **55**: 551-564.
- Zhang, X.Y., Loyce, C., Meynard, J.M. et Savary, S. (2006). Characterization of multiple disease systems and cultivar susceptibilities for the analysis of yield losses in winter wheat. *Crop Protection* **25**: 1013-1023.
- Zoschke, A. et Quadranti, M. (2002). Integrated weed management: Quo vadis? *Weed Biology and Management* **2**: 1-10.
- Zundel, C. et Kilcher, L. (2007). Organic agriculture and food availability. *FiBL*, Roma, Italy.

ANNEXES

Annexes

Annexe I. Calcul du bilan hydrique	1
Annexe II. Matrice de corrélation des facteurs limitants quantitatifs testés pour la teneur en protéines.....	3
Annexe III. Listes des espèces d’adventices identifiées	5
Annexe IV. Guide d’entretien de la première phase d’enquêtes.....	8
Annexe V. Guide de l’itinéraire technique du blé mobilisé pour le premier entretien « en salle ».....	12
Annexe VI. Itinéraires techniques types pour chacun des agriculteurs enquêtés, établis à la suite de la première phase d’enquêtes	16
Annexe VII. Classification en groupes fonctionnels des espèces d’adventices identifiées	25

Annexe I
Calcul du bilan hydrique

Le **bilan hydrique** est calculé chaque jour j du cycle de la culture comme la différence entre l'évapotranspiration réelle (ETR_j) et l'évapotranspiration maximale (ETM_j).

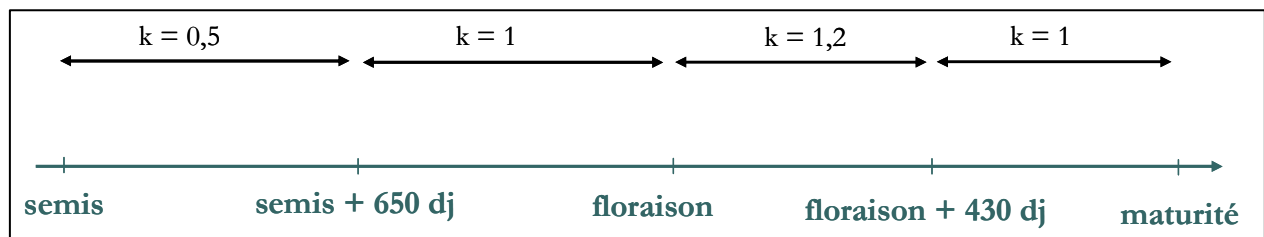
$$\text{Bilan hydrique}_j = ETR_j - ETM_j$$

L'**évapotranspiration maximale** est définie comme le produit de l'évapotranspiration potentielle de Penman ($ETP_{Penman,j}$), issue de données météorologiques et d'un coefficient cultural k_c .

$$ETM_j = ETP_{Penman,j} \times k_c$$

Le coefficient cultural k_c dépend de la culture considérée et de la période du cycle de la culture considérée. Nous avons choisi les valeurs suivantes dans le cas du blé biologique :

- du semis à la date correspondant au semis + 650 degrés-jours : $k_c = 0,5$
- de la date correspondant au semis + 650 degrés-jours à la floraison : $k_c = 1$
- de la floraison à la date correspondant à la floraison + 430 degrés-jours : $k_c = 1,2$
- de la date correspondant à la floraison + 430 degrés-jours à la maturité : $k_c = 1$



L'**évapotranspiration réelle** dépend de la réserve utile du sol (RU) et de l'eau disponible dans le sol ($eau\ dispo_j$). Elle est calculée comme suit :

$$\text{Si } eau\ dispo_j > \frac{RU}{3} \quad \text{Alors } ETR_j = ETM_j \quad \text{Sinon } ETR = \frac{eau\ dispo_j \times ETM}{RU / 3}$$

Le calcul de l'eau disponible dans le sol au jour j est réalisé comme suit :

$$\text{Si } eau\ dispo_{j-1} + précipitations_j > RU \quad \text{Alors } eau\ dispo_j = RU$$

$$\text{Sinon } eau\ dispo_j = eau\ dispo_{j-1} + précipitations_j$$

Annexe II

Matrice de corrélation des facteurs limitants quantitatifs testés pour la teneur en protéines

	Stress hydrique après floraison	Températures supérieures à 25 °C	Quotient photothermique après floraison	Maladies foliaires	Densité d'adventices à floraison	INN à floraison
Stress hydrique après floraison	1,00	-0,40	0,20	-0,10	0,46	-0,04
Températures supérieures à 25 °C	-0,40	1,00	-0,47	-0,05	-0,12	0,00
Quotient photo- thermique après floraison	0,20	-0,47	1,00	-0,26	0,05	-0,01
Maladies foliaires	-0,10	-0,05	-0,26	1,00	-0,05	0,20
Densité d'adventices à floraison	0,46	-0,12	0,05	-0,05	1,00	-0,30
INN à floraison	-0,04	0,00	-0,01	0,20	-0,30	1,00

Annexe III

Listes des espèces d'adventices identifiées

Alopecurus myosuroides Hudson
Ambrosia artemisiifolia L.
Anagallis spp.
Aphanes arvensis L.
Apiaceae spp.
Arabidopsis thaliana (L.) Heynhold
Asteraceae spp.
Atriplex patula L.
Bifora radians M. Bieberstein
Capsella bursa-pastoris (L.) Medicus
Cardamine hirsuta L.
Cerastium glomeratum Thuillier
Chenopodium album
Cirsium arvense (L.) Scopoli
Consolida regalis S.F. Gray
Convolvulus arvensis L.
Dicotyledoneae spp.
Equisetum arvense L.
Euphorbia helioscopia L.
Fallopia convolvulus (L.) A. Loeve
Fumaria officinalis L.
Galeopsis angustifolia Ehrhart ex Hoffmann
Galium aparine L.
Galium tricornerutum Dandy
Geranium spp.
Helianthus annuus
Lamium purpureum L.
Legousia speculum-veneris (L.) Chaix
Lolium multiflorum Lamarck
Matricaria perforata Mérat
Matricaria recutita L.
Medicago sativa L.
Mentha arvensis L.
Mercurialis annua L.
Myosotis arvensis (L.) Hill
Papaver rhoeas L.
Poaceae spp.
Polygonum aviculare L.
Polygonum persicaria L.
Ranunculus arvensis L.
Rubus spp.
Rumex spp.
Senecio vulgaris L.
Sinapis arvensis L./*Raphanus raphanistrum* L.

Sonchus spp.

Stellaria media (L.) Villars

Taraxacum officinale Weber

Trifolium spp.

Veronica hederifolia L.

Veronica persica Poiret

Vicia spp.

Vicia faba L.

Viola tricolor L.

Annexe IV

Guide d'entretien de la première phase d'enquêtes

OBJECTIFS	DEROULEMENT DE L'ENTRETIEN
<p>Faire connaissance et permettre à l'agriculteur de cerner le type de chercheur à qui il a affaire (discipline, centres d'intérêts, exemples de terrains et de sujets enquêtés, distance ou familiarité par rapport à l'objet de l'entretien). Ces éléments précisent la tonalité des informations recherchées et visent à mettre à l'aise l'agriculteur.</p> <p>Préciser ensuite les attentes vis-à-vis de cet entretien.</p>	<p>Présentation de l'enquêteur principal et positionnement</p> <p><i>« Je ne suis pas agronome ... je travaille surtout par entretien avec les agriculteurs, en m'intéressant à leurs façons de travailler, à leurs choix, à la façon dont ils voient leur métier évoluer ... Je travaille surtout avec des éleveurs depuis quelques temps, par exemple actuellement je m'intéresse à la « paperasse » qu'ils gèrent et aux contrôles de conditionnalité.. J'ai fait il y a quelques années une recherche sur les agendas des agriculteurs en Haute-Saône, ce qui expliquera mon intérêt tout à l'heure pour ce que vous marquez dans le cadre du travail, si c'est le cas » (dire qu'on y reviendra si le sujet fait réagir).</i></p> <p><i>« Marion fait des suivis sur des parcelles agricoles dans le cadre de sa thèse (dont la ou les vôtre(s)). Christine est agronome et travaille sur les itinéraires techniques du blé à bas niveau d'intrants voire sans pesticides. Dans cette démarche de réduction maximale des intrants, elle participe à ce projet pour cette partie d'entretien. L'objectif à terme est de mieux raisonner les stratégies de désherbage et de fertilisation azotée de printemps. Pour cela, il faut pouvoir prévoir les performances du blé (rendement et protéines) précocement pour ajuster ces pratiques. Rendement et taux de protéines peuvent être diminués par divers facteurs limitants d'où l'intérêt de juger de l'intensité de ces facteurs limitants précocement sur les parcelles.. Dans cette partie de notre travail, l'objectif est de comprendre comment les agriculteurs travaillent habituellement leurs parcelles. Ce qu'ils font suivant leurs observations, leurs connaissances des terres, leurs préoccupations, etc. ... »</i></p>
<p>1- Avoir une description du système d'exploitation dans ses grandes lignes (différents ateliers, main d'œuvre, changements récents ...) et recueillir quelques informations sur la situation de l'exploitant et sa personnalité (discours sur le métier, intérêt pour les cultures biologiques, habitudes de travail avec agriculteurs, conseillers, chercheurs ...)</p>	<p>Thème 1 : Objectifs généraux de l'exploitant et objectifs visés pour la culture du blé</p> <p>1- Question d'entrée : <i>« Pour commencer, il est peut-être nécessaire de savoir quelle importance ont les cultures dans votre exploitation, en particulier la culture du blé, au regard de vos autres activités».</i></p> <p>Si besoin : justifier le sens de la question en précisant que, suivant les exploitations avec lesquelles on travaille, les surfaces de blé varient et les agriculteurs n'y attachent pas la même importance (par exemple cela peut-être une culture « à côté » de l'élevage qui est l'activité principale, ou l'inverse, ou des situations intermédiaires ...).</p> <p>Relances thématiques : <i>composition de la main d'œuvre ? Charge de travail ? Projets/inquiétudes par rapport à la situation de l'exploitation ? Intérêt pour le bio ? Depuis quand ? Relations avec les agriculteurs localement ? avec les conseillers ? Une habitude d'expérimenter ?</i></p>

<p>2- Cerner la place de la culture du blé dans l'exploitation (enjeu économique pour l'agriculteur.) et le type de suivi réalisé sur cette culture (fréquence des visites des parcelles, connaissance des rendements et autres données spontanément fournies...), éléments historiques.</p>	<p>2- <i>«La culture du blé, est-ce vous qui la prenez en charge ? Comment cela se passe concrètement ? »</i></p> <p><u>Relance thématique</u> : <i>« interventions personnelles ? Autres ? Suivi des parcelles ? Fréquence ? »</i></p> <p><u>Relance récapitulative</u> : <i>« Finalement, on peut dire que vous êtes quelqu'un qui suivez (à adapter selon discours tenu) de « très près »/ « sans trop rentrer dans le détail », « d'assez loin » vos cultures ? »</i></p>
<p>1- Identifier l'itinéraire technique habituel, soit les règles de routine de l'exploitant (cf. approche ergonomique) pour en inférer petit à petit le modèle d'action sous-jacent. Cela suppose d'accéder aux repères temporels et spatiaux qui jalonnent la culture du blé, aux phases-clés d'observation (dans le temps et l'espace), de diagnostic, d'interventions.</p> <p>2- Identifier les informations dont dispose l'agriculteur pour prévenir des pertes de rendement, soit préciser ce qui est prélevé à la parcelle et ce qui est déduit des informations, ce qui est mobilisé comme connaissances (internes ou externes à l'exploitation).</p>	<p>Thème 2 : Conduite de la culture en général</p> <p>1- <u>Question d'entrée</u> : <i>« J'aimerais maintenant qu'on aborde votre façon d'intervenir sur les parcelles, en suivant au fur et à mesure le calendrier si cela vous convient. On peut voir d'abord comment vous faites habituellement, puis les adaptations qui sont nécessaires, si c'est le cas, pour certaines parcelles ou encore suivant la météo ... On peut commencer par l'implantation de la culture : par où vous commencez ? à quoi vous êtes attentif ? »</i></p> <p><u>Relances thématiques</u> : il s'agit ici de suivre au plus près le discours de l'exploitant (ses découpages temporels, son vocabulaire pour désigner l'avancée dans le cycle de culture ...) et d'éviter toute référence à l'itinéraire technique qu'ont en référence les agronomes, ou alors seulement pour vérifier que l'on a bien compris et faciliter des traductions entre le langage du chercheur et celui du praticien (notamment par des relances de récapitulation. Autrement dit, la conduite d'entretien se fixe sur les expressions employées par l'agriculteur et les fait préciser : <i>« si j'ai bien compris, quand vous dites, vous faites référence au stade 1^{er} épi ? »</i>). L'enjeu est d'accéder d'abord au « comment » (à quel moment ? où ? avec quels outils ? quelle dose ?) puis aux raisons qui sous-tendent ce procédural (à la suite de quelles observations, en fonction de quelles données ? pour obtenir quels résultats ?).</p> <p>2- <u>Question d'entrée</u> : <i>« Pour décider ou non d'intervenir, vous avez besoin de différentes informations si je comprends bien ? »</i></p> <p><u>Relances thématiques</u> : nature des observations (actuelles, passées) ? Autres sources d'informations (internes, externes) ? Type d'information (fixée en mémoire, par écrit) ?</p> <p><u>Relances de récapitulation</u> : <i>« On pourrait dire que vous prenez tels repères ? à tels endroits ? à tels moments ? auprès de telles sources »</i> (résumer ce qui a été dit)</p>

<p>Soumettre des cas d'aléas ou des situations atypiques et identifier les adaptations que ces cas nécessitent (recherche orientée d'informations pour établir un diagnostic, appel à des compétences externes, changement dans les modes opératoires ...)</p>	<p>Thème 3 : Gestion des aléas et de situations atypiques <u>Question d'entrée</u> : « <i>On a vu comment cela se passait en période habituelle ? Et que se passe-t-il si :</i> »</p> <ul style="list-style-type: none"> - « <i>l'année est particulière sèche/humide ? ...</i> » - « <i>vous constatez une invasion particulière de mauvaises herbes,</i> » - « <i>les tarifs du blé chutent ... etc.</i> »
<p>Identifier la nature des informations consignées par écrit et les modes de traitement de ces informations (transfert d'un support primaire à un support secondaire, récapitulatifs, lecture simple ...)</p>	<p>(éventuellement) Thème 4 : échanges autour des documents de l'exploitant <u>Question d'entrée</u> : « <i>Expliquez moi ce que vous avez noté sur cette fiche (ou autres supports) ?</i> ».</p> <p><u>Relances thématiques</u> : « <i>différents supports utilisés ? données sur plusieurs campagnes ? utilisation des informations (quand ? quelles questions ? pourquoi ?)</i> »</p> <p>Aborder et préciser le protocole de travail autour des notations et observations de l'exploitant (ce qu'il est possible de faire, d'approfondir et comment travailler ensemble).</p>

Annexe V

Guide de l'itinéraire technique du blé mobilisé pour le premier entretien « en salle »

Intervention	Quelle décision ?	Sur quoi joue la décision ? de quoi dépend-elle ?	Quelles sont les informations prélevées associées ?
Semis	- date	<p>en fonction des risques des ravageurs (pucerons à l'automne)</p> <p>en fonction des conditions climatiques et de la variété</p> <p>en fonction des périodes de froids l'hiver joue sur l'échaudage fin juin-début juillet</p>	<p>Observations des ravageurs : quels informations prélevées ?</p> <p>Comment juger des événements/risques météo ?</p>
	- densité	<p>en fonction des risques de pertes l'hiver</p> <p>de la capacité de tallage de la variété, des références locales,</p> <p>en fonction de la pression des mauvaises herbes</p>	<p>Comment évaluer risques de pertes ? quels facteurs de pertes ? quelles observations de ces facteurs ?</p> <p>Quelles informations prélevées pour évaluer le risque d'adventices ? quelles observations ?</p>
	- variété	<p>en fonction du taux de recouvrement (compétitivité vis-à-vis des adventices), résistances aux maladies, précocité (surtout pour éviter échaudage),</p>	
	- amendements organiques	<p>en fonction du potentiel vis-à-vis du rendement et de la teneur en protéines</p> <p>en fonction du précédent</p> <p>en fonction des objectifs de rendement et de teneur en protéines</p> <p>en fonction de l'approvisionnement</p>	

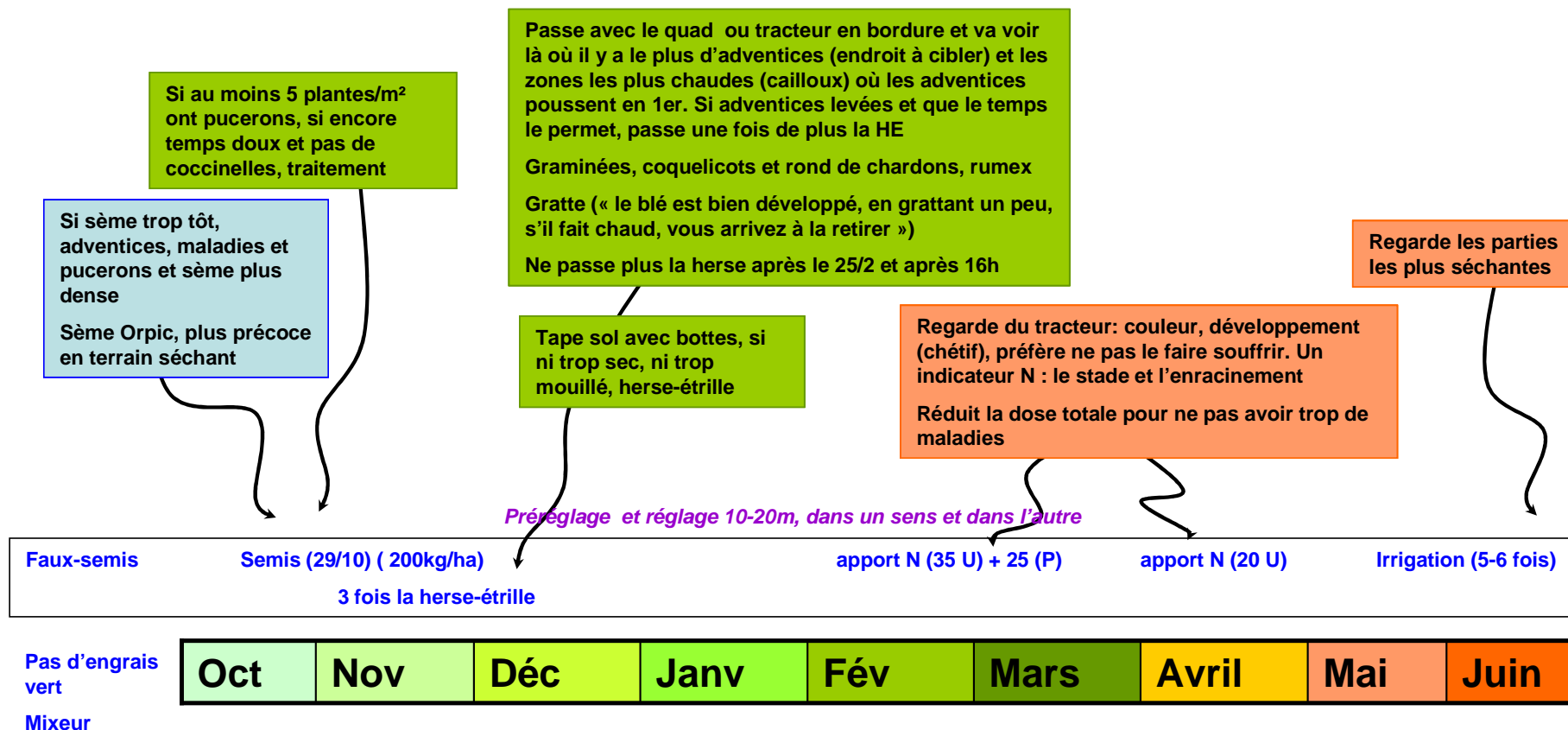
Intervention	Quelle décision ?	Sur quoi joue la décision ? de quoi dépend-elle ?	Quelles sont les informations prélevées associées ?
Le désherbage : tout au long du cycle	- date : (automne et/ou printemps) et nombre de passages (1 ou 2)	en fonction des adventices présentes sur la parcelle en fonction des conditions de passage	Quelles informations prélevées pour évaluer le risque d'adventices ? quelles observations ?
Le Reliquat Sortie Hiver (RSH)	- dose totale d'engrais à apporter	en fonction de la manière d'appréhender le RSH (par mesure, références locales ?) en fonction du mode de calcul de la dose à apporter (méthode du bilan ? évaluation de la biomasse sortie hiver ? Prise en compte du précédent)	Mesures RSH ? Evaluation biomasse sortie hiver ? Indicateurs sur les itinéraires techniques (précédent, travail du sol etc) ?
Premier apport d'azote à « épi 1 cm »	- mesure du stade « épi 1cm » : comment est-il défini ? - date - dose	joue sur la date du premier apport d'azote et peut-être d'autres interventions en fonction de périodes de stress hydrique éventuel en fonction de l'état de la culture en fonction de la disponibilité de l'engrais en fonction du type d'engrais azoté en fonction de contraintes de travail en fonction des objectifs de rendement et de teneur en protéines en fonction du potentiel de la parcelle en fonction de la biomasse ou l'état de la culture en fonction des facteurs limitants	Observation stade épi 1 sm ? Choix de la date ? en fonction du stade ? Comment l'évaluer ? Comment l'évaluer ? Mesure biomasse ? Mesure de facteurs limitants ?

Intervention	Quelle décision ?	Sur quoi joue la décision ? de quoi dépend-elle ?	Quelles sont les informations prélevées associées ?
Deuxième apport d'azote vers le stade gonflement	- estimation approximative du stade		comment l'évaluer ?
	- date	idem premier apport	
	- dose	en fonction des objectifs de rendement et de teneur en protéines en fonction du potentiel de la parcelle reconsidéré (par exemple, nombre d'épis par m ²), en fonction des facteurs limitants en fonction d'un outil pour décider (type HNtester, Jubil, ...)	Etat du blé : quelles observations ? Mesure de facteurs limitants ?
Irrigation: en fin de cycle	- date	en fonction du climat et statut hydrique de la parcelle	Evaluation de la campagne climatique : quels indicateurs ?
	- quantité	en fonction des priorités vis-à-vis d'autres cultures ou parcelles	
Ravageurs: en fin de cycle	- décision en préventif	en fonction des conditions climatiques en fonction du précédent	Evaluation de la campagne climatique : quels indicateurs ?
	- suivi		Quelles observations des ravageurs ? évaluation des risques ?

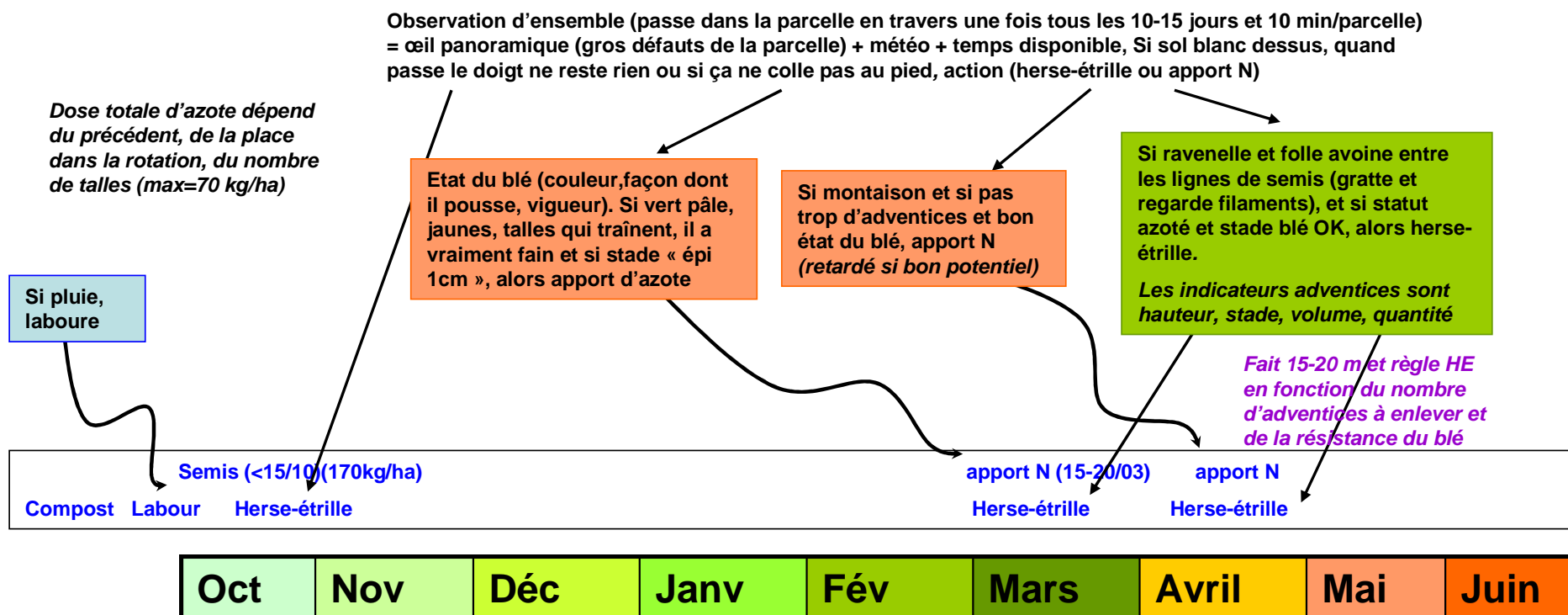
Annexe VI

**Itinéraires techniques types pour chacun des agriculteurs
enquêtés, établis à la suite de la première phase
d'enquêtes**

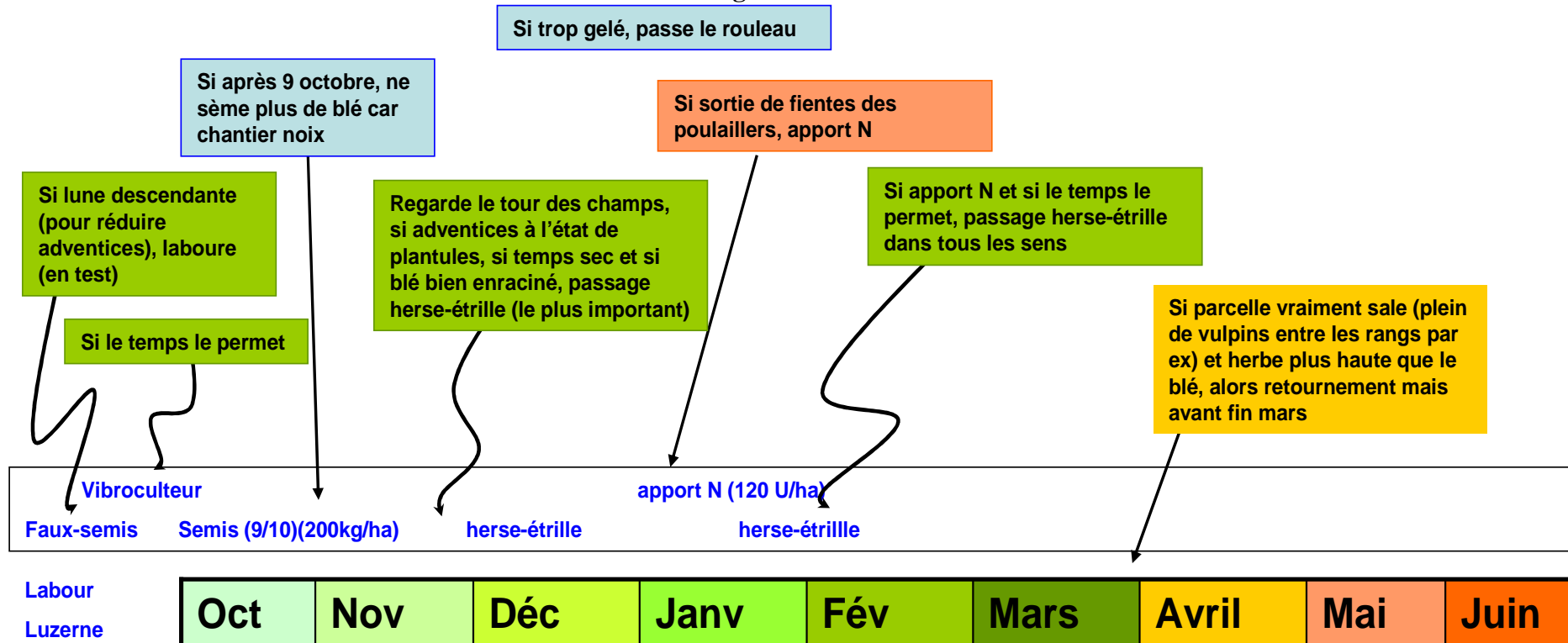
Agriculteur A



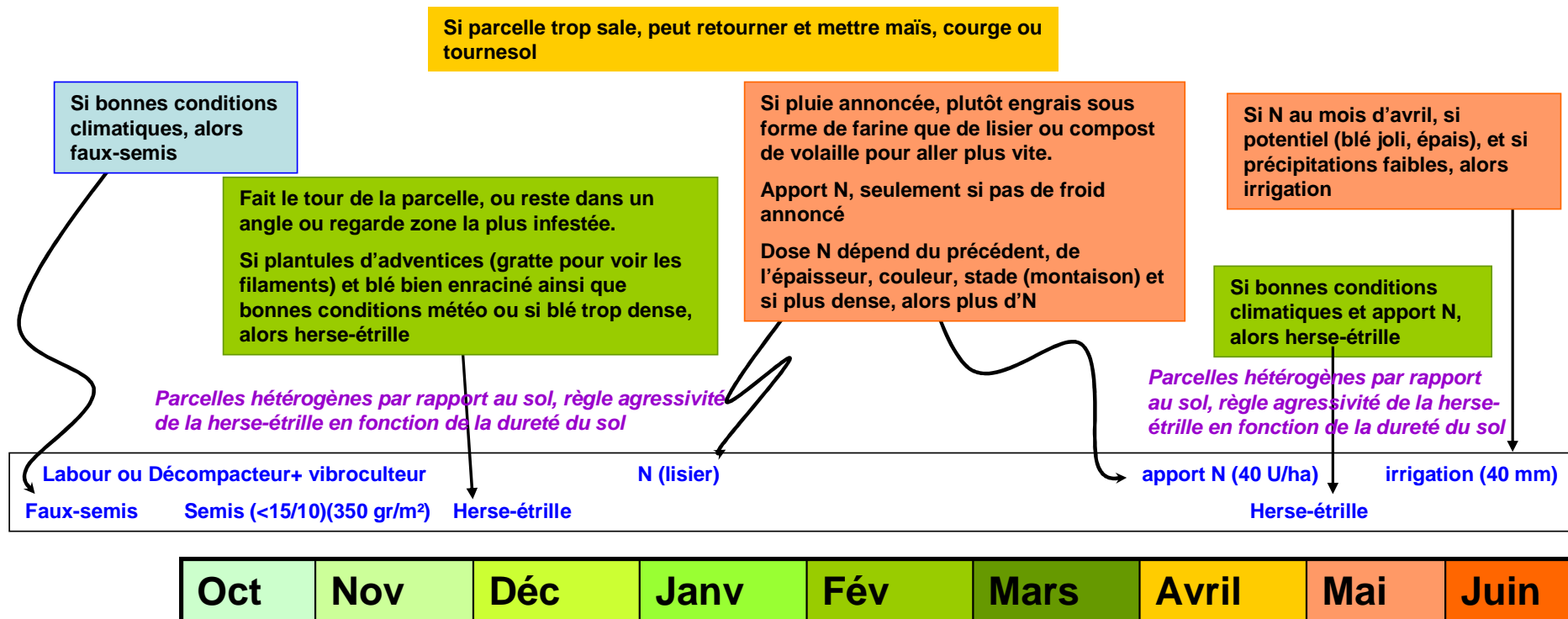
Agriculteur B



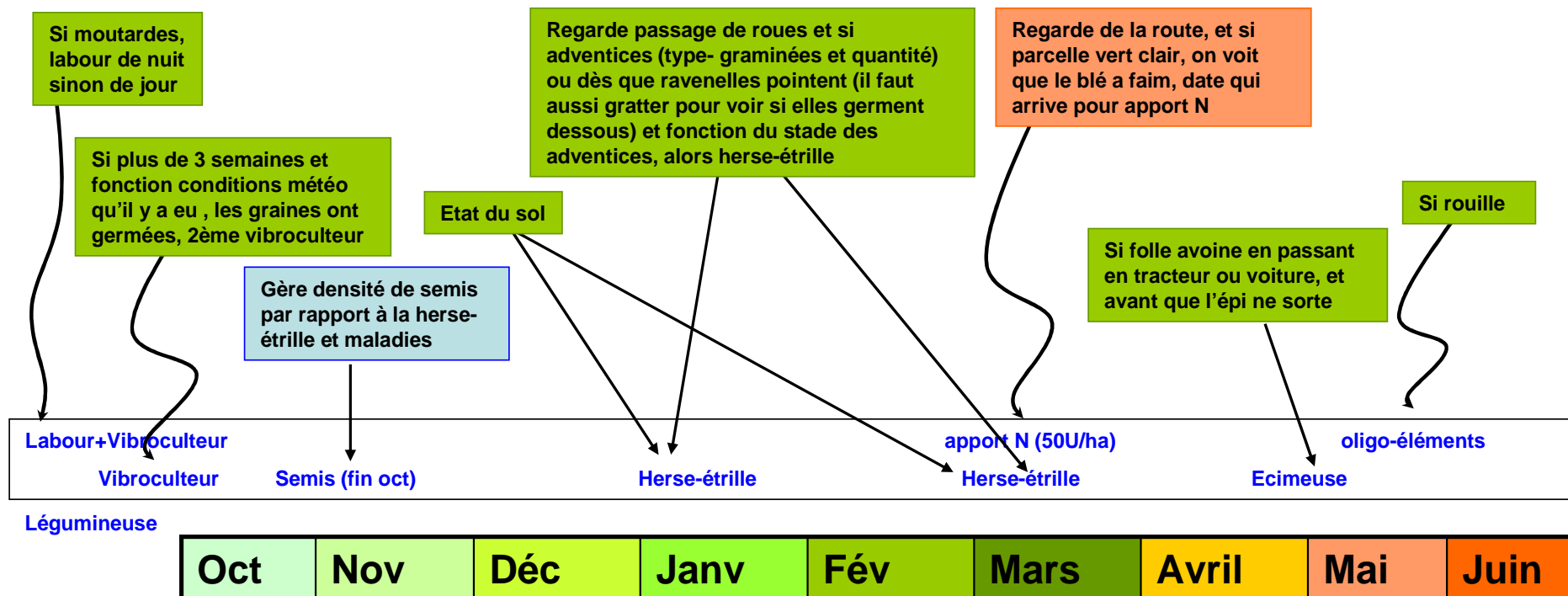
Agriculteur C



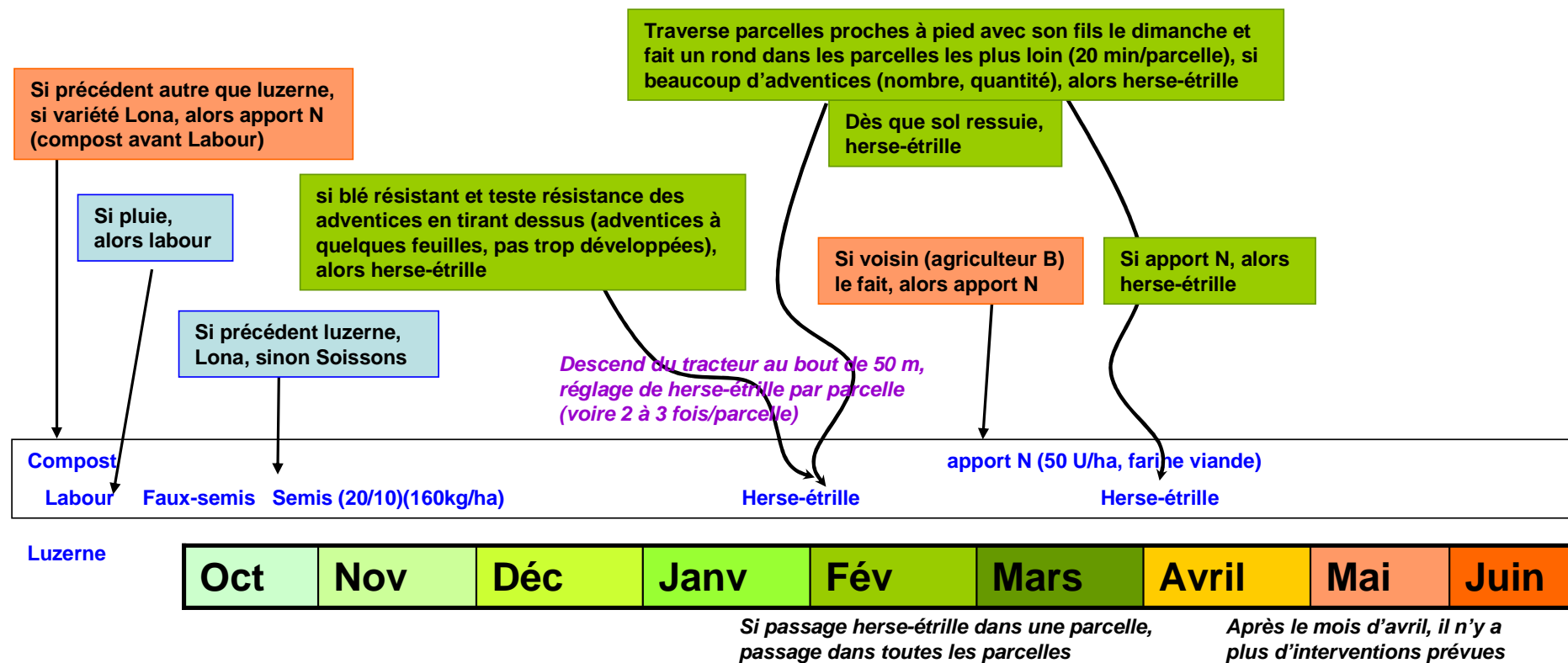
Agriculteur D



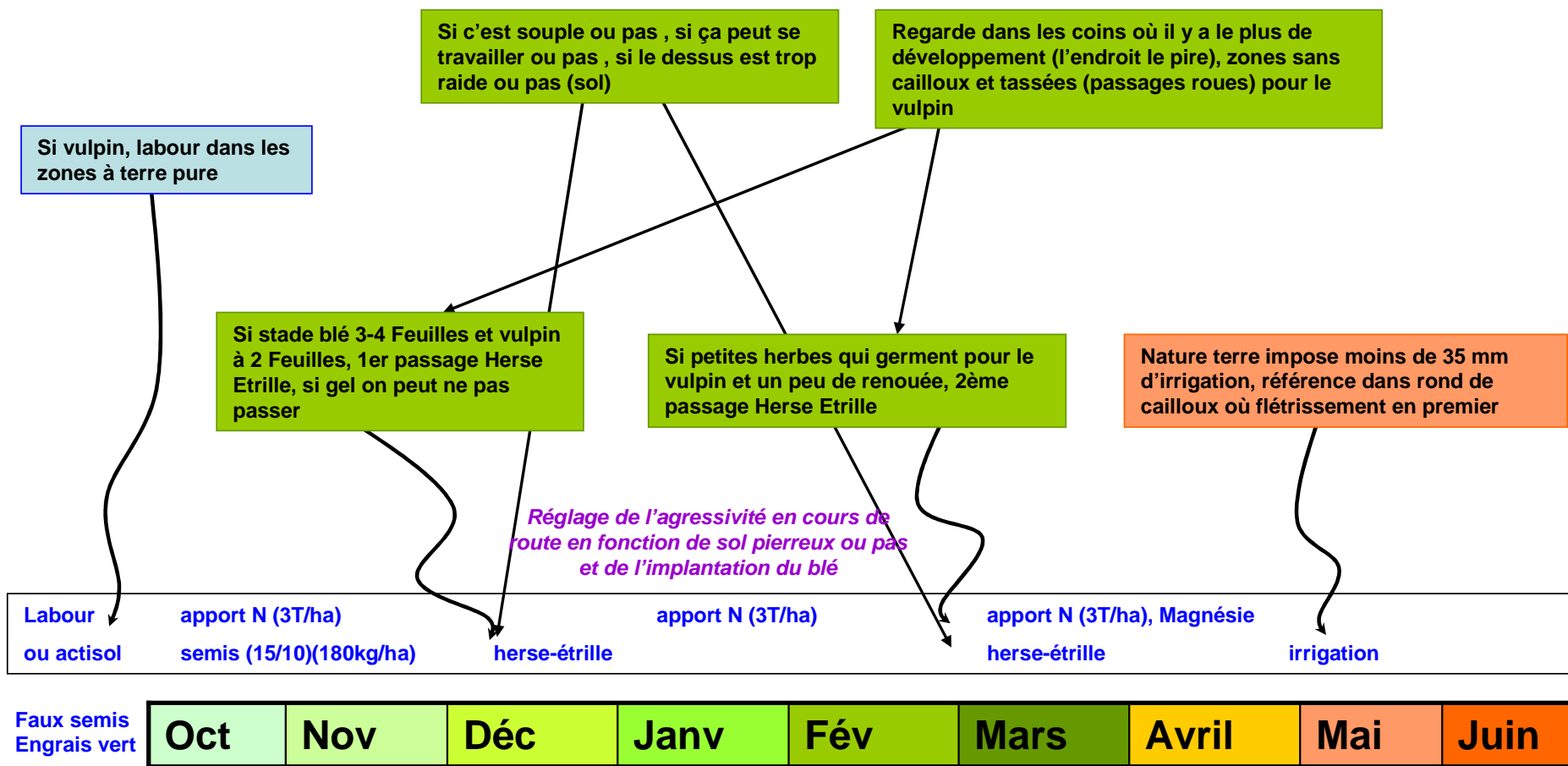
Agriculteur E



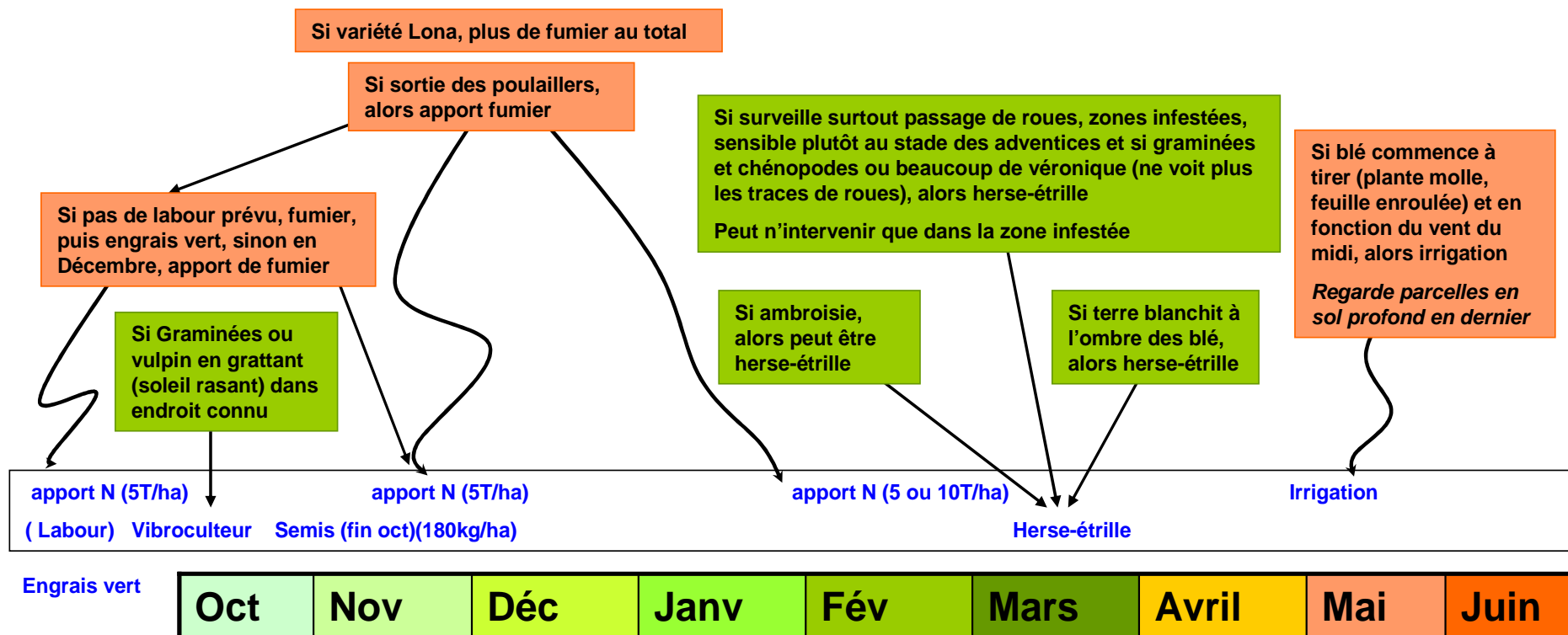
Agriculteur F



Agriculteur G



Agriculteur H



Annexe VII

Classification en groupes fonctionnels des espèces d'adventices identifiées

Groupe 1 :

Monocotylédones

Alopecurus myosuroides Hudson

Lolium multiflorum Lamarck

Poaceae spp.

Groupe 2 :

Dicotylédones, annuelles vivaces à période de germination automnale ou indifférente ayant un port dressé et ramifié

Apiaceae spp.

Asteraceae spp.

Capsella bursa-pastoris (L.) Medicus

Cirsium arvense (L.) Scopoli

Consolida regalis S.F. Gray

Convolvulus arvensis L.

Dicotyledoneae spp.

Fallopia convolvulus (L.) A. Loeve

Fumaria officinalis L.

Galium aparine L.

Galium tricornutum Dandy

Lamium purpureum L.

Legousia speculum-veneris (L.) Chaix

Matricaria perforata Mérat

Matricaria recutita L.

Medicago sativa L.

Mentha arvensis L.

Myosotis arvensis (L.) Hill

Papaver rhoeas L.

Polygonum persicaria L.

Ranunculus arvensis L.

Rubus spp.

Rumex spp.

Senecio vulgaris L.

Sinapis arvensis L.

Sonchus spp.

Trifolium spp.

Vicia spp.

Groupe 3 :

Dicotylédones, annuelles vivaces à période de germination automnale ou indifférente ayant un port rampant, couché ou dressé

Aphanes arvensis L.
Arabidopsis thaliana (L.) Heynhold
Cardamine hirsuta L.
Cerastium glomeratum Thuillier
Equisetum arvense L.
Euphorbia helioscopia L.
Geranium spp.
Helianthus annuus
Stellaria media (L.) Villars
Taraxacum officinale Weber
Veronica hederifolia L.
Veronica persica Poiret
Viola tricolor L.

Groupe 4 :

Dicotylédones, annuelles vivaces à période de germination printanière ayant un port dressé et ramifié

Ambrosia artemisiifolia L.
Atriplex patula L.
Bifora radians M. Bieberstein
Chenopodium album
Galeopsis angustifolia Ehrhart ex Hoffmann
Mercurialis annua L.
Vicia faba L.

Groupe 4 :

Dicotylédones, annuelles vivaces à période de germination printanière ayant un port rampant, couché ou dressé

Anagallis spp.
Polygonum aviculare L.

Evaluation précoce des performances du blé biologique (rendement et teneur en protéines) : une approche combinée de diagnostic agronomique, de modélisation à l'aide d'indicateurs de nuisibilité et d'études des pratiques dans les exploitations agricoles.

Résumé : Dans un contexte politique où l'agriculture se doit d'être plus durable, l'agriculture biologique offre l'opportunité d'une production agricole plus respectueuse de l'environnement. Néanmoins, en agriculture biologique, les niveaux de production sont inférieurs à ceux de l'agriculture conventionnelle. En particulier, le rendement et la teneur en protéines du blé biologique sont très variables et limités par de nombreux facteurs. Ces faibles niveaux de teneurs en protéines posent des difficultés de commercialisation de la production car ils sont généralement nettement inférieurs au seuil de 10,5% que les organismes de collecte exigent pour les débouchés de panification. Afin de maîtriser et d'améliorer les performances du blé biologique, dans un premier temps, les facteurs limitants et les pratiques agricoles expliquant ces performances ont été identifiés et hiérarchisés à l'aide d'un diagnostic agronomique réalisé en région Rhône-Alpes, première région de production de céréales bio en France. Ce diagnostic a été réalisé à l'aide d'une méthode statistique innovante de mélange de modèles. Puis, des modèles, permettant de prédire la distribution du rendement et de la densité d'une population d'adventices tardive à partir d'une densité précoce dans des parcelles de blé biologiques, ont été mis au point à l'aide de la méthode de régression quantile. Ils permettent d'aider au raisonnement des pratiques de désherbage et de fertilisation. Enfin, une analyse des pratiques des agriculteurs a permis de prendre en compte la manière dont les agriculteurs prélèvent des informations sur leurs parcelles pour déclencher leurs pratiques. Des propositions sont ensuite discutées pour valoriser les résultats de ce travail dans la construction d'un outil d'aide à la décision destiné à raisonner les pratiques de désherbage et de fertilisation.

Mots-clés : blé (*Triticum aestivum* L.), agriculture biologique, adventices, indicateurs, environnements dynamiques.

Early assessment of organic winter wheat performances (yield and grain protein content): a combination of regional agronomic diagnosis, modelling with weed indicators and analysing information sampled by farmers to manage their technical practices.

Abstract: As agriculture is expected to be more sustainable, organic farming offers an opportunity of respecting the environment. However, organic yields still remain under conventional ones. Yields and grain protein contents are highly variable and limited by numerous factors. Moreover, low grain protein contents limit commercialization of organic wheat as they are often under the required level of 10.5% by millers. In order to improve organic winter wheat performances, first, the limiting factors and cultivation techniques explaining yield and grain protein content variability were identified and ranked through a regional agronomic diagnosis carried out in south-eastern France. A innovative statistical method, mixing model, was used to carry out this diagnosis. Then, models, which predict the effect of an early weed density on yield and late weed density distributions, were developed, using quantile regression methods. Those models could help to adjust fertilisation and weed control strategies during the crop cycle. Finally, those previously identified weed indicators were compared to those used by farmers in their fields to manage cropping techniques. Prospects for the assessment of decision support system tool for fertilisation and weed control in organic winter wheat were also provided.

Key-words: wheat (*Triticum aestivum* L.), organic farming, weeds, indicators, dynamic environments analysis.