

Modélisation de la réponse à l'azote du rendement des grandes cultures et intégration dans un modèle économique d'offre agricole à l'échelle européenne. Application à l'évaluation des impacts du changement climatique

Caroline Godard

▶ **To cite this version:**

Caroline Godard. Modélisation de la réponse à l'azote du rendement des grandes cultures et intégration dans un modèle économique d'offre agricole à l'échelle européenne. Application à l'évaluation des impacts du changement climatique. Humanities and Social Sciences. INAPG (AgroParisTech), 2005. English. NNT : 2005INAP0019 . pastel-00002852v2

HAL Id: pastel-00002852
https://pastel.hal.science/pastel-00002852v2

Submitted on 14 Apr 2008

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.







INSTITUT NATIONAL AGRONOMIQUE PARIS-GRIGNON



Ecole Doctorale ABIES

UMR Economie Publique INRA – INA P-G

THÈSE

pour obtenir le grade de

Docteur de l'Institut National Agronomique Paris-Grignon

Discipline : Agronomie

présentée et soutenue publiquement par

Caroline Godard

le 13 décembre 2005

Modélisation de la réponse à l'azote du rendement des grandes cultures et intégration dans un modèle économique d'offre agricole à l'échelle européenne.

Application à l'évaluation des impacts du changement climatique

Directeur de thèse
Jean Roger-Estrade

Jury

Nadine Brisson	Directeur de recherche, INRA, Examinateur
Jacques Caneill	Professeur, ENESAD, Rapporteur
Jacques Delincé	Directeur de l'Unité AGRIFISH, CCR Ispra, Italie, Rapporteur
Pierre-Alain Jayet	Directeur de recherche, INRA, Examinateur
François Moisan	Directeur scientifique, ADEME, Examinateur
Jean Roger-Estrade	Professeur, INA P-G, Président du jury

© UMLV

Remerciements

Tout d'abord, je remercie Jean Roger-Estrade d'avoir accepté de diriger cette thèse et d'en avoir suivi le déroulement. J'exprime également toute ma reconnaissance à Nadine Brisson et Pierre-Alain Jayet qui m'ont encadrée, depuis le projet de thèse jusqu'à son aboutissement. Au cours de ces trois années de thèse, j'ai largement bénéficié de leur expérience et de leurs conseils avisés qui ont éclairé et guidé mon travail. Merci Nadine pour ta rigueur et ton optimisme, merci Pierre-Alain pour ton initiation à l'économie et ta disponibilité.

Je tiens à remercier MM. Jacques Caneill et Jacques Delincé qui m'ont fait l'honneur d'accepter de rapporter cette thèse, ainsi que M. François Moisan qui a accepté de faire partie du jury.

Je remercie Jérôme Mousset et Mathieu Orphelin de l'ADEME qui ont suivi mon travail et m'ont donné de judicieux conseils. Je remercie également Dominique Arrouays pour sa participation active à mon comité de thèse.

Ce travail doit beaucoup à tous ceux qui m'ont aidé à faire fonctionner le modèle STICS dans des conditions inhabituelles et avec qui j'ai beaucoup appris. Mes remerciements s'adressent à Dominique Ripoche qui a su répondre à mes nombreuses questions informatiques, à Christine Le Bas pour son énorme travail sur les « données sol ». Merci également à Bruno Mary, Marie Launay et Nadine Brisson pour leur aide précieuse aux nombreux paramétrages du modèle STICS, et à Marie-Hélène Charron-Moirez qui m'a initiée à l'utilisation de la « boîte à outils modèle de culture ».

J'exprime toute ma gratitude aux personnes qui m'ont fait bénéficié de leur expertise technique et de leurs conseils. Je pense à Josiane Lorgeou, Philippe Desvignes et Jean-Michel Gravoueille d'Arvalis qui ont répondu à mes questions concernant la précocité et la fertilisation du maïs, et la culture de la pomme de terre. Je remercie également Michel Cariolle de l'ITB pour ses conseils sur la fertilisation de la betterave, Luc Champolivier du CETIOM, pour ses réponses sur le colza et le tournesol, Thierry Morvan de l'INRA Rennes pour les informations sur les effluents d'élevage et Olivier Scheurer de l'ISAB pour ses conseils concernant la pomme de terre et la betterave. Je dis également merci à Stefania

Orlandi et Giampiero Genovese du JRC d'Ispra ainsi qu'à Bernard Seguin de l'INRA d'Avignon qui m'ont permis d'avoir accès aux précieuses données climatiques, phénologiques et pédologiques nécessaires à ce travail. Je n'oublie pas Frédéric Huard de l'INRA d'Avignon qui m'a fourni les données météo pour le scénario de changement climatique, Jean-Marc Gilliot pour son aide lors des traitements SIG, Jean-Baptiste Duclos pour son expérience du logiciel SAS. Je tiens à remercier Florence Carré pour son aide sur les données sol et son soutien.

Je n'aurai pas pu mener cette thèse à son terme sans l'aide de N'deye Binta Niang pour la gestion informatique des données et du modèle STICS, merci Binou. J'adresse aussi mes remerciements à Laure Bamière qui m'a apporté son aide pour la gestion de la fertilisation organique et la connaissance du modèle économique AROPAj. Je dis également merci à Stéphane De Cara pour ses nombreuses réponses à mes nombreuses questions en matière d'informatique et d'économie. Estelle Gozlan, Raja Chakir et Maia David m'ont fait bénéficié de leur expérience de jeune chercheur, elles m'ont aidée par leurs relectures, je les en remercie vivement. J'exprime toute ma gratitude à Edouard Baranger pour ses travaux de stage de qualité qui m'ont permis de terminer ma thèse dans les meilleures conditions. Je n'oublie pas Elodie Debove qui a la lourde tâche de prendre la suite de mon travail.

L'UMR Economie Publique INRA-INA P-G m'a offert les conditions matérielles et humaines optimales (merci les économistes !) pour mener à bien mon travail de thèse. Je vous remercie tous, les membres du « labo », pour votre accueil et votre disponibilité. J'adresse une mention spéciale à Régis qui ne trouvera désormais plus mes demandes de références agronomiques et exotiques auxquelles il a su faire face avec brio. Merci également à l'unité Climat Sol Environnement d'Avignon où j'ai toujours été bien accueillie.

A Suzette Tanis-Plant qui m'a aidée pour l'Anglais et m'a également soutenue, je tiens à exprimer ma sincère reconnaissance. Merci également à Christel, Henriette, Elisabeth, et Loïc avec qui j'ai partagé plus que des cours d'Anglais et qui ont su apporter une autre ouverture à ma thèse.

Enfin, je n'oublie pas les grignonnais d'hier et d'aujourd'hui, et le royaume de Grignon, avec qui j'ai partagé d'heureux moments, avec une pensée particulière pour les thésardes et thésards, Rana, Marie-Jo, Karine, Chakib, Haythem, Naziha, Vincent, Delphine, Samuel, Zita, Laure, Stéphane, Carolina y Gustavo, Natacha, Olivier, Mohamed, Kawtar je vous dis merci.

A Athmane avec qui j'ai partagé la condition de thésard et ses moments de doutes mais aussi de satisfaction, et à Marta avec qui j'ai partagé plus que le travail j'adresse des remerciements particuliers.

Je n'oublie pas mes amis Cécile, Hugo, Yann et Ariane, Pluc, Mathieu pour leurs encouragements, venant parfois de loin. Mes remerciements vont à mon frère que je n'ai pas dégoûté de la recherche, à mes parents, à Jeanne et à Jean-Claude, à Françoise et à Jean pour leur soutien inconditionnel et sans faille. Enfin, j'adresse une mention spéciale à David pour sa patience et ses encouragements continus, je lui dédie affectueusement cette thèse.

Avant-propos

Cette thèse a été cofinancée par l'Agence de l'environnement et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME) et l'Institut National de la Recherche Agronomique (INRA), et ainsi pu être menée à bien dans de bonnes conditions. De plus, ce travail de thèse s'appuie directement sur plusieurs collaborations qui ont largement contribué à son aboutissement. Notamment, Christine Le Bas de l'INRA d'Orléans (Unité INFOSOL) a élaboré la base de paramètres « sol » pour le modèle STICS, à l'échelle des régions européennes, dans le cadre d'un projet « GICC » (Gestion et Impacts du changement climatique). La méthode de gestion des apports azotés par les effluents d'élevage a été constituée en collaboration avec Laure Bamière. Enfin, N'deye Binta Niang a mis au point les aspects informatiques liés à la base de données et au fonctionnement du modèle STICS pour les simulations multiples nécessaires à la thèse. Elle a reçu le soutien financier de projets GICC et du projet européen GENEDEC.

Table des matières

REMERCIEMENTS **2**

AVANT-PROPOS **5**

TABLE DES MATIERES **6**

LISTE DES TABLEAUX **11**

LISTE DES FIGURES **12**

INTRODUCTION **15**

PREMIERE PARTIE PROBLEMATIQUE ET PRESENTATION DE LA DEMARCHE **24**

1. ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE **26**

1.1. LES DEUX MODELES EN JEU DANS LA THESE 26

1.1.1. AROPAj *26*

1.1.1.a. Adaptation du modèle AROPAj pour traiter des questions de politiques agri-environnementales à l'échelle européenne 26

i) Les modèles économiques appliqués au secteur agricole en Europe 26

ii) Les atouts des modèles de programmation mathématique linéaire 34

1.1.1.b. Présentation d'AROPAj et focalisation sur les aspects importants pour notre étude 34

i) Le principe de fonctionnement du modèle AROPAj 35

ii) Les données utilisées par le modèle 37

iii) L'estimation des paramètres et des valeurs observées des variables 40

iv) Le calibrage 42

1.1.2. STICS *44*

1.1.2.a. Le choix du modèle de culture STICS 44

i) Les modèles de culture : historique et typologie 44

ii) Le choix du modèle STICS 51

1.1.2.b. Le modèle STICS 51

i) Le développement 54

ii) La croissance aérienne 55

iii) L'élaboration du rendement et de la qualité des récoltes 58

iv) La croissance racinaire 61

v) Le bilan hydrique 62

vi) Le bilan azoté 64

vii) Interface techniques culturales/culture/sol 70

1.1.3. Conclusion *72*
1.2. LES COURBES DE REPONSE A L'AZOTE 73
1.2.1. Les fonctions de production en agriculture *74*
1.2.1.a. Historique et loi d'action des éléments fertilisants en agronomie 74
1.2.1.b. Les fonctions de productions de l'ingénieur en agriculture 75
i) Intérêt des fonctions de production de l'ingénieur 75
ii) Utiliser des « pseudo-données » 77
1.2.2. Justification du choix de la forme fonctionnelle *77*
1.3. CONCLUSION 84

2. LA DETERMINATION DES ENTREES DU MODELE STICS 86

2.1. LES ENTREES PHYSIQUES : CLIMAT ET SOL 86
2.1.1. Le climat *86*
2.1.1.a. Les données disponibles 87
i) La base de données climatiques 87
ii) Les caractéristiques des fermes types 88
2.1.1.b. Attribution d'un « climat » à chaque ferme type 88
2.1.2. Le sol *90*
2.1.2.a. La base de données géographique des sols d'Europe au millionième 90
2.1.2.b. La définition des paramètres STICS pour les sols européens 92
i) Les paramètres à valeur fixe 92
ii) Les paramètres à valeur variable 92
2.1.2.c. La détermination des surfaces de sol à l'intérieur de chaque région 95
2.1.2.d. L'attribution des sols aux fermes types 96
2.2. LES ENTREES TECHNIQUES 96
2.2.1. « Initialiser » le système et déterminer un précédent cultural *97*
2.2.2. Pour « caler » le cycle cultural *98*
2.2.3. La fertilisation azotée *101*
2.2.3.a. Avec les engrais synthétiques 101
i) Type d'engrais utilisé 101
ii) Dates d'apports, fractionnement et doses apportées 102
2.2.3.b. Avec les effluents d'élevage 105
i) La typologie des effluents à épandre 105
ii) Les règles de l'épandage 105
2.2.4. L'irrigation *107*
2.3. CONCLUSION 109

3. METHODE DE CONSTRUCTION DE LA COURBE 111

3.1. PREMIERE ETAPE : FIXER LES ENTREES DE STICS A « POSSIBILITES MULTIPLES » 111
3.1.1. Génération de 'familles de courbes' et utilisation des hypothèses économiques pour déterminer la courbe la plus adaptée *111*
3.1.1.a. Génération d'une famille de courbes pour chaque culture de chaque ferme type 111
3.1.1.b. Utilisation des propriétés économiques de la courbe 114

3.1.2. La sensibilité de la méthode à une variation de prix des engrais azotés 118
3.2. DEUXIEME ETAPE : DETERMINER LES COURBES DE REPONSE A L'AZOTE ACHETE OU PRODUIT SUR LA FERME .. 125
3.2.1. Les courbes de réponse à l'azote issu de l'engrais 125
3.2.2. Les courbes de réponse à l'azote provenant des effluents d'élevage 127
3.3. CONCLUSION 130

DEUXIEME PARTIE EVALUATION ET UTILISATION DES COURBES DE REPONSE A L'AZOTE 132

4. EVALUATION DES COURBES DE REPONSE A L'AZOTE 134

4.1. PRESENTATION DES REGIONS TESTS 134
4.2. DISCUSSION DES ENTREES DE STICS ATTRIBUEES A CHAQUE FERME TYPE PAR REGION 137
4.2.1. En Picardie 137
4.2.2. En Midi-Pyrénées 139
4.3. VARIABILITE DES COURBES DE REPONSE 143
4.3.1. Analyse de la cohérence des formes des courbes obtenues pour chaque culture 143
4.3.1.a. Pour le blé tendre 143
4.3.1.b. Pour le blé dur 144
4.3.1.c. Pour les orges 145
4.3.1.d. Pour le maïs 147
4.3.1.e. Pour le tournesol 148
4.3.1.f. Pour la pomme de terre 149
4.3.1.g. Pour la betterave 150
4.3.1.h. Conclusion 151
4.3.2. Variabilité intra régionale 152
4.4. CONCLUSION 158

5. FONCTIONNEMENT DU MODELE ECONOMIQUE AVEC INTRODUCTION DE LA COURBE DE REPONSE A L'AZOTE 160

5.1. INTRODUCTION PRATIQUE DE LA COURBE DANS LE MODELE ECONOMIQUE 160
5.1.1. Définition de la courbe ajustée 160
5.1.2. Introduction de la courbe ajustée dans le modèle économique AROPAj 162
5.2. ANALYSE DE SENSIBILITE AU NIVEAU DE LA FERME TYPE 163
5.3. FONCTIONNEMENT DE AROPAJ AVEC LES COURBES DE REPONSE A L'AZOTE : COUT D'ABATTEMENT DES EMISSIONS DE GES AU NIVEAU REGIONAL 165
5.3.1. L'introduction d'une taxe sur les émissions de GES dans le modèle AROPAj 165
5.3.2. Effets d'une taxe sur les émissions de GES après introduction des courbes de réponse à l'azote 166
5.4. CONCLUSION 168

6. LES COURBES DE REPONSE A L'AZOTE EN CONDITIONS DE CHANGEMENT CLIMATIQUE 171

6.1. LES IMPACTS POTENTIELS DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR L'AGRICULTURE 172

6.1.1. Les changements climatiques pouvant influencer les productions et les activités agricoles 172
6.1.2. Les impacts des changements climatiques à plusieurs échelles 173
6.1.2.a. Les Impacts à court terme - écophysiologie 173
i) Effets primaires de l'augmentation de la teneur en CO_2 atmosphérique 173
ii) Effets de l'augmentation de la température 173
6.1.2.b. Les Impacts à court terme – interactions… 174
i) …entre facteurs physiques (Température, eau, [CO_2] atmosphérique) 174
ii) …avec les facteurs nutritifs et physiques du sol 174
iii) …avec les facteurs biotiques 175
6.1.2.c. Les Impacts : intégration des processus à plus long terme 176
i) À l'échelle du cycle cultural : influence sur le développement 176
ii) À l'échelle du cycle cultural : modification des rendements en qualité et quantité 177
iii) À l'échelle du cycle cultural : effets sur l'environnement pédoclimatique 178
iv) À l'échelle du système de cultures 178
v) À l'échelle des régions de production 179
6.1.3. Les adaptations possibles 180
6.1.3.a. Les changements techniques 180
6.1.3.b. Anticipations économiques et politiques 181
6.1.4. La prise en compte des changements climatiques par le modèle STICS 182
6.2. METHODOLOGIE DE LA PRISE EN COMPTE DU CHANGEMENT CLIMATIQUE PAR LES COURBES DE REPONSE 185
6.2.1. Elaboration des données climatiques 185
6.2.1.a. Choix du scénario de changement climatique 185
6.2.1.b. Le modèle générant les variables climatiques futures 187
6.2.1.c. Evaluation de la fiabilité des données climatiques générées par le modèle Arpège-Climat 187
i) Les données du modèle Arpège-climat 188
ii) Evaluation de la fiabilité des données climatiques 189
6.2.1.d. Elaboration de données utilisables pour les simulations à l'échelle des fermes types du modèle AROPAj 194
i) La méthode de correction des données de pluviométrie du modèle Arpège 194
ii) Validation de la méthode de correction et des données corrigées de pluviométrie 195
iii) Correction des données de pluviométrie pour l'ensemble du territoire français 198
6.3. LES SIMULATIONS REALISEES AVEC STICS EN CONDITIONS DE CHANGEMENT CLIMATIQUE 200
6.4. ANALYSE DES RESULTATS OBTENUS SUR LES CULTURES ET REGIONS TESTS 201
6.4.1. Evolution des courbes de réponse à l'azote pour le blé tendre et le maïs en Picardie 201
6.4.1.a. Répartition des courbes de réponse 201
6.4.1.b. Identification des années climatiques favorables et défavorables aux cultures étudiées 204
6.4.1.c. Effet des doses d'azote correspondant aux rendements de 1997 205
6.4.2. Evolution des courbes de réponse à l'azote pour le blé tendre et le maïs en Midi-Pyrénées 206
6.4.2.a. Répartition des courbes de réponse 208
6.4.2.b. Identification des années climatiques favorables et défavorables aux cultures étudiées 209
6.4.2.c. Effet des doses d'azote correspondant aux rendements de 1997 210
6.4.3. Interprétations agronomiques des résultats obtenus et comparaison interrégionale 210

6.4.3.a. Conséquences des changements climatiques sur la réponse à l'azote du blé et du maïs en Picardie . 210
i) Bilan et mise en évidence des différences entres groupes types par culture ... 210
ii) Conclusions ... 211
6.4.3.b. Conséquences des changements climatiques sur la réponse à l'azote du blé et du maïs en Midi-Pyrénées 212
i) Bilan et mise en évidence des différences entres groupes types par culture ... 212
ii) Conclusions ... 213
6.4.3.c. Discussion et interprétation des différences interrégionales ... 213
6.4.4. Optimums économiques en conditions de climat futur ... 214
6.4.4.a. Résultats pour la région Picardie ... 215
6.4.4.b. Résultats pour la région Midi-Pyrénées ... 217
6.4.4.c. Interprétations économiques et discussion ... 219
6.5. CONCLUSION ... 220

CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES ... 223

BIBLIOGRAPHIE ... 227

ANNEXES ... 240

LISTE DES ANNEXES ... 241

Liste des tableaux

Tableau 1.1 Typologie des modèles économiques traitant des politiques économiques et environnementales liées à l'agriculture 33
Tableau 1.2 Les types de modèles de cultures et leurs caractéristiques 50
Tableau 1.3 Les types d'engrais dans STICS et leurs paramètres 71
Tableau 1.4 Caractéristiques des formes de courbes de réponse les plus courantes 80
Tableau 1.5 Etudes comparatives des formes fonctionnelles de courbes de réponse à l'azote (ordre alphabétique) 83
Tableau 2.1 Les classes de valeurs de Norg (teneur en azote organique en % pondéral) 95
Tableau 2.2 Coefficients multiplicateurs de l'humidité à la capacité au champ pour les valeurs initiales du précédent cultural 98
Tableau 2.3 Paramétrage de groupes de précocité supplémentaires pour le maïs 100
Tableau 2.4 Stades de développement dans STICS 100
Tableau 2.5 Les stades d'apport d'azote pour le colza 102
Tableau 2.6 Les stades d'apport d'azote pour les céréales à paille 103
Tableau 2.7 Les stades d'apport d'azote pour le maïs 103
Tableau 2.8 Fractionnement de la dose totale d'azote apportée sur le colza 104
Tableau 2.9 Fractionnement de la dose totale d'azote apportée sur blés dur et tendre 104
Tableau 2.10 Fractionnement de la dose totale d'azote apportée sur orges 104
Tableau 2.11 Fractionnement de la dose totale d'azote apportée sur maïs 104
Tableau 2.12 Doses et fourchettes d'effluents épandables 105
Tableau 2.13 Ordre de priorité d'épandage des effluents d'élevage pour les cultures 106
Tableau 2.14 Définition des dates d'apport des effluents pour chaque culture 106
Tableau 2.15 Hiérarchie des cultures vis-à-vis de l'irrigation 108
Tableau 3.1 Les modalités des entrées de STICS définissant les familles de courbes de réponse à l'azote 112
Tableau 3.2 Paramètres des courbes de réponse à l'azote et coefficients d'équivalence entre azote provenant des effluents d'élevage et d'engrais synthétique pour le maïs du groupe type 16 en Midi-Pyrénées. 130
Tableau 4.1 Les caractéristiques des groupes types de la région Picardie 135
Tableau 4.2 Les caractéristiques des groupes types de la région Midi-Pyrénées 136
Tableau 4.3 Les entrées de STICS attribuées aux cultures de la région Picardie par groupe type 139
Tableau 4.4 Les entrées de STICS attribuées aux cultures de la région Midi-Pyrénées par groupe type 142
Tableau 6.1 Les scénarios de changement climatique du GIEC et les hypothèses sous-jacentes. 186
Tableau 6.2 Les données météo disponibles pour évaluer la fiabilité du modèle Arpège sur le territoire français 190
Tableau 6.3 Correction des biais de pluviométrie mensuelle (en mm) issus des différences entre moyennes mensuelles observées et simulées par Arpège-Climat. 195

Liste des figures

Figure 1.1 Fonctionnement du modèle AROPAj 37
Figure 1.2 Carte des Régions RICA de l'UE à 15 38
Figure 1.3 Elaboration des données utilisées par AROPAj 41
Figure 1.4 Chronologie de la modélisation de culture (d'après Brisson et Wery, 2002). 46
Figure 1.5 Fonctionnement général de STICS : les entrées, le système modélisé, les modules et les sorties 53
Figure 1.6 Les stades de développement dans STICS et leur signification en terme d'évolution du LAI, de la croissance des grains et de leur teneur en eau (d'après Brisson *et al.*, 1998). 55
Figure 1.7 Relation entre la transpiration relative EP/EOP (indice de stress hydrique) et la réserve utile racinaire (TETA), d'après Brisson et al. (1998). 64
Figure 1.8 La minéralisation de l'azote dans STICS 66
Figure 1.9 Principe de la courbe de dilution maximale et définition de l'INN (N% étant la teneur en azote en % de la biomasse aérienne de la plante) 67
Figure 1.10 Ensemble et fonction de production (d'après Varian, 2003). 74
Figure 1.11 Courbe de réponse du rendement à l'azote attendue par l'agronome (d'après l'Encyclopédie des techniques agricoles, 1999) 78
Figure 1.12 Les formes fonctionnelles de courbe de réponse les plus courantes. 79
Figure 2.1 Définition du climat des régions RICA et des fermes types 89
Figure 2.2 Organisation de l'information dans la base de données géographique des sols d'Europe (d'après le CD-Rom *The European Soil Data Base, version 1.0*, The European Soil Bureau, 1998). 91
Figure 2.3 Les groupes de précocité du maïs par région RICA. 100
Figure 3.1 Un exemple de gamme de courbes de réponse possibles (blé tendre de la ferme type 8, en Picardie). 114
Figure 3.2 La méthode de construction de la courbe de réponse à l'azote pour une culture d'un groupe type, par la combinaison des modèles STICS et AROPAj 116
Figure 3.3 Types de courbes de réponse obtenues à partir de l'exemple du blé tendre de la ferme type 8, en Picardie, d'après Meynard *et al.*, 1981. 117
Figure 3.4 Sensibilité au prix de l'engrais des entrées STICS et courbes de réponse du blé en Picardie 120
Figure 3.5 Sensibilité au prix de l'engrais des entrées STICS et des courbes de réponse du blé dur en Picardie . 121
Figure 3.6 Sensibilité au prix de l'engrais des entrées STICS et des courbes de réponse de la pomme de terre en Picardie 122
Figure 3.7 Sensibilité au prix de l'engrais des entrées STICS et des courbes de réponse du tournesol en Picardie .. 123
Figure 3.8 Sensibilité au prix de l'engrais des entrées STICS et des courbes de réponse du maïs en Picardie 124
Figure 3.9 Les deux étapes de construction de la courbe de réponse à l'azote du maïs grain du groupe type 16 en Midi-Pyrénées 126
Figure 3.10 Réponse à l'azote provenant des différents effluents animaux pour le maïs grain du groupe type 16 en Midi-Pyrénées (points issus de STICS et courbes ajustées) 129

Figure 4.1 Courbe de réponse à l'azote pour le blé tendre du groupe type 9 de la Picardie.....144
Figure 4.2 Courbe de réponse à l'azote pour le blé dur du groupe type 9 de la Picardie 145
Figure 4.3 Courbe de réponse à l'azote pour l'orge de printemps du groupe type 15 de Midi-Pyrénées...146
Figure 4.4 Courbe de réponse à l'azote pour l'orge d'hiver du groupe type 19 de Midi-Pyrénées 146
Figure 4.5 Courbe de réponse à l'azote pour le maïs grain du groupe type 8 de la Picardie.....147
Figure 4.6 Courbe de réponse à l'azote pour le maïs grain du groupe type 17 de Midi-Pyrénées 148
Figure 4.7 Courbe de réponse à l'azote pour le tournesol du groupe type 15 de Midi-Pyrénées 149
Figure 4.8 Courbe de réponse à l'azote pour la pomme de terre du groupe type 9 de Picardie.....150
Figure 4.9 Courbe de réponse à l'azote pour la betterave sucrière du groupe type 42 d'Auvergne. 151
Figure 4.10 Les courbes de réponse à l'azote du blé en Picardie 152
Figure 4.11 Effet du type de sol sur les courbes de réponse à l'azote pour le tournesol en Picardie 153
Figure 4.12 Quelques courbes de réponse à l'azote pour le blé en Midi-Pyrénées 153
Figure 4.13 Les courbes de réponse à l'azote du blé tendre des groupes types "cultivateurs" de Midi-Pyrénées 155
Figure 4.14 Les courbes de réponse à l'azote du blé tendre des groupes types "éleveurs" de Midi-Pyrénées.....156
Figure 4.15 Effet du groupe de précocité sur les courbes de réponse à l'azote pour le tournesol en Midi-Pyrénées 157
Figure 4.16 Effet du groupe de précocité sur les courbes de réponse à l'azote pour le blé tendre en Midi-Pyrénées ...157
Figure 5.1 La courbe ajustée sur les points issus du modèle STICS et la courbe introduite dans le modèle économique AROPAj (exemple du blé tendre du groupe type 9 de Picardie). 162
Figure 5.2 Effets d'un changement de prix du blé sur la marge brute, la surface en blé, et la collecte de blé de la Picardie pour des rendements endogènes et exogènes. 164
Figure 5.3 Effets des changements des prix des cultures de la SCOP sur la marge brute, la surface en blé, et la collecte de blé de la Picardie pour des rendements endogènes et exogènes.....165
Figure 5.4 Emissions de GES pour la région Picardie, avec et sans rendements endogènes. 167
Figure 5.5 Les émissions de GES totales et par gaz pour des rendements endogènes et exogènes en Picardie.....168
Figure 6.1 Répartition des émissions de GES par secteurs pour l'UE à 15.....171
Figure 6.2 Effets du changement climatique sur le cycle de développement d'une céréale d'hiver (d'après Brisson, 2004).....176
Figure 6.3 Les opérations culturales susceptibles d'être modifiées par le changement climatique dans une succession blé-maïs (d'après Brisson, 2004).....179
Figure 6.4 Evolution des dates de début de semis du maïs dans quatre unités expérimentales de l'INRA 181
Figure 6.5 L'effet CO_2 sur l'efficience de conversion en fonction de la teneur en CO_2 dans STICS (d'après Brisson et Mary, 2002). 183
Figure 6.6 Les scénarios « SRES » de changement climatique du GIEC selon les types de développement et l'échelle de prise de décision (a/) et le développement de la population mondiale (b/).....186
Figure 6.7 Localisation des points du modèle Arpège-Climat et leur classe d'altitude.....188
Figure 6.8 Localisation des stations météo INRA et des points du modèle Arpège les plus proches. 189
Figure 6.9 Comparaisons des températures moyennes annuelles pour les séries observée (O), passée simulée (P) et future simulée (F).....192
Figure 6.10 Comparaison des cumuls pluviométriques annuels pour les séries observée (O), passée simulée (P) et future simulée (F). 193

Figure 6.11 Développement d'une culture de blé tendre d'hiver (jours juliens depuis le semis en fonction des principaux stades de développement) pour les séries climatiques de chaque station 197
Figure 6.12 Les zones de correction des données de pluviométrie selon les stations météo INRA en France. ..199
Figure 6.13 Courbes de réponse à l'azote du blé tendre en Picardie pour les groupes types 8, 10 et 11 (notés G8, G10 et G11) en conditions climatiques futures.....202
Figure 6.14 Courbes de réponse à l'azote du blé tendre en Picardie pour le groupe type 9 (noté G9) en conditions climatiques futures.....202
Figure 6.15 Courbes de réponse à l'azote du maïs grain en Picardie pour les groupes types 8 et 10 (notés G8 et G10) en conditions climatiques futures 203
Figure 6.16 Courbes de réponse à l'azote du maïs grain en Picardie pour le groupe type 9 (noté G9) en conditions climatiques futures.....204
Figure 6.17 Courbes de réponse à l'azote du blé tendre en Midi-Pyrénées pour le groupe type 15 (noté G15) en conditions climatiques futures 206
Figure 6.18 Courbes de réponse à l'azote du blé tendre en Midi-Pyrénées pour le groupe type 16 (noté G16) en conditions climatiques futures 207
Figure 6.19 Courbes de réponse à l'azote du blé tendre en Midi-Pyrénées pour le groupe type 25 (noté G25) en conditions climatiques futures 207
Figure 6.20 Courbes de réponse à l'azote du maïs grain en Midi-Pyrénées pour le groupe type 15 (noté G15) en conditions climatiques futures 208
Figure 6.21 Optimums économiques de fertilisation futurs pour le blé des groupes types 8 et 9 de Picardie ...215
Figure 6.22 Optimums économiques de fertilisation futurs pour le maïs des groupes types 8 et 9 de Picardie....216
Figure 6.23 Optimums économiques de fertilisation futurs pour le blé tendre des groupes types 15, 16 et 25 de Midi-Pyrénées.....217
Figure 6.24 Optimums économiques de fertilisation futurs pour le maïs du groupe type 15 de Midi-Pyrénées ..218
Figure 6.25 Points issus des simulations et courbes ajustées (exemple du blé tendre du groupe type 15 de Midi-Pyrénées) 219

Introduction

Les préoccupations sociales concernant les questions environnementales liées à l'agriculture sont de plus en plus prégnantes en Europe occidentale. Le citoyen-consommateur relayé par les média s'intéresse à son assiette, et à son environnement (eau, paysage, air, biodiversité), et tend à rejeter l'agriculture intensive polluant notamment les eaux ou l'air par le biais de l'emploi massif de fertilisants et de pesticides.

Soucieuse de justifier son soutien à la production agricole européenne, l'Union Européenne (UE) intègre « la conditionnalité », *i.e.* le respect de certaines normes environnementales minimales concernant la conduite des cultures, mais aussi l'exploitation agricole dans son ensemble ainsi que les terres de chaque agriculteur. Ces considérations environnementales de la nouvelle PAC (Politique Agricole Commune) approuvée en 2003 vont de pair avec un découplage des aides directes à la production. Parallèlement, le second pilier de la PAC met l'accent sur la « multifonctionnalité de l'agriculture », il contient des mesures en faveur du développement rural et de l'environnement. Dans le second pilier figurent des mesures agro-environnementales (MAE), mais aussi des aides à l'investissement en vue d'améliorer l'efficacité des structures agricoles, des mesures au profit des zones défavorisées, de montagne ou connaissant des inégalités naturelles, ou encore, des mesures pour l'amélioration des coopératives de transformation et du marketing des produits.

Ces mesures plus récentes s'inscrivent dans le prolongement de politiques initiées dès les années 1990. La directive nitrate, adoptée en 1991 par l'UE pour lutter contre la pollution des eaux par les nitrates d'origine agricole, est mise en œuvre dans chaque pays membre. L'azote fait en effet partie des principaux polluants agricoles. Les processus biophysico-chimiques de transformation qu'il subit produisent à la fois des nitrates (NO_3^-) facilement lixiviés ainsi que des gaz acidifiants (ammoniac NH_3) ou à effet de serre (N_2O). Par ce biais, entre autres, l'agriculture contribue aux émissions anthropiques de gaz à effet de serre et prend part au changement climatique. Parallèlement, le changement climatique avéré influence l'agriculture dans ses pratiques, ses productions et leur localisation.

L'agriculture européenne évolue aujourd'hui dans ce contexte où interviennent des interactions complexes de facteurs biologiques, physiques et humains (économiques et politiques). Pour le décideur public, il est nécessaire de pouvoir appréhender cette évolution complexe afin d'en évaluer les enjeux. Ceci lui permettra ensuite de statuer sur les politiques et instruments à mettre en œuvre. Cette analyse nécessite des outils utilisables pour l'ensemble des différents pays européens, permettant d'étudier les effets des différentes

politiques et scénarios potentiels, à l'échelle de l'UE et pour des systèmes de production agricole divers. Pour cela, ces outils d'analyse doivent pouvoir intégrer des éléments économiques et de politiques agricoles aussi bien que les caractéristiques techniques et environnementales des exploitations. Ils doivent également offrir la possibilité d'une analyse menée à diverses échelles d'intérêts, du système de culture à l'UE entière. L'appel à des modèles adaptés permet de prendre en compte ces aspects d'échelles et de multidisciplinarité, tout en associant des prospectives liées aux différents domaines abordés, comme celle du changement climatique.

Une première revue des études qui traitent des relations entre la production agricole et l'environnement, sur une grande étendue territoriale, le tout dans un contexte économique précis nous permet d'identifier les différents aspects de ce problème complexe. A partir du point de vue des deux principales disciplines impliquées, l'agronomie et l'économie, nous pouvons ainsi définir plus précisément les questions de notre travail.

En agronomie, les travaux menés à l'échelle d'un grand territoire, tel un pays ou l'Europe, étudiant les relations des cultures et de leur milieu, s'orientent souvent vers l'étude des rendements. Ce type de travaux se base généralement sur l'étude des potentialités du milieu de production. Dans ce cas, l'échelle régionale constitue souvent l'échelle d'analyse. La détermination de zones qui intègrent des caractéristiques physiques et agronomiques repose en effet sur l'utilisation de modèles de cultures à l'échelle régionale. Ceci est possible grâce à l'utilisation de SIG (Systèmes d'Informations Géographiques) qui permettent la mise en relation géographique des données physiques et techniques disponibles qui sont ensuite intégrées en entrée du modèle de culture choisi (van Lanen *et al.*, 1992, Lal *et al.*, 1993, Brisson *et al.*, 1997).

Ces travaux mettent surtout l'accent sur les problématiques de zonage et de potentialités physiques du milieu dans lequel les plantes croissent. En effet, même si plusieurs aspects techniques (dates de semis et variétés principalement, parfois irrigation) sont pris en compte (Stewart et Dwyer, 1990, Lal *et al.*, 1993, Moen *et al.*, 1994), ils sont souvent uniformes au sein d'une région. En définitive, ce sont surtout les caractéristiques physiques du milieu (le climat et le sol) qui sont exploitées et étudiées dans ce type de travaux (Stewart et Dwyer, 1990, Johnson et Cramb, 1991). L'évaluation des potentialités du milieu traduites en terme de

rendement, à l'échelle régionale, a recours aux modèles de culture, mais intègre peu les aspects techniques et économiques. Lorsque les aspects économiques de la production agricole sont pris en compte, ce n'est pas via des interventions techniques, au sein des modèles de culture eux-mêmes, mais plutôt par l'intermédiaire de données exogènes. Ce peut être des dires d'experts renseignant une base de données permettant une évaluation biophysico-économique conjointe de situations de culture (Johnson et Cramb, 1991), ou bien des données issues de la littérature comme l'estimation régionale d'une dose d'azote économiquement efficace (Moen *et al.*, 1994). En faisant appel à des données de cette nature, souvent spécifiques d'un type de production végétale et d'une région, les situations qui peuvent être explorées se trouvent souvent réduites en terme de culture, d'étendue territoriale, et de scénario économique. En effet, l'exploitation agricole dans son ensemble n'apparaît pas réellement dans ces travaux, ni le contexte économique plus large dans lequel elle s'inscrit.

Afin de pouvoir évaluer les relations entre production végétale et milieu de production, la prise en compte des interventions techniques est essentielle. Elle permet d'identifier les exploitations agricoles au-delà de leur localisation géographique et de la caractérisation physique du milieu de production. C'est également le lieu privilégié du lien avec l'économie, puisque les interventions techniques sont décidées par l'agriculteur, qui tient compte des caractéristiques physiques de ses parcelles mais aussi de critères économiques (par exemple : temps de travail, coût des intrants, rémunération de la production sur le marché et par le soutien européen).

En économie, de nombreuses analyses des relations entre la production agricole et son contexte environnemental et économique sont réalisées à l'échelle des régions européennes. Plusieurs projets financés par la commission européenne reposent d'ailleurs sur l'utilisation de modèles économiques avec pour objectif l'étude des impacts de la PAC sous tous ses aspects (production, impacts sur l'environnement et le revenu des agriculteurs, structures des exploitations, etc.…). Bien que régionalisés, et basés sur de la micro-économie régionale, ces modèles, tel ceux du projet CAPRI, (Adenaeuer *et al.*, 1997) mettent en œuvre des relations statistiques. CAPRI utilise par exemple un ensemble très complet de bases de données homogènes au niveau européen dont l'exploitation statistique alimente le modèle économique central. Une série de coefficients permettent de dresser des bilans d'azote à la surface du sol, en tenant compte des besoins de la plante, indexés sur des rendements issus des statistiques, et

des apports azotés des engrais minéraux et des effluents animaux. L'hypothèse implicite de la relation linéaire entre le rendement de la culture et les apports azotés est donc faite (Meudt et Britz, 1997). Ce type d'outil n'ancre donc pas réellement les exploitations statistiques utilisées dans la réalité du milieu physique et technique de la production agricole.

Par conséquent, en se plaçant dans l'optique de l'analyse de scénarios de politiques agri-environnementales, l'utilisation des modèles agronomiques pour construire des fonctions de production qui font le lien avec l'économie paraît particulièrement adaptée (Flichman et Jacquet, 2003). Plus particulièrement, l'utilisation des modèles de culture pour produire des fonctions de réponse à l'azote afin de les introduire dans des modèles économiques n'est pas une approche nouvelle (Boussemart *et al.*, 1996, Boussard *et al.*, 1997). En effet, cette approche ne permet pas seulement la prise en compte des facteurs de production étudiés (intrants azotés par exemple), mais intègre plus largement les caractéristiques du milieu (sol, climat), les particularités techniques, la temporalité des interventions culturales, entre autres aspects influençant la productivité de la culture. Il est cependant difficile de disposer de telles données, nécessaires au fonctionnement d'un modèle de culture, pour un grand territoire. En conservant une échelle de travail régionale, deux alternatives sont alors observées. Peu de régions, contenant plusieurs exploitations agricoles représentatives, et issues de typologies régionales sont étudiées (Boussemart *et al.*, 1996, Angenendt *et al.*, 2004) ; ou bien, toutes les régions d'un territoire étendu sont étudiées, mais c'est la résolution régionale qui est la plus petite et ne permet pas une désagrégation des résultats (par exemple, Schneider, 2000, met en œuvre son étude à l'échelle des régions des Etats-Unis).

Les enjeux d'une étude de la production agricole en lien avec son environnement économique et biophysique à l'échelle d'un vaste territoire, dans le but d'appréhender des politiques agri-environnementales apparaissent à plusieurs niveaux. Tout d'abord, afin de mener une étude pour l'Europe toute entière qui puisse considérer la variabilité des situations de production, l'échelle d'analyse de la région semble être un intermédiaire intéressant. Ensuite, ce travail nécessite l'utilisation de modèles économiques et agronomiques qui permettent d'appréhender un territoire étendu, en offrant une approche homogène qui intègre des situations variées. Dans notre cas, le modèle micro-économique AROPAj, et le modèle de culture STICS ont été

utilisés, nous justifierons leur choix dans le chapitre suivant (1.1). Enfin, la prise en compte des interventions techniques s'avère être un point central de la modélisation. En effet, le lien entre agronomie, économie et environnement qui constitue l'essentiel de notre problématique résulte de choix techniques. Ces derniers concernent : les produits phytosanitaires, l'eau d'irrigation, les fertilisants. C'est ce dernier poste qui est privilégié, et plus particulièrement l'azote car :

- il peut être pris en compte à la fois par les modèles économiques et agronomiques
- il a un prix de marché,
- il est transversal à toutes les cultures européennes pour lesquelles il est souvent le facteur limitant de la croissance (au moins dans la partie la plus tempérée).

C'est précisément en étudiant la relation existant entre le rendement des cultures et la fertilisation azotée, qui est une notion commune à l'agronomie et à l'économie que nous avons choisi de mener notre recherche.

Dans l'optique de la mise au point d'un outil d'analyse des politiques agro-environnementales, et avec pour perspective d'aider les décideurs publics, le modèle économique AROPAj a été développé au sein de l'UMR Economie Publique. Les principales applications de ce modèle concernent pour l'instant l'évaluation des coûts de réduction des émissions de gaz à effet de serre (GES) d'origine agricole (De Cara *et al.*, 2004). Modèle d'offre agricole, il se base sur le Réseau d'Information Comptable Agricole (RICA) européen, disponible pour l'UE des quinze. Tout en couvrant une large étendue territoriale (UE à 15 dans sa version actuelle), AROPAj offre une analyse à différentes résolutions : pays, régions administratives RICA, et fermes statistiques dans les régions. Sa conception modulaire représente les productions animales et végétales d'exploitations agricoles statistiques, les modules pouvant être amendés sans modifier la structure initiale du modèle. Il peut être considéré comme générique, au sens où chaque ferme statistique est traitée selon le même programme de base, et elle regroupe des activités qui sont elles aussi représentées par un programme de base similaire et transposable (*cf.* la présentation détaillée du modèle chapitre suivant, paragraphe 1.1.1).

Au sein du module des productions végétales prises en compte par AROPAj (uniquement les grandes cultures, prairies et fourrages), les références et informations techniques et agronomique se réduisent dans la version originale du modèle à un rendement référence issu du RICA et une quantité d'azote déduite des charges en engrais, grâce à des hypothèses sur les prix de l'azote. La relation entre les apports azotés et le niveau de production est donc représentée de manière fruste et rigide.

Une meilleure représentation des techniques agronomiques offrirait une meilleure évaluation de la nature et du volume de l'offre agricole, ainsi que des conséquences de l'activité agricole sur l'environnement. D'autre part, si les exploitations agricoles du modèle sont statistiquement représentatives de la diversité des systèmes de production (définis par leur Orientation Technico-Economique ou OTE), elles n'ont pas ou très peu de caractéristiques physiques et techniques propres. En apportant à ces fermes une dimension technique et des éléments de localisation intra-régionale, l'étude des interactions de la production avec son environnement physique serait facilitée.

En utilisant un modèle de culture, nous pouvons précisément répondre à ces attentes en matière de représentation physique et technique des exploitations agricoles, tout en offrant un cadre à l'étude des politiques agri-environnementales. En effet, par l'intermédiaire des entrées d'un modèle de culture, les caractéristiques pédologiques et climatiques des exploitations agricoles sont explicitées. Les interventions techniques dans leur nature et temporalité permettent non seulement d'appréhender les effets du milieu sur la production agricole mais aussi de la production agricole sur le milieu, tout en interagissant avec l'économie (Flichman, 1995). Plus précisément, l'utilisation d'un modèle de cultures pour déterminer la relation entre les apports azotés et les rendements des cultures est une méthode permettant l'intégration conjointe des aspects techniques, physiques, économiques et politiques du fonctionnement des exploitations agricoles. Ces aspects échappent en partie aux approches fondées sur la statistique et c'est l'intérêt de cette méthodologie de « couplage ». Elle se révèle ainsi adaptée à l'étude de questions agri-environnementales, comme le montrent les études initiées par l'USDA sur la pollution de l'eau par les nitrates, par exemple, (Wu *et al.*, 1996), ou d'utilisation de l'eau en Europe (Flichman, 1995).

L'intérêt de la présente thèse est d'identifier les caractéristiques économiques de la modélisation de la relation azote-rendement et de pouvoir utiliser un modèle agronomique pour élaborer ces fonctions de réponse qui intègrent ces caractéristiques. Pour cela, il est nécessaire d'utiliser l'information disponible et parfois restreinte (en particulier, données physiques et techniques), de l'analyser et de mettre en œuvre des résultats agronomiques dans leur contexte différent de celui de leur discipline d'origine. Ceci permettra de faire évoluer un modèle économique en le fondant sur des bases agronomiques rigoureuses. Les résultats attendus sont donc principalement d'ordre méthodologique, nous nous attacherons à les mettre en évidence pour chacune des étapes de ce travail.

Cette thèse s'articule en deux parties de trois chapitres chacune :

- La première partie expose la méthode élaborée et mise en œuvre dans cette thèse, elle se compose ainsi :
  - Le chapitre 1 justifie le choix des modèles utilisés, AROPAj et STICS, il présente les caractéristiques des modules de chaque modèle qui permettront leur couplage via une courbe de réponse à l'azote. La forme de la fonction de réponse que nous avons adoptée est discutée. Ces revues nous permettent finalement de délimiter le cadre et les contraintes du travail de recherche.
  - Dans le chapitre 2, le mode de renseignement des données d'entrée physiques et techniques de STICS sera détaillé et les résultats en termes méthodologiques pour la caractérisation physique et technique des exploitations du modèle sont présentés.
  - Dans le chapitre 3, les deux étapes de la méthodologie même du couplage et de la construction des courbes de réponse à l'azote sont présentées, à partir de deux exemples de régions françaises. Nous analyserons les résultats en terme de variabilité physique et technique prise en compte par le modèle qui s'exprime aussi dans la variabilité des courbes de réponse obtenues.
- La deuxième partie exploite les courbes de réponse à l'azote construites par la méthode détaillée dans la première partie
  - Dans le chapitre 4, nous proposons une évaluation des courbes de réponse à l'azote construites aux vues de références agronomiques et économiques.

- Le chapitre 5 détaille l'intégration de la courbe de réponse dans le modèle économique et les premiers résultats de simulations réalisées avec l'outil construit pour analyser des politiques agri-environnementales.
- L'étude spécifique de l'évolution de ces courbes sous un scénario de changement climatique fait l'objet du chapitre 6.
- Enfin, notre dernier chapitre conclura et discutera de la méthode mise au point au regard des résultats attendus. Il dressera le bilan et les perspectives de ce travail de recherche.

Première partie
Problématique et présentation de la démarche

Chapitre 1
Etude Bibliographique

1. Etude bibliographique

L'objectif de ce chapitre est la présentation des deux modèles en jeu dans notre travail, le modèle économique AROPAj et le modèle agronomique STICS, ainsi que la justification du choix de la forme fonctionnelle de la courbe de réponse à l'azote. Une revue des modèles économiques utilisés pour traiter le secteur agricole au niveau européen nous permettra d'expliquer en quoi le modèle AROPAj est adapté à l'étude de politiques économiques appliquées au secteur agricole et à l'étude de politiques agri-environnementales. Nous détaillerons alors ce modèle, en nous attachant plus particulièrement à la manière dont sont traitées les productions végétales, ainsi que la résolution géographique et les données utilisées. De manière parallèle, un rapide historique des modèles agronomiques nous permettra de montrer en quoi STICS répond à nos attentes en matière de modélisation de cultures vis-à-vis de la fertilisation azotée et des effets du changement climatique. En nous attachant plus principalement à ces deux composantes, nous présenterons le modèle STICS, son échelle de travail et les données qu'il utilise. Ces deux analyses parallèles mettent en évidence les hypothèses sous-jacentes de deux modèles très différents et nous permettent de définir le cadre de notre travail, ses limites temporelles et spatiales. Cela guide également notre choix de la fonction de réponse à l'azote qui sera utilisée pour modéliser la relation entre le rendement d'une culture et l'azote qui lui est apporté.

1.1. Les deux modèles en jeu dans la thèse

1.1.1. AROPAj

1.1.1.a. Adaptation du modèle AROPAj pour traiter des questions de politiques agri-environnementales à l'échelle européenne

i) Les modèles économiques appliqués au secteur agricole en Europe

Les cycles de négociations marchandes à l'OMC (Organisation Mondiale du Commerce), l'élargissement de l'Union Européenne et les questions environnementales transfrontières ont contribué et contribuent encore au développement des modèles économiques s'intéressant au secteur agricole européen. Ces modèles sont en effet des outils nécessaires à l'évaluation quantitative des impacts de politiques économiques complexes, telles que la PAC. Les

caractéristiques de ces modèles économiques sont souvent fortement liées aux objectifs de la modélisation : par exemple, évaluation des impacts de politiques économiques sur un marché (mondial, d'une région du monde, ou national), évaluation de l'offre sur un marché, évaluation des réactions des agents économiques (producteurs, pays ou régions du monde), estimation de prix d'équilibre. Dans cette revue de la littérature, nous avons considéré des modèles récents (au maximum 20 ans, si possible moins), en discutant de leur capacité à traiter de l'économie agricole européenne et des questions environnementales. Nous avons adopté une typologie classique de la littérature (Tongeren et Meijl, 1999, Salvatici *et al.*, 2000, Tongeren *et al.*, 2001) et distingué les types de modèles suivants : les modèles multisectoriels, comprenant différents types de modèles d'équilibre général, les modèles d'équilibre partiel et les modèles de programmation mathématique (voir Tableau 1.1).

Les **modèles multisectoriels** donnent une représentation complète de l'économie, ce qui implique qu'ils génèrent les facteurs de revenus et de dépenses, en explicitant les marchés des facteurs de production (la terre, le travail et le capital). S'ils décrivent tous les secteurs de l'économie, ils le font généralement de manière plus détaillée pour les secteurs d'intérêt (agriculture et agro-alimentaire ainsi que les secteurs directement connexes comme les industries des phytosanitaires et des engrais). Parmi ces modèles, on peut distinguer tout d'abord les **modèles linéaires** des modèles d'équilibre général calculable. Les premiers s'attachent à décrire les interrelations entre les secteurs économiques par le biais d'un ensemble d'équations simultanées linéaires. Les coefficients de ces équations sont fixés par le biais de matrices Input-Output (Leat et Chalmers, 1991) ou de matrices de comptabilité sociale (Roberts et Russell, 1996). Ceci implique que les substitutions de facteurs, le progrès technique et l'ensemble des modifications comportementales consécutives à la mise en œuvre de politiques agri-environnementales ne peuvent pas être mise en évidence. Ils sont néanmoins utiles pour l'étude des conséquences sectorielles d'une politique, dans la mesure où ils fournissent un niveau de détail élevé sur la satisfaction de la demande dans chacun des secteurs. Le caractère statique de la description fournie limite la validité de ces modèles au court terme.

Les **modèles d'équilibre général calculable** (MEGC) s'appliquent en général à plusieurs pays et plus rarement à un seul pays, comme par exemple le modèle MEGAAF[1] pour la France (Gohin *et al.*, 1998). De plus, leur couverture est généralement mondiale, seul le

modèle ECAM[2], devenu CAPMAT[2] (Folmer *et al.*, 1995), traite de plusieurs pays, mais couvre uniquement l'Europe communautaire (Tongeren *et al.*, 2001). S'ils s'intéressent à plusieurs pays, ils ne les traitent pas toujours avec le même niveau de détail et peuvent aussi considérer comme agrégats des entités supranationales (régions du monde qui ne sont pas nécessairement une entité spatiale cohérente, comme par exemple l'UE à 15 ou « le reste du monde »). Ils simulent des marchés sur lesquels l'offre et la demande se rencontrent, déterminant alors simultanément les prix et les quantités d'équilibre sur chacun des marchés considérés (marchés des facteurs de production, des biens, des échanges extérieurs…). Ce sont des modèles complètement bouclés (au sens où ils génèrent eux-mêmes les facteurs qu'ils utilisent et ne font pas appel à des valeurs exogènes), et cohérents avec le cadre théorique dont ils sont issus (modèles d'équilibre général). Contrairement aux modèles Input-Output, ils peuvent prendre en compte des substitutions entre facteurs et permettent un ajustement des marchés par les prix. Ils sont souvent calibrés sur une année donnée, et permettent ensuite une appréhension du long terme, en comparaison à cette référence. Ils sont beaucoup utilisés pour traiter les questions :

- de commerce international : par exemple, les modèle GTAP[3] (Hertel, 1997), le modèle de l'OMC Harrison/Rutherford/Tarr (François *et al.*, 1996, Harrison *et al.*, 1997), et le modèle MEGABARE[4] (ABARE, 1996) utilisé notamment lors des négociations à l'OMC sur la libéralisation de l'agriculture,
- de politiques agricoles : modèle GTAP (Hertel, 1997), FARM[5] (Darwin *et al.*, 1995), RUNS (Burniaux et Mensbrugghe, 1990), et,
- de politiques environnementales : le modèle GREEN[6] (Lee *et al.*, 1994), utilisé pour l'évaluation du protocole de Kyoto, de même que le modèle MEGABARE, ou le modèle FARM (Darwin *et al.*, 1995) mis en œuvre pour l'étude des conséquences environnementales et économiques des changement climatiques à l'échelle de la planète.

---

[1] MEGAAF : Modèle d'Equilibre Général de l'Agriculture et de l'Agro-alimentaire Français
[2] ECAM : European Community Agricultural Model et CAPMAT : CAP-Modelling and Accounting Tool
[3] GTAP : Global Trade Analysis Project
[4] MEGABARE : Model of General Equilibrium the Australian Bureau of Agricultural and Resource Economics
[5] FARM : Future Agricultural Resources Model
[6] GREEN: GeneraRal Equilibrium ENvironment model

Cependant, la plupart de ces modèles utilisent les mêmes grandes bases de données (cas de GTAP, MEGABARE, FARM, du modèle de l'OMC d'une part, de RUNS[7] et de MICHIGAN[8], Brown *et al.*, 1996, d'autre part). Le nombre de fermes et de produits transformés traités est souvent réduit (par exemple, 12 fermes représentant les 12 régions simulées et 8 produits pour le modèle MEGABARE). Ceci pose le problème de la localisation (Piet, 2002), et de la différenciation spatiale des objets simulés : si ces modèles sont adaptés pour traiter des questions de marchés liés à une pollution globale (comme les émissions de GES), ils le sont moins pour des questions nécessitant une localisation plus précise (fertilisation azotée et pollution par les nitrates par exemple).

Les **modèles d'équilibre partiel** s'intéressent au marché d'un seul bien ou de l'ensemble des biens marchands d'un secteur, dans notre cas, ce sont les biens agricoles. Ils considèrent le marché agricole comme fermé, indépendant du reste de l'économie, c'est-à-dire que ce qui se passe sur ce marché n'affecte pas les autres et réciproquement. Ils se sont beaucoup développés pour étudier les effets de l'accord sur l'agriculture de l'Uruguay Round, leur principal domaine d'application étant l'analyse des politiques marchandes pour des produits spécifiques. Ils peuvent plus facilement que les MEGC prendre en compte la dimension spatiale (par le biais, par exemple, de coûts de transport d'une région à l'autre, au sens infranational), et le niveau de détail dont ils rendent compte apparaît en général plus satisfaisant à l'économiste agricole, par exemple 24 fermes et 24 produits pour le modèle FAPRI/CARD[9] (Young *et al.*, 1999, Westhoff et Young, 2001), 114 fermes, 50 activités de production et 80 produits pour le modèle SPEL/EU-MFSS[10] (Wolf, 1995) dédié au secteur agricole de l'UE. Ces types de modèles sont souvent appliqué à l'étude des effets des réformes de politiques agricoles, et ce pour différents contextes et régions géographiques, à plus ou moins long terme. On distingue entre autres :

- les modèles se focalisant sur l'UE et utilisés dans le contexte de l'élargissement européen et des réformes de la PAC : ESIM[11] (Tangermann et Josling, 1994) et SPEL,

[7] RUNS : Rural Urban North South model
[8] MICHIGAN : General Equilibrium Model of the University of Michigan
[9] FAPRI/CARD : Food and Agricultural Policy Research Institute /Center for Agricultural an Rural Development
[10] SPEL/EU-MFSS : Simulations-system des Sektoralen Produktions- und Einkommensmodells der europäischen Landwirtschaft (Sectoral Production and Income Model for European Agriculture) Medium-term Forecast and Simulation System.
[11] ESIM : European Simulation Model

- les modèles ayant été appliqués à l'étude de réformes de politiques agricoles, et ayant servi dans le cadre du cycle de l'Uruguay des négociations à l'OMC : SWOPSIM[12] (Roningen, 1986), FAPRI, le modèle de la FAO[13].

Ces deux derniers, ainsi que le modèle de l'OCDE, AGLINK[14] (OECD, 1999a, OECD, 1999b), ont également vocation à la réalisation de projections à moyen et long terme des marchés agricoles. La plupart des modèles d'équilibre partiel utilisent des méthodes économétriques (i.e. statistiques) appliquées à des séries temporelles pour l'estimation de leurs paramètres, et peuvent difficilement prendre en compte des relations et contraintes techniques.

Parmi les **modèles de programmation mathématique**, deux catégories se distinguent : les modèles de programmation linéaire « classiques » (PL) et les modèles de programmation mathématique positive (PMP). Ces modèles, contrairement à tous les précédents, sont basés sur une approche micro-économique : ils simulent en effet le comportement économique des producteurs, à partir de spécifications explicites des ensembles de production. Ils servent ainsi à l'aide à la décision et à la gestion des exploitations agricoles, mais aussi à fournir aux décideurs politiques les informations sur les effets de politiques spécifiques à l'agriculture et à l'environnement, et ce, à un niveau plus agrégé (regroupement de fermes homogènes à l'intérieur d'une ou plusieurs régions, ou d'un ou plusieurs pays) (Arfini, 2001). L'approche des modèles PL et PMP repose sur une base commune : la programmation mathématique, qui cherche à identifier la combinaison optimale de productions pour maximiser le revenu de l'exploitant agricole, les politiques économiques étant données (Hazell et Norton, 1986). Cependant, les modèles PL relèvent d'une approche normative : c'est-à-dire qu'ils définissent ce que devrait être la combinaison des production d'un producteur donné pour maximiser son revenu ; alors que les modèles PMP cherchent tout d'abord à représenter la situation observée (combinaison de production), avant de simuler le comportement de maximisation du profit du producteur. Les premiers utilisent l'économétrie pour évaluer leurs paramètres, alors que les derniers ont des paramètres endogènes estimés à partir de l'information de base observée. D'une manière générale, les modèles mathématiques appliqués à l'agriculture se basent

[12] SWOPSIM : Static World Policy Simulation Model
[13] Pour ce modèle de la FAO : voir le site internet : http://www.fao.org/es/esc/en/publicat.html
[14] AGLINK : Modèle d'équilibre partiel de l'OCDE utilisant des relations économétriques pour ses projections.

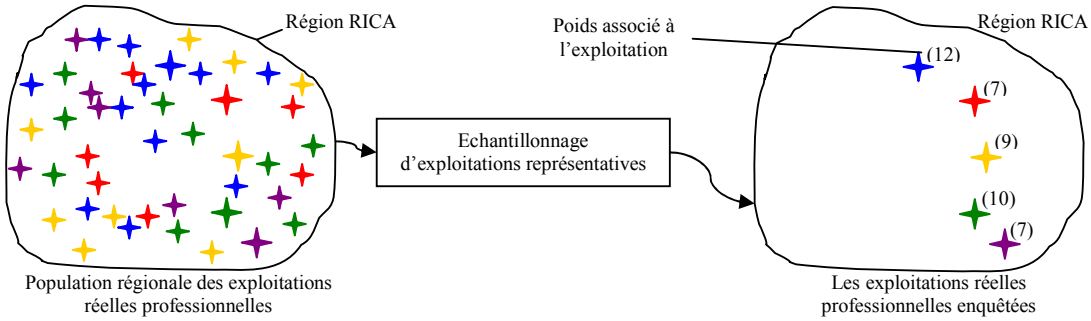
beaucoup sur le RICA (européen ou national, *cf*. Encadré 1.1), c'est le cas de AROPAj[15], de LUAM[16] (Jones *et al.*, 1995) et des modèles de PMP dédiés à l'étude de la réforme de la PAC (Barkaoui et Butault, 1998, Paris et Arfini, 1999, Judez *et al.*, 2001), complété par des recensements nationaux (cas de LUAM ou du programme CAPRI).

Du fait de leur résolution géographique, les modèles de programmation mathématique peuvent plus facilement prendre en compte la localisation des phénomènes simulés, ce qui les rend aptes à une étude des politiques agricoles et environnementales au niveau infranational ou infrarégional. Cependant cette représentation géographique plus fine nécessite de nombreuses données économiques et techniques.

[15] AROPAj : Agriculture, Recomposition de l'Offre et Politique Agricole
[16] Modèle LUAM : voir aussi le site internet http://www.apd.rdg.ac.uk/agristrat/LUAM/luamoutline.htm

Encadré 1.1 Le RICA

Le Réseau d'Information Comptable Agricole (en anglais : FADN) est une enquête effectuée par les États membres de l'UE. Les services chargés dans l'Union de gérer le RICA collectent chaque année des données comptables à partir d'un échantillon d'exploitations agricoles situées dans l'UE. Dérivé des enquêtes nationales, le RICA est la seule source de données micro-économiques harmonisées, les principes comptables étant les mêmes dans l'ensemble des pays. Les données recueillies concernent les structures (surfaces cultivées, cheptels), les coûts (investissements, impôts, charges de fonctionnement) et les revenus (subventions, produits des ventes animales et végétales) des exploitations agricoles. Les exploitations sont sélectionnées pour participer à l'enquête, en fonction d'un plan d'échantillonnage établi pour chaque région de l'UE. La méthodologie utilisée vise à fournir des données représentatives selon trois critères : la région, la dimension économique[17] et l'orientation technico-économique (OTE) [18]. Chacune des exploitations enquêtées est dotée d'un poids qui correspond à la population réelle qu'elle représente (*cf.* exemple graphique schématique ci-dessous). Le RICA représente les exploitations agricoles professionnelles de l'UE. On entend par "exploitation agricole professionnelle" une exploitation suffisamment importante pour assurer à l'agriculteur une activité principale et un niveau de revenu lui permettant de faire vivre sa famille. Pour être classée comme "professionnelle", une exploitation agricole doit dépasser une dimension économique minimale.



Avant la création du RICA, plusieurs États membres effectuaient déjà des enquêtes agricoles sur la base de la comptabilité agricole. Certaines enquêtes étaient fondées sur un échantillon d'exploitations agricoles sélectif- et non sur la population d'exploitations agricoles totale. Pour sélectionner l'échantillon d'exploitations, ces États membres avaient établi leurs propres plans de sélection. La plupart des organes de liaison des États membres continuent à effectuer des enquêtes nationales et ont ainsi conservé leurs propres plans de sélection. Dans la pratique actuelle, les organes de liaison élaborent leurs propres plans de sélection aux fins de l'enquête de l'UE. Ces plans sont soumis pour approbation au Comité communautaire du RICA. Leur degré de précision technique varie d'un État membre à l'autre.

Source : le site de la commission européenne et du RICA http://europa.eu.int/comm/agriculture/rica/index_fr.cfm

[17] La dimension économique des exploitations agricoles de l'échantillon du RICA se base sur la définition de la Marge Brute Standard totale (MBS). La MBS par hectare ou unité de bétail est définie comme « la valeur de la production par hectare ou tête de bétail moins le coût des facteurs de production variables ». (Source : http://europa.eu.int/comm/agriculture/rica/methodology1_fr.cfm)

[18] L'Orientation Technico-Economique (OTE) est un des deux critères servant à classer toutes les exploitations agricoles relevant du champ d'observation du RICA (le deuxième étant la dimension économique des exploitations). Les OTE sont définies en fonction de l'importance relative des différentes productions de l'exploitation agricole. Cette importance relative est évaluée quantitativement comme la part représentée par chaque production dans la MBS (Source : http://europa.eu.int/comm/agriculture/rica/methodology2_fr.cfm)

		exemples	Secteur traité	Portée géographique et résolution	Modalités économiques de la modélisation	Champs d'application et d'étude	Inconvénients pour traiter des questions agri-environnementales et techniques
Modèles multisectoriels	Modèles d'équilibre général calculable (MEGC)	GTAP MEGABARE GREEN FARM RUNS	Tous les secteurs de l'économie	Portée mondiale/ résolution supranationale ou nationale	Tous les facteurs économiques (y compris la terre, le capital et le travail) sont endogènes et apparaissent sur les marchés. Les prix sont endogènes.	Politiques économiques et échanges internationaux Environnement : pollutions globales (GES), niveau mondial	Approche macroéconomique* : modélisation explicite des relations pas faciles Difficulté à localiser les phénomènes précisément et à introduire une certaine différenciation des comportements
		ECAM/CAPMAT		Portée supranationale/ résolution nationale		Politiques économiques européennes en lien avec marchés internationaux	
	Modèles linéaires			Portée mondiale/ résolution supranationale ou nationale		Impacts sectoriels de politiques, court terme	
Modèles d'équilibre partiel (MEP)		FAPRI/CARD ESIM OCDE/AGLINK FAO/WFM SWOPSIM WATSIM SPEL/EU MFSS	Secteur agricole	Portée mondiale ou supranationale/ résolution supranationale, nationale ou régionale		Politiques économiques agricoles (PAC entre autres) Projections sectorielles moyen voire long terme	Modélisation explicite des relations plus faciles, mais souvent pas de relations techniques Difficulté à localiser les phénomènes précisément, même si une localisation géographique plus précise est possible
Modèles de programmation mathématique	Modèles de programmation linéaire (PL)	AROPAj LUAM	Secteur agricole	Portée supranationale ou nationale/ résolution régionale ou infrarégionale	Tous les prix sont exogènes Approche normative	Politiques économiques agricoles (PAC) : effets sur comportements économiques des producteurs Localisation facilitée Possibilité d'introduction de relations techniques	Nécessité de nombreux paramètres : grandes bases de données pour les informations économiques mais surtout pour les questions techniques (plus rare)
	Modèles de programmation mathématique positive (PMP)	CAPRI Paris et Arfini Barkaoui et Butault Júdez *et al.*	Secteur agricole	Portée supranationale ou nationale/ résolution régionale ou infrarégionale	Tous les prix sont exogènes Approche positive	Politiques économiques agricoles (PAC) : effets sur comportements économiques des producteurs Localisation facilitée	Relations et données techniques non nécessaires en entrée, incohérences possibles a posteriori entre rendements et surfaces ou rendements et intrants par exemple

Tableau 1.1 Typologie des modèles économiques traitant des politiques économiques et environnementales liées à l'agriculture

* macroéconomie : étudie les phénomènes concernant l'économie dans son ensemble, moins bien circonscrite que la microéconomie, car elle étudie des entités abstraites (agrégats et leurs caractéristiques)

ii) Les atouts des modèles de programmation mathématique linéaire

Comme nous venons de le mentionner, les modèles économiques qui peuvent traiter de politiques agricoles et environnementales sont nombreux. Cependant, selon le niveau auquel on souhaite porter son analyse, tous ne sont pas aussi bien adaptés. L'atout principal des modèles de programmation mathématique, comme AROPAj, est de permettre un lien avec les techniques de production agronomique (et zootechnique) et d'offrir une résolution infrarégionale qui permette une localisation des phénomènes étudiés. Précisément, le modèle AROPAj offrait des possibilités, inexploitées jusqu'alors, d'intégration de bases techniques agronomiques, le rendant plus à même de traiter des impacts environnementaux et économiques à une échelle infrarégionale.

1.1.1.b. Présentation d'AROPAj et focalisation sur les aspects importants pour notre étude

Modèle de programmation mathématique linéaire, AROPAj simule l'offre agricole des régions de l'UE, pour les fermes enquêtées par le RICA. Dans un contexte économique donné, il fournit une évaluation de la nature et de la quantité des produits agricoles pouvant arriver sur les marchés. Développé initialement sur les départements français (Jayet *et al.*, 1992), il a ensuite été étendu à l'Union Européenne à 12 puis à 15 (l'élargissement à 25 du modèle étant dépendant de la disponibilité des données du RICA et des enquêtes comptables dans les nouveaux pays membres). Utilisé pour l'étude des réformes successives de la PAC (Jayet et Labonne, 2005), il a aussi été mis en œuvre pour traiter de problèmes agri-environnementaux comme le boisement des terres agricoles (Jayet *et al.*, 1998) ou bien les émissions de gaz à effet de serre agricoles (De Cara et Jayet, 2000, De Cara *et al.*, 2004, De Cara *et al.*, 2005). Après avoir explicité le modèle, nous détaillerons les données qu'il utilise, l'échelle à laquelle il travaille et les hypothèses fondamentales qui sous-tendent les caractéristiques essentielles d'AROPAj.

i) Le principe de fonctionnement du modèle AROPAj

Le modèle AROPAj est en fait constitué d'un ensemble de modèles indépendants représentant chacun le comportement d'un producteur associé à chaque « ferme-type » (*cf.* Encadré 1.2 La typologie et les fermes-types du modèle AROPAj). Ces fermes-types (indexées par *k*) sont elles-mêmes représentatives du comportement de producteurs réels. On suppose que chaque producteur d'une ferme type cherche à optimiser sa marge brute totale (Π_k) en choisissant le niveau d'offre qu'il apporte (ses productions). Dans le cas général, on peut écrire le programme du producteur de la ferme type ainsi :

$$\max_{x_k} \Pi_k(x_k) = g_k \cdot x_k \text{ sous contraintes } \begin{matrix} A_k \cdot x_k \leq z_k \\ x_k \geq 0 \end{matrix}$$

où x_k est le vecteur des activités de production de la ferme-type k, g_k est le vecteur des rémunérations nettes (prix, subventions) associées à chaque activité de production, A_k est la matrice des coefficients d'entrée-sortie, et z_k est le vecteur des ressources ou capacités de production.

Les composantes de x_k sont assimilables à des variables. Elles correspondent, entre autres, aux surfaces de chaque culture (en hectares, en distinguant la part intraconsommée de la part vendue), aux effectifs de chaque catégorie d'animaux (en UGB), aux quantités produites en viande, lait, grains et autres productions végétales (en tonnes ou litres), aux collectes de ces produits, à la quantité d'aliment acheté destiné aux animaux, et au coût d'opportunité de la terre (en k€/ha)[19].

Ainsi, le sous-programme associé aux productions végétales de la ferme type k, s'écrit :

$$\max_{S_j} \pi = \sum_j S_j \left(p_j \cdot r_j - c_j\right) \text{ avec } \begin{matrix} S_j \geq 0 \\ 0 \leq \sum_j S_j \leq SAU \end{matrix}$$

Où j représente l'indice de culture, SAU, la Surface Agricole Utile (SAU) totale de l'exploitation, S_j, la surface de la culture j, p_j, le prix de la culture j, r_j est son rendement, et c_j

[19] Le coût d'opportunité équivaut à un sacrifice maximum que l'on concède en employant une ressource (ici la terre). L'alternative qui a été réellement sacrifiée est celle qui procure le maximum de profit (par exemple la location de la terre) : on peut dire que le coût d'opportunité de la terre inclut le coût du renoncement à la location de celle-ci ou de son emploi à d'autres fins que l'agriculture.

le montant des charges variables par hectare pour cette culture. Dans la version antérieure du modèle, les charges variables et les rendements des cultures sont fixes et spécifiques à chacune des exploitations type considérées par le modèle. Les prix sont exogènes, c'est à dire qu'ils ne sont pas calculés par le modèle mais sont imposés en entrée. Trente-deux activités végétales sont prises en compte, et reflètent les principales cultures européennes (aussi bien grandes cultures que fourrages). Ces productions végétales peuvent d'ailleurs chacune être vendues ou bien consommées sur la ferme à destination de l'alimentation animale. Les animaux sont regroupés en trente et une catégories (ovins, caprins, porcins, volailles et 27 types de bovins).

AROPAj prend en compte plusieurs types de contraintes (associées au vecteur z_k) : contraintes techniques, de structure, et de politique agricole. Pour les activités de production végétale, la surface totale cultivée ne peut excéder la SAU de chaque ferme type qui est fixée initialement. La surface de chaque culture d'une ferme type est de plus bornée par une valeur issue d'estimations (*cf.* § 1.1.1.b.iv) sur le calibrage). Le cheptel varie aussi dans la limite fixée de plus ou moins 15 % du capital animal initial. L'alimentation animale, issue des productions de la ferme ou achetée dépend également de contraintes. Basées sur les références techniques issues de Jarrige, 1988, elles concernent l'encombrement digestif et la satisfaction des besoins en énergie et protéines des animaux. Enfin, les dernières contraintes sont celles des mesures de la PAC : quotas laitiers et betteraviers, jachère volontaire ou obligatoire, obtention de primes (chargement animal,…). (voir Figure 1.1 Fonctionnement du modèle AROPAj).

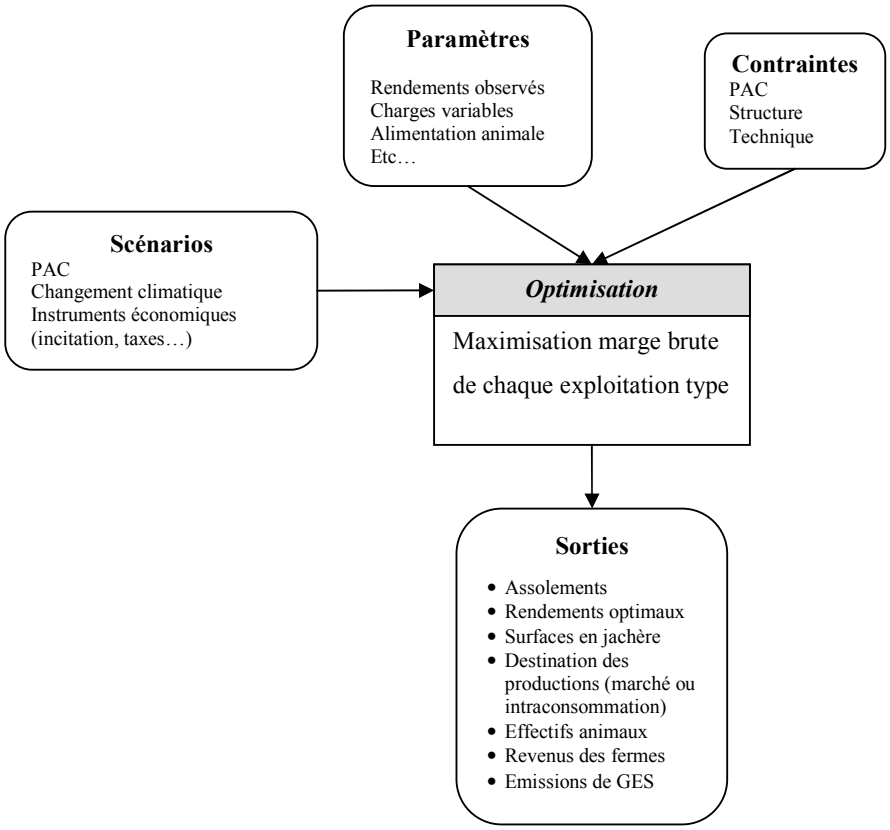


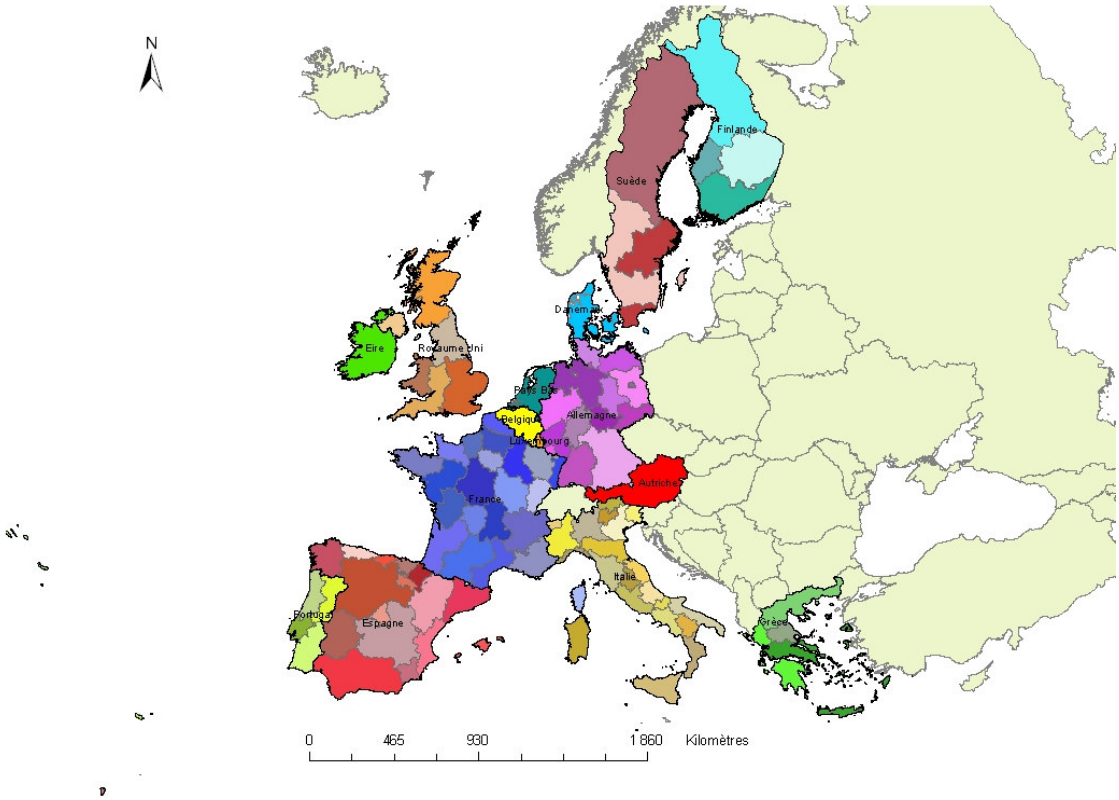
Figure 1.1 Fonctionnement du modèle AROPAj

ii) Les données utilisées par le modèle

Les données de base du modèle proviennent du RICA européen de 1997 (dernière année disponible au moment où est effectuée cette thèse). Cette enquête fournit des données comptables : revenus, coûts de production, aides perçues, moyens de production (cheptels, surfaces cultivées), rendements, système de production, pour quelques 60 000 exploitations. Les exploitations enquêtées sont sélectionnées parmi les exploitations professionnelles[20] selon un plan d'échantillonnage établi pour chacune des 101 régions « RICA » de l'UE à 15 (*cf.* Figure 1.2). La méthodologie utilisée vise à fournir des données représentatives selon trois critères : la région, la dimension économique (i.e. le niveau de la marge brute) et l'Orientation

[20] On entend par "exploitation agricole professionnelle" une exploitation suffisamment importante pour assurer à l'agriculteur une activité principale (et donc à temps complet), ainsi qu'un niveau de revenu lui permettant de faire vivre sa famille.

Technico-Economique (OTE, définie par la part relative de chaque activité de production dans la marge brute, et correspondant au système de production). Parmi les fermes de l'enquête, le modèle économique considère toutes les exploitations de grandes cultures et d'élevage, et exclut celles dont l'OTE est classée en 2 ou 3 (i.e. exploitations horticoles ou spécialisées en cultures permanentes : arboriculture, viticulture). Au total, 50 000 fermes de l'échantillon du RICA, qui représentent une population de plus de 2,5 millions d'exploitants agricoles, sont prises en compte par AROPAj.



Source du fond de carte : Direction Générale Agriculture, Commission européenne

Figure 1.2 Carte des Régions RICA de l'UE à 15

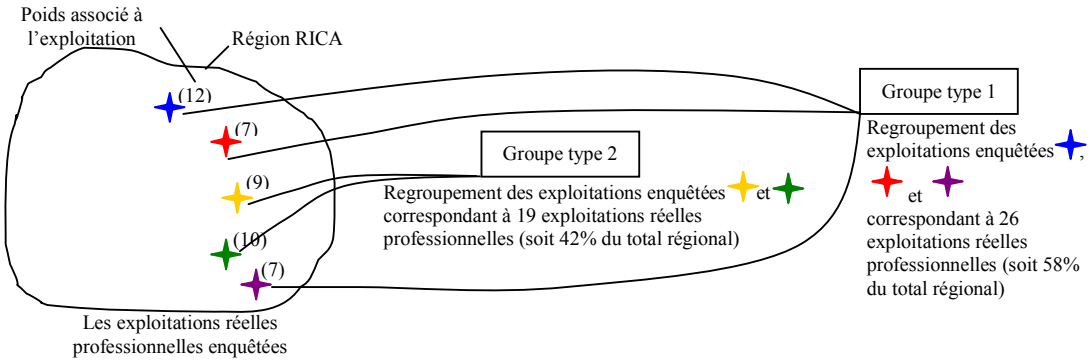
Les composantes des matrices A_k, g_k, ainsi que les valeurs calibrées des activités de production, issues des données du RICA sont déterminées en deux étapes : estimation des paramètres et des valeurs observées des variables, puis calibrage, après avoir défini l'échelle de travail du modèle : les fermes types (*cf.* Encadré 1.2). L'ensemble des étapes de d'élaboration des informations utilisées par le modèle AROPAj est détaillé dans la Figure 1.3.

Encadré 1.2 La typologie et les fermes-types du modèle AROPAj

Le modèle AROPAj n'exploite pas directement les données des fermes enquêtées par le RICA. Une classification préalable regroupe les exploitations individuelles dont les OTE sont considérées par le modèle en fermes types (ou exploitations types, ou groupes types), et ce, pour plusieurs raisons. Tout d'abord, les données individuelles des fermes échantillonnées ne peuvent être utilisées comme telles pour satisfaire aux exigences de confidentialité : elles doivent faire partie d'un groupe type d'au moins quinze exploitations pour être traitées. Ce nombre minimal de quinze exploitations par groupe type permet en outre d'obtenir des estimations robustes (cf. § 1.1.1.b.iii) sur l'estimation des paramètres). Parallèlement, le nombre d'exploitations par région doit être suffisamment important pour diminuer les biais d'agrégation au niveau régional.

Ainsi, les fermes types résultent de l'agrégation, au sein d'une même région, d'exploitations similaires par leur OTE (cf. liste détaillée des OTE considérées par AROPAj Annexe 2), et leur classe d'altitude (3 classes prédéfinies : 0 à 300 m, 300 à 600 m, et plus de 600 m). Cependant, les fermes types ne sont pas nécessairement homogènes : chacune d'entre elles peut contenir plusieurs classes d'altitude et/ou plusieurs OTE. Ces caractéristiques sont en effet liées au nombre et à l'hétérogénéité des exploitations de l'échantillon RICA par région. Ceci entraîne également une typologie qui n'est pas nécessairement identique d'une région à l'autre : par exemple, une exploitation type « grandes cultures » pourra contenir à la fois des exploitations de grandes cultures et de polyculture élevage dans une région donnée, alors que dans une autre, ces deux systèmes appartiendront à deux exploitations-types différents. Le nombre d'exploitation(s) type(s) par région varie ainsi de 1 à 15, pour un total de 734 fermes types dans l'UE.

Cette approche par ferme type est une des caractéristiques importantes du modèle économique AROPAj. Elle permet tout d'abord d'appréhender une certaine diversité de l'agriculture à l'intérieur d'une région. Contrairement aux modèles qui utilisent une agrégation régionale (par ex. LUAM), l'analyse au niveau régional résulte de l'agrégation des fermes types, mais la région elle-même n'est pas modélisée comme une seule exploitation. Le RICA associe à chaque ferme enquêtée, un poids correspondant à la population régionale d'exploitations agricoles réelles représentée. Dans chaque groupe type, les poids des fermes enquêtées sont agrégés et servent à l'extrapolation des résultats au niveau régional (*cf.* exemple graphique schématique ci-dessous). En revanche, si elles sont adaptées à la représentation régionale de l'agriculture, les fermes-types ne sont pas localisées au sein de leur région d'appartenance. D'une part leurs caractéristiques physiques sont très réduites (une classe d'altitude grossière et souvent peu discriminante pour permettre une localisation), ainsi que leurs caractéristiques techniques (une OTE n'indique pas nécessairement un mode de culture et des interventions techniques précises).



iii) L'estimation des paramètres et des valeurs observées des variables

Le modèle fonctionnant à l'échelle des fermes types, différente des exploitations enquêtées par le RICA, il est nécessaire d'estimer les valeurs des paramètres et des variables « observées » pour chacune de ces fermes types. A partir des données du RICA, pour chaque ferme type et en utilisant les pondérations du RICA (*cf.* § Encadré 1.2 La typologie et les fermes-types du modèle AROPAj), l'estimation se fait pour deux types de valeurs :

- les paramètres du modèle (rendement des cultures, charges variables, prix de vente, aides PAC…), et
- les valeurs observées des variables (x_k^0 SAU et répartition de la SAU par culture, cheptel animal, productions…).

En ce qui concerne les charges variables, le modèle distingue deux catégories : les « charges en engrais » et les « autres charges variables » (correspondant aux dépenses en semences, consommation d'énergie, phytosanitaires, etc…). Le RICA ne fournit que le montant total des charges variables par exploitation et par poste : l'affectation par culture est réalisée par une analyse de covariance linéaire utilisant la surface des cultures présentes dans la ferme type. Aux paramètres issus des données du RICA s'ajoutent des informations complémentaires concernant les émissions de GES et les références zootechniques. Ainsi l'IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) fournit les facteurs d'émissions de GES (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2001), et les références nécessaires à l'alimentation animale proviennent de Jarrige (1988). Les prix des engrais proviennent des bases de données Eurostat et FAOstat.

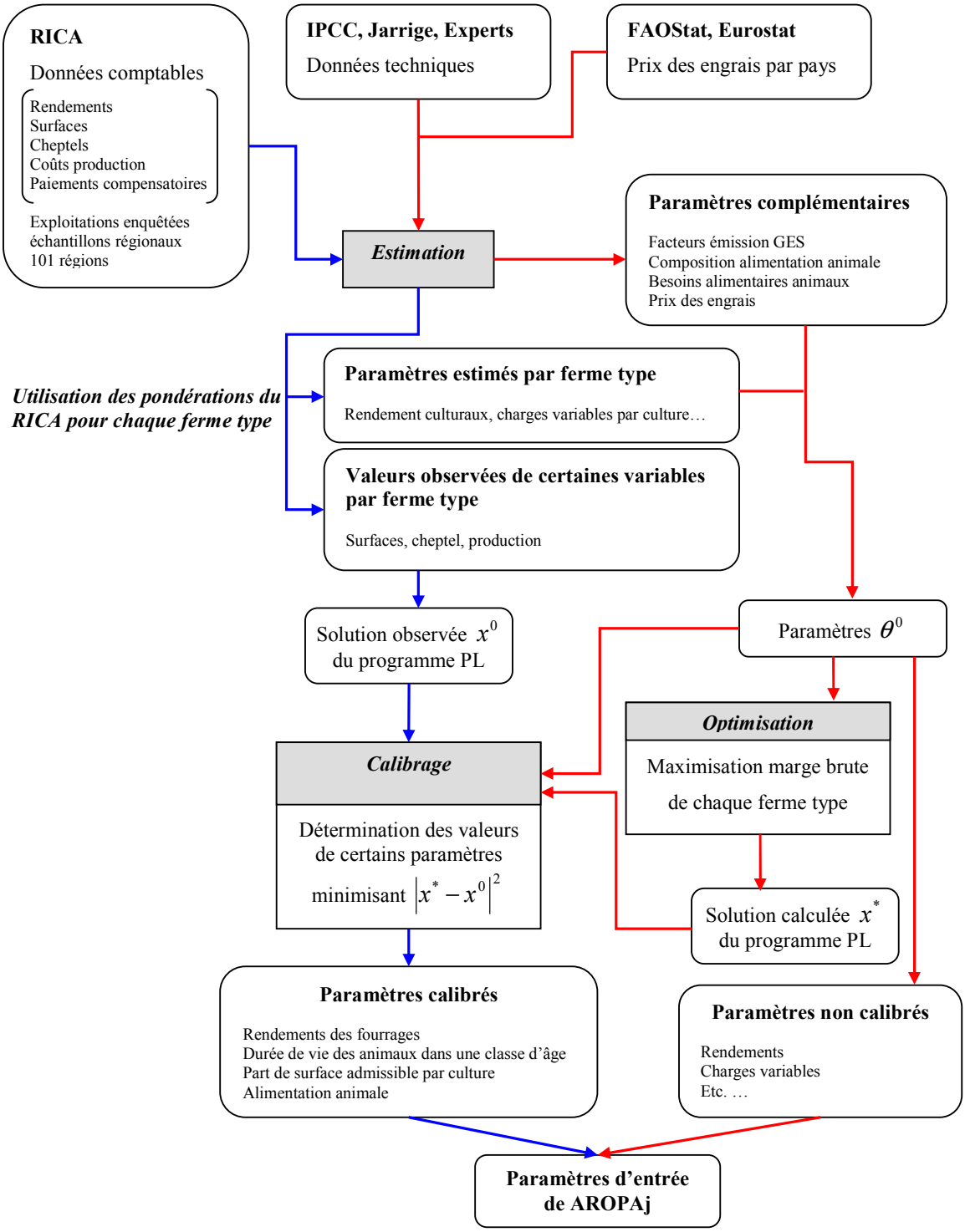


Figure 1.3 Elaboration des données utilisées par AROPAj

iv) Le calibrage

La dernière étape préalable à la simulation proprement dite avec AROPAj est celle du calibrage de certains paramètres : cette étape est requise lorsque l'information en entrée du modèle est manquante ou insuffisamment fiable. Les paramètres concernés sont : des paramètres qui définissent les besoins alimentaires du cheptel, la durée de vie de certains bovins, le rendement des prairies et la part maximale de surface admissible par culture. Le calibrage met en œuvre une combinaison de méthodes de Monte-Carlo et de gradient afin de minimiser la distance entre les données observées (du RICA) x_k^0 et la solution optimale x_k^* qui est déterminée par AROPAj (*cf.* De Cara et Jayet, 2000). Les variables observées utilisées pour le calibrage sont : les surfaces des productions végétales, les effectifs animaux et la production autoconsommée.

Le modèle économique AROPAj est donc un modèle statique qui fonctionne sur une année comptable (cadre fixé par le RICA), à l'échelle de fermes types. Celles-ci sont des entités agrégées d'exploitations enquêtées par le RICA, et en cela virtuelles, et sans localisation à l'intérieur d'une région. Les activités végétales et animales sont elles aussi très dépendantes du RICA et sont souvent liées à des considérations comptables ou à la PAC. Ainsi, les catégories animales des bovins sont très détaillées car elles appellent des aides PAC précises (PMTVA, prime au maintien du troupeau de vaches allaitantes, PSBM, prime spéciale aux bovins mâles), contrairement aux ovins, porcins, caprins et volailles. Les activités de production végétales recouvrent également une ou plusieurs cultures, ce qui n'est pas pour faciliter le lien avec l'agronomie. Par exemple, si les blés tendre et dur, les maïs ensilage et grain sont différenciés, il n'existe en revanche qu'un seul type d'orge (d'hiver et de printemps, fourragère et brassicole confondues), et qu'une seule catégorie « pomme de terre » (sans distinguer les plants, des pommes de terre de consommation, ou féculières). Enfin, l'hypothèse sous-jacente de maximisation du profit du producteur propre à l'économie n'est pas toujours aisément transposable en termes techniques et agronomiques : en d'autres termes, l'agriculteur ne cherchera pas toujours dans la réalité à se trouver à l'optimum économique, il cherchera avant tout à s'assurer un niveau de rendement, quitte à dépenser un peu plus en azote. Or les choix et options techniques se font à l'avance, en fonction d'un objectif de rendement implicite, et en situation d'incertitudes (climatiques en particulier). Même si la

« marge de sécurité » prise par les agriculteurs quant à la dose d'azote apportée pour garantir l'objectif de rendement est aujourd'hui moins importante que dans les années antérieures à 1992 (Boiffin et Stengel, 1999), elle peut exister de manière non négligeable, mais ne sera pas considérée par AROPAj. En effet, AROPAj ne tient pas compte de l'aversion pour le risque de l'agriculteur. A ceci s'ajoutent les incertitudes et contraintes du contexte politique (mesures de la PAC) et social (pression environnementale sur les agriculteurs) : en cela, AROPAj se montre bien adapté pour traiter de scénarios de politiques agricoles et environnementales, mais de manière uniquement déterministe (pas de probabilisation des scénarios par exemple). Cependant, le fait de ne pas relier les fermes types à une localisation et de ne pas prendre en compte la relation entre les techniques culturales et le rendement oriente son application vers des questions de pollution globale (GES). Ceci incite à l'intégration dans le modèle des facteurs techniques mais aussi physiques et en particulier du sol qui agissent sur les rendements (Boiffin et Stengel, 1999). Parallèlement, certains facteurs de production comme le travail et son organisation ne sont pas du tout pris en compte par AROPAj (ne serait-ce que pour des raisons d'inexistence de données). Or certains choix et actions techniques découlent directement du travail de l'exploitant et de son organisation. Par exemple, en ce qui concerne la fertilisation, un engrais azoté composé plus cher qu'un engrais simple pourra lui être préféré car il évite des passages supplémentaires de tracteur au champ pour apporter les éléments phosphoriques et potassiques.

Cependant, certaines informations disponibles semblent pouvoir être utiles pour permettre un lien avec la technique et la localisation des fermes types. Ce sont : une indication sur la classe d'altitude et l'appartenance régionale de chaque ferme type. Ces informations sont complétées par des valeurs issues de l'estimation des paramètres et du calibrage qui concernent : la surface totale irriguée de chaque ferme type, le rendement, la charge totale en engrais, la surface de chaque activité végétale et le cheptel animal.

1.1.2. STICS

1.1.2.a. Le choix du modèle de culture STICS

i) Les modèles de culture : historique et typologie

Depuis une trentaine d'années, les modèles qui simulent le comportement du système sol-plante-atmosphère dans son environnement physique et technique se développent : ce sont les modèles de culture. Ce développement a été favorisé à la fois par une augmentation des moyens de calcul et informatique, et par une meilleure compréhension des phénomènes biologiques sous-jacents qui ont permis leur mise en équation (souvent des relations empiriques). Tout d'abord basés sur des concepts écophysiologiques, les modèles de culture intègrent ensuite les pratiques culturales et les préoccupations agri-environnementales répondant ainsi aux préoccupations contemporaines (Brisson et Wery, 2002). Ces deux auteurs distinguent quatre grands types de modèles de culture qui se sont développé depuis les années soixante-dix (Figure 1.4).

a. Les **modèles écophysiologiques** exploitent les travaux sur la photosynthèse et la respiration (De Wit *et al.*, 1970). Ainsi, SUCROS initie la lignée des modèles de « l'école de Wageningen » (Bouman *et al.*, 1996) qui s'attache surtout à la description des processus écophysiologiques, souvent à des fins didactiques (van Ittersum *et al.*, 2003). Ainsi, ce modèle est essentiellement descriptif et explicatif des processus de production primaire potentielle. ARCWHEAT (Weir *et al.*, 1984), modèle anglais peut être rattaché à cette catégorie ainsi que WOFOST (van Diepen *et al.*, 1989). Les premiers modèles écophysiologiques simulaient le cycle du carbone (productivité primaire, respiration) ; ils se sont ensuite complexifiés, pour intégrer les principaux processus (photosynthèse, respiration, décomposition, bilan d'énergie et bilan hydrique), simulés au pas de temps journalier, comme c'est le cas du modèle WOFOST.

b. Les **modèles agronomiques** proprement dits se développent en parallèle : les pratiques culturales sont introduites. Les modèles américains GOSSYM (Whisler *et al.*, 1986), CROPGRO (Boote *et al.*, 1998, Jones *et al.*, 2003) et CERES blé et maïs, par exemple, (Ritchie et Otter, 1985, Jones et Kiniry, 1986) initient cette famille, dont l'objectif premier

était la prévision des rendements. Ces modèles exploitent initialement les travaux de Monteith et Sinclair sur l'efficience de conversion de l'énergie lumineuse en biomasse. STICS (Brisson *et al.*, 1998, Brisson *et al.*, 2003) fait également partie de cette catégorie, ainsi que le modèle australien APSIM (McCown *et al.*, 1996) qui dérive de CERES. Le caractère agronomique du modèle peut aller jusqu'à l'utilisation de l'information de diagnostic agronomique dans son fonctionnement, comme pour AZODYN (Jeuffroy et Recous, 1999).

c. Dans le même temps, les préoccupations agro-environnementales deviennent plus fortes et appellent le développement d'autres modèles : les **modèles agro-environnementaux**. EPIC (Williams *et al.*, 1984) est mis au point aux Etats-Unis pour simuler l'impact de l'érosion des sols sur la production agricole. CROPSYST (Stockle *et al.*, 1994, Stockle *et al.*, 2003), issu d'EPIC, appartient à ce type de modèles, ainsi que CERES-EGC (Gabrielle *et al.*, 1995). Ce dernier résulte de modifications de CERES pour mieux répondre aux problématiques de pollutions par les nitrates et les pesticides.

d. Des **modèles** uniquement **environnementaux** sont apparus dans les années 1990, tels DAISY (Hansen *et al.*, 1990) ou PASTIS (Lafolie, 1991). Contrairement aux deux types de modèles précédents, leur objectif principal est l'étude des transferts de matières dans l'environnement (migration, lixiviation, minéralisation, transport des nitrates, ou d'autres polluants), de la parcelle au bassin versant.

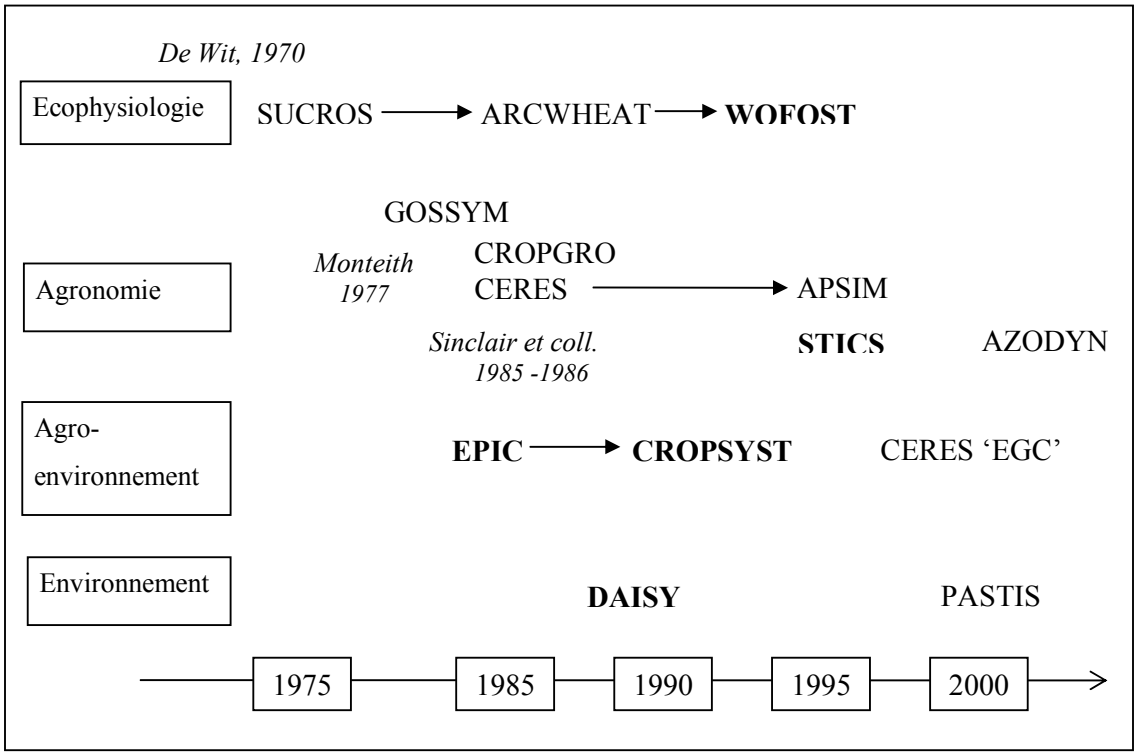


Figure 1.4 Chronologie de la modélisation de culture (d'après Brisson et Wery, 2002).

En gras les modèles génériques, en italique les publications qui ont déterminé le référentiel commun au développement des modèles (De Wit *et al.*, 1970, Monteith, 1977, Spaeth et Sinclair, 1985, Sinclair, 1986).

Le premier type de modèles a une dominante mécaniste, les trois autres ont des objectifs plus appliqués (simulations des rendements et des impacts environnementaux potentiels de la production agricole), ils ont une approche plus empirique tout en intégrant des connaissances de plusieurs disciplines scientifiques. De nombreux modèles ont été développés depuis le début des années 1980, le plus souvent en réponse à un problème précis, pour une culture ou un groupe de cultures donné. Aujourd'hui, la plupart des applications utilisent cependant des modèles de culture génériques (Benbi et Nieder, 2003 p. 655-691). EPIC est le premier d'entre eux, il a été utilisé dans des études traitant d'érosion, de pollution, de changement climatique, entre autres. Les modèles STICS et WOFOST sont également des modèles génériques au sens où ils peuvent traiter de nombreuses cultures avec un formalisme commun, tout en considérant les spécificités de chacune (Brisson et Wery, 2002).

Type de modèle	Noms	Principaux processus simulés	Plantes simulées	Echelle/Pas de temps	Objectif initial du modèle	Applications
Ecophysiologique	SUCROS (Simple Universal and comprehensive CROp growth model)	productivité primaire, cycle du carbone, en fonction de paramètres phénologiques de la plante et climatiques, prise en compte du facteur limitant disponibilité en eau du sol mais pas de facteur limitant azote ni facteurs de pression biotiques (maladies, adventices)	Blés, Orges, Maïs, Betterave, Pomme de terre, Soja, Canne à sucre	Pas de temps journalier Levée à la récolte Caractéristiques individuelles des feuilles (dépendant de l'âge phénologique de la culture et de la te mpérature de l'air)	Compréhension et explication des phénomènes écophysiologiques qui sous-tendent la production végétale, enseignement	Modèle qui a servi de base au développement de la lignée des modèles néerlandais de Wageningen (LINTUL[21], ORYZA[22], TOMGRO[23], SWAP[24], WOFOST)
	ARCWHEAT	productivité primaire, cycle du carbone, en fonction de paramètres phénologiques de la plante et climatiques, prise en compte du facteur limitant disponibilité en eau du sol mais pas de facteur limitant azote ni facteurs de pression biotiques (maladies, adventices)	Blé	Pas de temps journalier Levée à la récolte	Evaluation de la matière sèche produite	

[21] LINTUL (Light INTerception and Utilisation) : Spitters C. J. T. (1990). "Crop growth models: their usefulness and limitations." Acta Horticulturae(No. 267).
[22] ORYZA, modèle de croissance pour le riz : Bouman B. A. M., Kropff M. J., Tuong T. P., Wopereis M. C. S., ten Berge H. F. M., van Laar H. H. (2001). ORYZA2000: modelling lowland rice. Los Baños (Philippines), International Rice Research Institute, and Wageningen University.
[23] TOMGRO, modèle de croissance pour la tomate : Dayan E., Keulen H. v., Jones J. W., Zipori I., Shmuel D., Challa H. (1993). "Development, calibration and validation of a greenhouse tomato growth model: I. Description of the model." Agricultural Systems **43**(2).
[24] SWAP (Soil Water Atmosphere Plant) : Modèle orienté vers la gestion de l'eau et de l'irrigation des cultures (bilan hydrique + module culture de WOFOST) : Kroes J. G., Wesseling J. G., Dam J. C. v. (2000). "Integrated modelling of the soil-water-atmosphere-plant system using the model SWAP 2.0 an overview of theory and an application." Hydrological Processes **14**(11/12).

	WOFOST (WOrld FOod STudies)	productivité primaire, cycle du carbone, photosynthèse, respiration, décomposition, bilan d'énergie et bilan hydrique : Interception lumineuse et assimilation du CO2 pour la croissance de la culture, et les paramètres phénologiques pour le développement de la culture. Seuls les facteurs écologiques (or pressions biotiques) sont pris en compte, considérant que les pratiques culturales sont optimales	Blé, Orge, Maïs grain, Riz, Betterave, Pomme de terre, Pois, Soja, Colza, Tournesol	Pas de temps journalier Cycle cultural de la levée ou du semis à la maturité	Modèle mécaniste qui explique la croissance de la culture en se basant sur les processus sous-jacents (photosynthèse, respiration), affectés par les conditions environnementales (sols et climat). Distinction entre production potentielle et limitée en introduisant un stress hydrique (représentant respectivement les situations culture irriguée et non irriguée).	▪ WOFOST a été introduit dans le programme européen Crop Growth Monitoring System (CGMS) du projet MARS (Monitoring Agriculture with Remote Sensing).du JRC d'Ispra en Italie, pour évaluer les rendements régionaux potentiels européens. ▪ Version disponible pour les régions tropicales. ▪ Etudes européennes impact changement climatique sur la production agricole
Agronomiques	GOSSYM	Processus physiques et physiologiques qui affectent le développement, la croissance et le rendement de la culture. *Particularité* : peut être couplé à un système expert d'intelligence artificielle (COMAX) qui facilite l'aide à la décision de la conduite de la culture	Coton	pas de temps journalier	Outil d'amélioration de l'efficacité des pratiques cultures du coton	Gestion des pratiques d'irrigation, de fertilisation, et de régulateur de croissance, outil d'aide à la décision pour les producteurs de coton aux USA
	CROPGRO	Processus de fonctionnement agronomiques de la culture régis par les conditions de climat, de sol et des pratiques culturales.	Légumineuses : Soja, arachide, haricots secs, pois chiche, Dolique, pois mascate, fèves, Légumes : poivron, chou, tomate Prairies tropicales : Bahia, brachiaria	Canopée = grande feuille (utilisation LAI), Pas de temps journalier, ensemble du cycle cultural	Estimation des rendements des cultures et des paramètres agronomiques en relation (bilans hydriques et azotés)	Nombreuses études agronomiques et environnementales
	CERES (Crop Environment Resource Synthesis)	Croissance et développement de la culture (parties aériennes et racines), élaboration du rendement, bilans hydrique et azoté	Blé et céréales à pailles, Orges Maïs Canola Millet Sorgho, Riz Colza Betteraves Canne à sucre	Combinaison de l'approche LAI et SLA[25] pour la canopée, pas de temps journalier	Demande du gouvernement des USA envers l'USDA pour un modèle de prédiction des rendements nationaux et étrangers U.S. Prévision des rendements à l'échelle régionale Aide à la décision: pilotage stratégique et tactique Analyse de l'effet des politiques agricoles Mettre en relief des besoins en matière de recherche	Nombreuses études agronomiques et environnementales

[25] SLA (Specific Leaf Area) : rapport entre la surface et la masse foliaire qui permet la conversion de la croissance en biomasse affectée aux feuilles en croissance en surface (le SLA varie en fonction du développement de la culture et des stress qu'elle subit).

	APSIM (Agricultural Production Systems SIMulator)	Conduite culturale qui structure les processus de croissance et développement de la culture, de bilan hydrique, azoté et phosphorique, le pH du sol et son érosion entre autres	Blé, Maïs Orge Arachide, Tournesol, Canola, Pois chiche, Luzerne Coton Prairie tropicale	pas de temps journalier	Mettre au point un outil de prédiction de la production végétale en relation avec le climat, le génotype, l'itinéraire technique pour traiter de problèmes de gestion des ressources naturelles à long terme. Simuler les processus biophysiques des systèmes de cultures, en particulier ceux qui sont liés aux effets économiques et écologiques des pratiques culturales, dans un contexte de risque climatique.	Une large gamme d'applications dont : • aide à la décision dans les exploitations agricoles, • Mise au point de pratiques culturales pour la gestion de la production ou des ressources naturelles, • évaluation de prévision de climats saisonniers, • analyse de questions logistiques, • développement de règlement de gestion des déchets, • Evaluation de risques pour la prise de décision politique, • Référence pour la recherche et l'enseignement.
	STICS (Simulateur mulTIdisciplinaire pour les Cultures Standard)	Croissance et développement de la culture (parties aériennes et racines), élaboration du rendement, bilans hydrique et azoté avec intégration de l'itinéraire technique	Blé, Orges, Maïs, Soja, Pois, Betterave, Pomme de terre, Colza, Tournesol, Lin, Tomate, Salade, Fraise Banane, Vigne, Cultures associées	Entité simulée = situation homogène pour le sol, le climat et les pratiques culturales, Canopée = grande feuille (utilisation LAI), Pas de temps journalier, ensemble du cycle cultural, possibilité d'enchaîner les simulations	Disposer d'un modèle de culture générique robuste et générique pouvant servir à la fois d'outil pour la recherche, les instituts techniques	Nombreuses études : ▪ Aide à la décision : gestion de la récolte, de la fauche ▪ Problèmes agri environnementaux ▪ Agriculture de précision ▪ Couplages avec des modèles économique, climatiques, atmosphère,
	AZODYN	Accumulation de biomasse et d'azote dans la plante, puis dans les grains. Dynamique de fourniture d'azote par le sol, les périodes de carence et leur incidence sur le rendement du blé et la teneur en protéines des grains	Blé (application au colza en cours)	Canopée simulée par SLA, Pas de temps journalier, depuis la sortie hiver jusqu'à la maturité Echelle de la parcelle	raisonner la fertilisation azotée en tenant compte d'objectifs de production, de qualité, de rentabilité économique et de réduction des pertes d'azote vers l'environnement, pour pouvoir identifier les meilleures stratégies de fertilisation azotée	Aide à la décision et stratégies de fertilisation du blé en agriculture conventionnelle et biologique
Agro-environnementaux	**CROPSYST** (CROPping SYSTems modelling framework)	Croissance de la partie aérienne et des racines, production de matière sèche, et rendement, bilan d'azote et hydrique du sol et de la plante, en tenant compte des pratiques culturales (rotation, irrigation, fertilisation, travail du sol…) Particularités : inclut la gestion des pesticides et leur transfert dans les sols	Blés Orges Pomme de terre Maïs Sorgho Betterave Haricots Lentilles Soja Luzerne Tournesol Millet Thé, Vigne	Canopée simulée par SLA, pas de temps journalier, ensemble du cycle cultural	Etude de l'effet de la gestion des pratiques culturales sur la productivité des cultures et l'environnement (analyse de politiques agricoles, recherche appliquée) aux Etats-Unis	Nombreuses études agronomiques et environnementales

	EPIC (Erosion Productivity Impact Calculator)	Fonctionnement des aires de drainages en terme de : croissance de la culture, fonctionnement hydrologique et du sol, climatique et érosif, contraintes économiques Particularités : générateur climatique intégré et module simple de comptabilité pour calculer le coût des intrants et les bénéfices	Blé Avoine Soja Maïs Tournesol Luzerne Tomate Haricot Sorgho Carthame	Entité simulée = situation homogène pour le sol, le climat et les pratiques culturales, pas de temps journalier, ensemble du cycle cultural, possibilité d'enchaîner les simulations	Etude de l'impact de l'érosion des sols sur la productivité agricole sous l'impulsion de l'USDA	▪ Nombreuses études de prédiction de rendement (USA, Sud-Ouest de la France : EPICPhase[26] pour la gestion de l'irrigation du maïs), ▪ Etudes de l'effet des changements climatiques sur les rendements, ▪ Etudes des cycles de l'azote et du phosphore, et du ruissellement/lessivage de ces nutriments ▪ Etudes de scénarios d'érosions hydrique et éolienne ▪ Stockage du carbone dans les sols Etudes agri-environnementales avec prise en compte de l'économie
	CERES-EGC	En plus de CERES « classique » : Transferts d'eau et de chaleur, turnover de la matière organique, dénitrification pour pouvoir simuler le transfert de nitrates	Idem CERES	Idem CERES	En plus des objectifs initiaux de CERES : Evaluer et gérer l'impact environnemental des cultures (en particulier : pollutions par les nitrates et les pesticides)	
	DAISY (DAnIsh Simulation model)	Production de la culture, dynamique de l'eau, de l'azote, flux de chaleur et de carbone dans le sol. Différentes stratégies de gestion des pratiques culturales		Parcelle au bassin versant (maillage de 1 à 4 ha)	Etude des transferts d'eau et de matières dans le système sol-plante (migration, lixiviation, minéralisation, transport des nitrates, ou d'autres polluants)	Construction d'un indicateur régional de pression polluante par l'azote
Environnementaux	**PASTIS** (Prediction of Agricultural Solute Transformations in Soils)	Flux de chaleurs, d'eau, transport de solutés, biotransformations du carbone et de l'azote dans le sol		Parcelle au bassin versant	Etude des transferts de matières dans l'environnement (eau, azote, carbone)	Stratégies d'irrigation respectueuse de l'environnement

En gras, les modèles génériques

Tableau 1.2 Les types de modèles de cultures et leurs caractéristiques

[26] EPICPhase : Cabelguenne M., Debaeke P., Bouniols A. (1999). "EPICphase, a version of the EPIC model simulating the effects of water and nitrogen stress on biomass and yield, taking account of developmental stages: validation on maize, sunflower, sorghum, soybean and winter wheat." Agricultural Systems **60**(3).

ii) Le choix du modèle STICS

Le caractère générique du modèle STICS évoqué ci-dessus est important pour nous : nous cherchons à modéliser le rendement, en réponse à l'apport azoté, de plusieurs cultures et dans des conditions pédoclimatiques différentes, mais en ayant une approche méthodologique similaire pour toutes. Le modèle STICS a été développé pour intégrer l'effet des pratiques culturales sur la culture et son milieu, ce qui correspond à l'application de la modélisation de la fertilisation azotée que nous visons. La possibilité d'intégrer différentes sources d'azote, provenant de divers engrais minéraux achetés, mais aussi d'effluents d'élevage est également importante. De surcroît, le modèle de culture utilisé doit pouvoir s'adapter et être assez robuste pour fonctionner dans les situations pédoclimatiques diverses correspondant à celles que l'on trouve au sein de l'Europe des quinze, ce qui est le cas de STICS (Brisson *et al.*, 2003). Enfin, afin de pouvoir traiter des questions liées au changement climatique, le modèle de culture se doit de prendre en compte ce phénomène, non seulement via l'augmentation des températures moyennes, mais aussi par l'augmentation de la concentration en CO_2 atmosphérique.

1.1.2.b. Le modèle STICS

STICS (Brisson *et al.*, 1998, Brisson *et al.*, 2002, Brisson *et al.*, 2003) est un modèle qui simule le fonctionnement des cultures, à pas de temps journalier. A partir des variables d'entrées relatives au sol, au climat et à l'itinéraire technique, il estime des variables relatives à la production (quantité et qualité), à l'environnement et à l'évolution des caractéristiques du sol sous l'effet de la culture. L'objet simulé est la situation culturale pour laquelle on peut définir de façon déterministe un milieu physique et un itinéraire technique homogènes, il n'y a donc pas de caractère probabiliste. Traditionnellement, cet objet est la parcelle de l'agronome ou de l'agriculteur, cela peut aussi en être un sous-ensemble (cas de l'agriculture de précision), ou bien, dans notre cas, l'ensemble de la sole d'une culture d'une exploitation agricole type régionale. Les grands processus simulés sont la croissance et le développement de la culture ainsi que les bilans hydrique et azoté. Voir Figure 1.5.

STICS est développé, depuis 1996, à l'unité de bioclimatologie de l'INRA d'Avignon, avec l'appui de l'unité d'Agronomie de l'INRA de Laon et la participation d'équipes du CIRAD,

du CEMAGREF et des Instituts Techniques. Il ne s'agit pas réellement d'un nouveau modèle; quelques parties sont originales mais la plupart des autres parties font appel à des formalismes classiques ou sont issues de modèles existants. L'originalité de cet outil réside plus dans son adaptabilité à de nombreuses cultures (blé, mais, orges, tournesol, pois, colza, betterave, soja, sorgho, lin, prairies, tomate, fraisier, carotte, laitue, …) et sa robustesse : capacité à simuler des conditions pédoclimatiques variées sans générer de biais importants. La modularité de STICS facilite ses évolutions, et s'organise en sept composantes principales (*cf*. Figure 1.5) : trois modules pour la partie aérienne de la plante (LAI, biomasse et rendement), trois pour le sol (bilan hydrique, bilan azoté et croissance racinaire) et un dernier module gérant les interactions entre les techniques culturales et le système sol-plante, qu'il s'agisse des apports d'eau, d'engrais ou de l'environnement climatique de la culture. En nous basant sur les manuels et articles références du modèle (Brisson *et al.*, 1998, Brisson et Mary, 2002, Brisson *et al.*, 2002, Brisson *et al.*, 2003), nous décrivons les différents modules, en nous intéressant plus particulièrement aux fonctions et formalismes qui interfèrent avec notre utilisation du modèle.

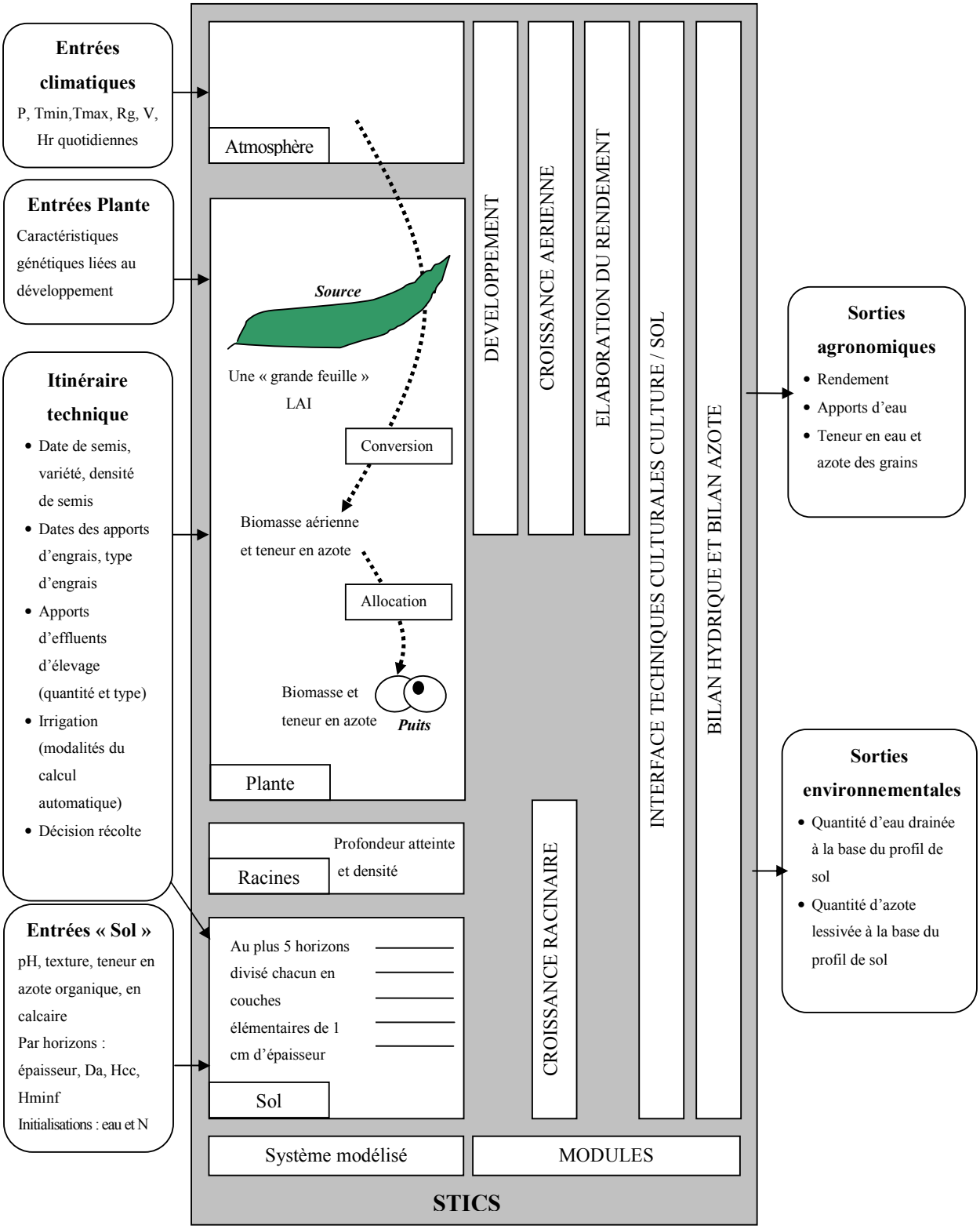
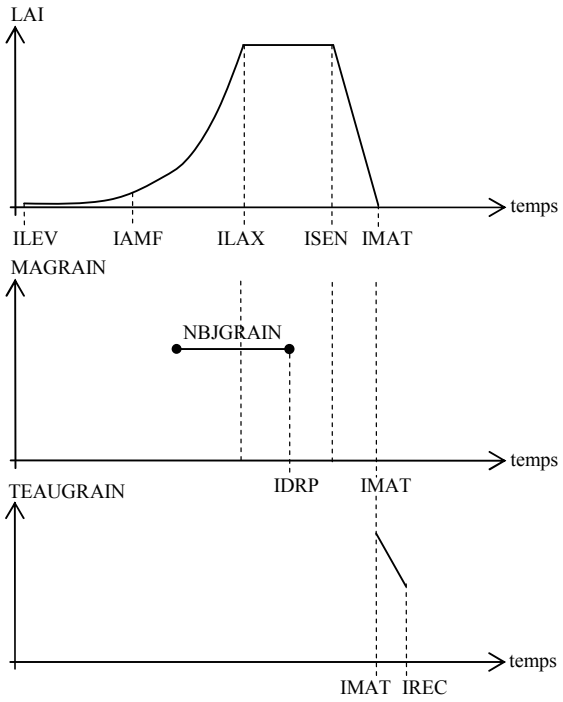


Figure 1.5 Fonctionnement général de STICS : les entrées, le système modélisé, les modules et les sorties

i) Le développement

Huit stades de développement de la plante sont distingués dans STICS. Ils correspondent à la simulation de la vitesse d'expansion du LAI (stades végétatifs) et à la simulation du remplissage des organes récoltés (stades reproducteurs). Les deux échelles sont indépendantes. Ces stades correspondent plutôt à des changements de stratégie trophique (par exemple le remplissage des grains) ou morphologique de la culture (par exemple le LAI), qu'à des stades organogénétiques. Ces stades génériques permettent l'adaptation du modèle à des cultures différentes (*cf.* Figure 1.6 qui montre les stades de développement dans STICS et les évènements qui les caractérisent).

La température pilote le développement par l'intermédiaire de l'échelle de temps physiologique. Cette dernière est basée sur la notion de somme de températures qui correspond à l'approximation linéaire de la courbe de vitesse de développement en réponse à la température. Les durées entre stades successifs sont propres à chaque espèce de plante et chaque variété. La vitesse du développement de la plante, régie par la température moyenne journalière (cette température est celle du couvert dans STICS), peut être accélérée ou freinée par plusieurs facteurs : la photopériode, les besoins en froid, les stress azoté ou hydrique.



LAI : Indice foliaire (m^2 feuille $.m^{-2}$ sol)
MAGRAIN : matière sèche des grains ($g.m^{-2}$)
TEAUGRAIN : teneur en eau des grains (g $eau.g^{-1}$ MS)
NBJGRAIN : période où se met en place le nombre de grains qui précède le début de remplissage

ILEV : stade levée
IAMF : stade d'accroissement maximal du LAI, fin de la phase juvénile
ILAX : stade où le LAI atteint sa valeur maximale
ISEN : début de la sénescence
IMAT : stade de maturité physiologique
IDRP : début de remplissage des grains
IREC : date de récolte

Figure 1.6 Les stades de développement dans STICS et leur signification en terme d'évolution du LAI, de la croissance des grains et de leur teneur en eau (d'après Brisson *et al.*, 1998).

ii) La croissance aérienne

- La dynamique du LAI

Le couvert végétal est assimilé à un milieu homogène, et le feuillage est donc assimilé à une seule grande feuille de surface équivalente, ce qui définit l'indice foliaire (ou LAI Leaf Area Index). L'évolution du LAI se fait en quatre stades (*cf.* Figure 1.6) : deux phases de croissance, une phase stable, et une phase de sénescence. Comme le LAI détermine la surface d'interception du rayonnement lumineux, les phases de croissance et de sénescence sont importantes. Le calcul de la croissance foliaire (DELTAI) s'effectue entre les stades ILEV (levée) et ILAX (LAI maximal) selon l'équation 1.1.

$$DELTAI = \frac{DLAIMAX}{1+e^{(PENTLAIMAX\,(VLAIMAX-ULAI))}} \times (TCULT - TCMIN) \times EFDENSITE \times DENSITE \times \min(TURFAC, INNS) \times EXOLAI \qquad \text{Equation 1.1}$$

Avec
DELTAI : Accroissement journalier de l'indice foliaire (cm)
DLAIMAX : Taux d'installation maximal du LAI (m^2 feuille.m^{-2} sol.$(°.j)^{-1}$)
TCULT : Température de surface moyenne journalière (°C)
TCMIN : Température minimale de croissance (°C)
PENTLAIMAX : Courbure de la logistique (SD)
VLAIMAX : Valeur de l'unité de développement foliaire au stade AMF (SD)
ULAI : Unité de temps physiologique de développement foliaire (SD, entre 1 et 3)
EFDENSITE : Effet de la densité de semis agissant sur la mise en place du LAI (SD)
DENSITE : Densité de semis (plante.m^{-2})
TURFAC : Indice de stress de turgescence (SD, entre 0 et 1)
INNS : Indice de stress azoté (SD, entre 0 et 1)
EXOLAI : Indice d'excès d'eau (SD, entre 0 et 1)

La croissance foliaire est pilotée par la température (TCULT est la température de surface moyenne journalière et TCMIN la température minimale de croissance). L'unité de développement foliaire ULAI est définie et vaut respectivement 1 à ILEV, 3 à ILAX et VLAIMAX à IAMF (fin de phase juvénile). Entre ces trois stades, une interpolation linéaire est faite avec les unités de développement (UPVT unités photo-vernalo-thermiques). Les stress hydrique et azoté sont pris en compte via leurs indices respectifs (TURFAC et INNS), EXOLAI est le stress d'excès d'eau. L'effet de la densité de peuplement est pris en compte via le paramètre EFDENS. Le paramètre DLAIMAX est utilisé pour l'option de croissance nette et DLAIMAXBRUT est utilisé dans le cas de l'option de croissance brute.

Le LAI reste constant entre le stade où il est à sa valeur maximale (ILAX) et le début de la sénescence (ISEN). Entre la sénescence (ISEN) et la maturité (IMAT), le LAI décroît linéairement. Ces deux stades peuvent être plus précoces, suite à une augmentation de température causant un stress hydrique.

- L'interception du rayonnement

Le rôle de la surface foliaire représentée par le LAI est l'interception du rayonnement lumineux photosynthétiquement actif, pour lequel une analogie optique avec la Loi de Beer est utilisée (équation 1.2).

$$RAINT = 0.95 \times PARSURRG \times TRG\left(1 - e^{(-EXTIN \times LAI)}\right) \qquad \text{Equation 1.2}$$

Avec

RAINT : rayonnement photosynthétiquement actif intercepté par le couvert (PAR) ($MJ.m^{-2}.j^{-1}$)
PARSURRG : fraction du PAR dans le rayonnement
TRG : rayonnement global ($MJ.m^{-2}.j^{-1}$)
EXTIN : coefficient d'extinction du rayonnement dans le couvert végétal (SD)
LAI : indice foliaire (m^2 feuilles.m^{-2} sol)

- La croissance en biomasse

L'accumulation de biomasse aérienne (DLTAMS) répond au rayonnement intercepté selon une loi parabolique (équation 1.3) qui fait intervenir une efficience maximale du rayonnement (EBMAX) propre à chaque espèce. Cette efficience peut être différente pendant les phases juvénile, végétative et reproductrice. L'accumulation de biomasse est fonction de la température du couvert (TCULT) selon FTEMP(TCULT) qui met en jeu les températures minimale (TCMIN), maximale (TCMAX) et optimale (TCOPT) de croissance, spécifiques à chaque plante. Ce stress thermique, le stress dû à la sécheresse, à l'excès d'eau et à l'azote (SWFAC et INNS) sont supposés indépendants. L'eau et l'azote peuvent également agir sur l'accumulation de biomasse aérienne, via les stress exprimés en indices : SWFAC (indice de stress hydrique stomatique) et INNS (indice de stress azoté). De plus, si l'option « changements climatiques » est activée, l'efficience de conversion de l'énergie lumineuse est modifiée par une teneur en CO_2 atmosphérique élevé, selon un formalisme adapté de Stockle *et al.*(Stockle *et al.*, 1992a, Stockle *et al.*, 1992b) (cf. § 6.1.4). Le cumul de DLTAMS jour après jour donne la biomasse aérienne du couvert (MASEC).

$$DLTAMS = \left(EBMAX \times RAINT - 0{,}0815 \times RAINT^2\right) \times FTEMP(TCULT) \times SWFAC \times INNS \times EXOBIOM \times FCO2 \times DLTAREMOBIL \quad \text{Equation 1.3}$$

Avec
DLTAMS : Accumulation de biomasse aérienne ($t.ha^{-1}.j^{-1}$)
EBMAX : Efficience de conversion maximale du rayonnement ($t.ha^{-1}.MJ^{-1}.m^{-2}$)
RAINT : Rayonnement photosynthétiquement actif intercepté par le couvert ($MJ.m^{-2}.j^{-1}$)
FTEMP : Fonction des températures minimales, maximales et optimales de croissance définissant l'action de la température sur l'accumulation de biomasse aérienne.
TCULT : Température de surface moyenne journalière (°C)
SWFAC : Indice de stress de sécheresse (SD, entre 0 et 1)
INNS : Indice de stress azoté (SD, entre 0 et 1)
EXOBIOM : Indice de stress d'excès d'eau (SD, entre 0 et 1)
FCO2 : Effet CO_2 sur l'efficience de conversion
DLTAREMOBIL : matière sèche issue de la remobilisation des réserves hivernales dans le cas des pérennes ($t.ha^{-1}.j^{-1}$)

iii) L'élaboration du rendement et de la qualité des récoltes

Le modèle distingue les plantes à « croissance déterminée » et les plantes à « croissance indéterminée ». Pour les premières, le modèle repose sur l'hypothèse que le nombre et le remplissage des organes récoltés n'influence pas la croissance végétative. Pour les secondes, il considère une compétition trophique entre les parties végétatives en croissance et les organes récoltés (racines, graines,…).

Parmi les cultures que nous étudions, les céréales, le tournesol, le colza, et la pomme de terre font partie des cultures à croissance déterminée au sens que l'on vient de préciser. STICS considère la betterave à sucre comme faisant partie des plantes à croissance indéterminée, car on récolte la racine dont le remplissage interagit avec la croissance des feuilles.

- Cas des plantes à croissance déterminée

Les organes récoltés seront appelés « grains » dans la suite de cette partie. Le nombre de grains (NBGRAINS) est fixé pendant une phase de durée (NBJGRAIN) variable, qui précède le début de remplissage (voir Figure 1.6). Il dépend de la vitesse de croissance moyenne du couvert pendant cette période (VITMOY) selon une dynamique propre à l'espèce et à la variété (équation 1.4). Le nombre de grains est limité inférieurement par le paramètre NBGRMIN et supérieurement par le paramètre NBGRMAX. Il peut être réduit en cas de gel.

$$NBGRAINS = (CGRAIN \times VITMOY + CGRAINV0)NBGRMAX \qquad \text{Equation 1.4}$$

Avec
NBGRAINS : Nombre d'organes récoltés
CGRAIN : pente de la relation entre le nombre de grains et le taux de croissance pendant la période NBJGRAINS (grains.(g de matière sèche)$^{-1}$.j^{-1})
VITMOY : Taux de croissance moyen quotidien pendant la période NBJGRAINS (g.m^{-2}.j^{-1})
CGRAINV0 : Nombre de grains produits quand le taux de croissance CGRAIN est égal à zéro
NBGRMAX : Nombre maximal d'organes récoltés

La matière sèche accumulée dans les grains est calculée en appliquant un « indice de récolte » évolutif dynamiquement (ICARB) à la matière sèche de la plante. ICARB augmente linéairement entre les stades IRDP (début de remplissage) et IMAT (maturité) (le temps pouvant être exprimé en jours ou en unités de développement).

La masse de grains MAGRAIN découle de l'indice de récolte ICARB appliqué à la biomasse totale aérienne accumulée (MASEC). La masse de chaque grain est ensuite calculée comme le rapport entre la masse et le nombre de grains, dans la limite génétique PGRAINMAXI.

- Cas des plantes à croissance indéterminée

Les organes récoltés seront appelés « fruits » dans la suite de cette partie. Les fruits se mettent en place entre les stades DRP et NOU (fin de nouaison), dont la durée est propre à l'espèce. Pendant cette période, le nombre de fruits noués (NFRUITNOU) est défini comme le produit de plusieurs facteurs :

$$NFRUITNOU = AFRUITSP \times UPVT \times NBINFLO \times DENSITE \times SPFRUIT \times FGELFLO$$

Equation 1.5

Avec
NFRUITNOU : Nombre de fruits noués
AFRUITSP : Paramètre variétal correspondant au nombre potentiel de fruits noués par inflorescence et par degré.jour (infloresence^{-1}.(°.j)$^{-1}$)
NBINFLO : Nombre d'inflorescences
DENSITE : Densité de semis (plante.m^{-2})
SPFRUIT : Indice de stress trophique (SD, entre 0 et 1)
FGELFLO : Indice de stress de gel agissant sur les fruits à partir de la floraison (SD, entre 0 et 1)

Au cours de leur croissance, les fruits passent par des compartiments, dont on définit le nombre a priori, correspondants à des âges physiologiques croissants. La durée de passage d'un fruit dans un compartiment dépend de la température. Dans la dernière boîte (ou classe d'âge), les fruits ne grossissent plus et ont atteint chacun leur masse sèche finale (PGRAINMAXI) : le fruit est supposé être à maturité physiologique. Dans chaque compartiment, la croissance des fruits est égale au produit d'une fonction « force des puits » (FPFT), tenant compte du potentiel génétique, par le rapport source-puits.

- La qualité des organes récoltés

La teneur en eau des organes récoltés est supposée constante (H2OFRVERT) jusqu'à un stade (STDRPDES) caractérisé par une somme de température. A partir de ce stade, l'évolution de la teneur en eau est entièrement déterminée par le paramètre DESHYBASE, qui peut être positif ou négatif et exprime la perte ou le gain en eau quotidien des organes récoltés par

gramme de matière fraîche. La déshydratation peut être provoquée ou accélérée par le stress hydrique caractérisé par l'écart entre la température du couvert et la température de l'air. La teneur en eau des organes récoltés au jour j (TEAUGRAIN) s'exprime ainsi (équation 1.6) :

$$TEAUGRAIN = H2OFRVERT - \sum_{débutDES}^{j} DESHYBASE - \sum_{débutDES}^{j} TEMPDESHYD(TCULT(j) - TAIR(j))$$

Equation 1.6

Avec
TEAUGRAIN : Teneur en eau des organes récoltés (g d'eau.(g de matière fraîche)$^{-1}$)
H2OFRVERT : Teneur en eau des organes récoltés jusqu'au stade « début de déshydratation » (g d'eau.(g de matière fraîche)$^{-1}$)
DESHYBASE : Taux de variation quotidien de la teneur en eau des organes récoltés (g d'eau (g de matière fraîche)$^{-1}$.j^{-1})
TEMPDESHYD : coefficient de stress hydrique relatif à la température (g d'eau.(g de matière fraîche)$^{-1}$.°C^{-1})
TCULT : Température de surface moyenne journalière (°C)
TAIR : Température moyenne de l'air journalière (°C)

Pour les cultures indéterminées, la teneur en eau est calculée pour chaque classe d'âge.

La quantité d'azote contenue dans les organes récoltés (QNGRAIN) est calculée à partir de la teneur en azote dans la biomasse aérienne, en lui appliquant un indice de récolte étendu à l'azote, qui est propre à chaque plante (équations 1.7 et 1.8).

$$IRAZO = VITIRAZO \times (I - IDRP)$$
$$QNGRAIN = IRAZO \times QNPLANTE$$

Equations 1.7 et 1.8

Avec
IRAZO : Indice de récolte « azote » (g de N grain.(g de N plante)$^{-1}$)
VITIRAZO : taux d'accroissement de l'indice de récolte « azote » (g de N grain.(g de N plante)$^{-1}$.j^{-1})
I-IDRP : Nombre de jours écoulés depuis le stade IDRP
QNPLANTE : Quantité d'azote contenue dans la biomasse aérienne (kg de N.ha^{-1})

Les teneurs en eau et en azote des organes récoltés sont complétées par des estimations simples des teneurs en sucre et en huile. Jusqu'à la maturité physiologique, l'augmentation de la proportion de ces deux types de composés dans la matière sèche des fruits est supposée progressive. Cette évolution combinée à celle de la teneur en eau des organes récoltés permet d'obtenir des teneurs rapportées à la matière fraîche qui dépend du parcours de chaque culture. Pour les cultures indéterminées, le calcul est fait pour chaque classe d'âge séparément puis resynthétisé pour l'ensemble des classes d'âge.

La qualité des organes récoltés peut constituer un critère supplémentaire à la maturité physiologique pour déterminer la date de récolte des fruits dans le modèle. On peut ainsi récolter en fonction d'une teneur en eau minimale (pour les organes s'hydratant) ou maximale (pour les organes se déshydratant), ou bien une teneur minimale en azote, en sucre ou en huile, selon le type d'organes récoltés.

iv) La croissance racinaire

Les croissances des parties aériennes et des racines sont considérées comme indépendantes dans STICS. La croissance des racines est traduite en terme d'allongement (et non de biomasse), leur rôle est uniquement celui de capteurs d'eau et de nitrates, elles ne font pas l'objet d'allocation d'assimilats. Le profil racinaire efficace pour l'absorption est défini par la profondeur maximale atteinte par les racines et la densité racinaire, qui a toujours la même forme de distribution avec la profondeur. La vitesse de progression du front racinaire dépend de l'espèce, de la température du couvert et du statut hydrique du sol. Le front racinaire commence à la profondeur de semis et s'arrête lorsqu'il atteint un obstacle (un caillou ou la profondeur maximale du sol) ou lorsque la culture atteint le stade de croissance foliaire maximale (LAX, fin de la croissance végétative).Le front racinaire arrête également sa progression lorsque le sol est trop sec (teneur en eau inférieure au point de flétrissement permanent) ou trop humide (teneur en eau à saturation). Parallèlement, la densité de racines efficaces prend une forme sigmoïdale en fonction de la profondeur atteinte. Le profil calculé tient compte de 3 paramètres :

- ZLABOUR : profondeur sur laquelle la densité est considérée comme optimale (valeur retenue = 0,5 $cm.cm^{-3}$ de sol)
- ZPENTE : profondeur à laquelle la densité efficace est réduite de moitié
- ZLIM : profondeur maximale du profil racinaire dans un sol de profondeur illimitée

Ces deux derniers paramètres sont propres à chaque espèce. Les systèmes pivotants et fasciculés peuvent ainsi être représentés.

v) Le bilan hydrique

Au sein du système sol-plante-atmosphère, le calcul du bilan hydrique utilise les variables précipitations, irrigation et évapotranspiration potentielle. L'objectif de ce calcul est double : estimer la teneur en eau du sol (qui pilote par exemple la minéralisation de l'azote du sol) et de la plante, et estimer également les indices de stress hydrique (qui pilotent le fonctionnement de la plante).

- Au niveau du sol

Le calcul de l'évaporation du sol s'effectue en deux temps : tout d'abord calcul de l'évaporation potentielle, puis de l'évaporation réelle. Ensuite, l'évaporation du sol est répartie au sein du profil de sol.

L'évaporation potentielle du sol tient compte de la demande climatique (ETP) et la couverture végétale au dessus du sol (LAI) selon une loi de Beer (Brisson *et al.*, 1992).

L'évaporation réelle du sol est calculée en deux étapes. Suite à un apport d'eau, le sol est suffisamment humide pour évaporer au potentiel, c'est la première étape. Le passage à la deuxième étape s'opère lorsque le cumul d'évaporation journalière atteint le seuil Q_0 spécifique du type de sol, l'évaporation du sol est alors réduite. Ces calculs sont détaillés par Brisson et Perrier, 1991, et reposent sur des concepts décrits par Ritchie, 1972.

Le calcul de la distribution de l'évaporation journalière dans le profil est similaire au formalisme utilisé dans le modèle LIXIM (Mary *et al.*, 1999), et s'effectue par couche élémentaire de sol de 1 cm d'épaisseur. L'évaporation réelle affecte les couches élémentaires de sol, selon une décroissance exponentielle, jusqu'à une profondeur maximal. En dessous de cette profondeur, il n'y a aucune évaporation.

- Au niveau de la plante

Les besoins en eau de la plante (transpiration maximale) sont calculés par une approche de type coefficient cultural qui s'effectue en deux étapes. Dans un premier temps, on calcule ce que serait l'évaporation de la culture si l'ensemble des surfaces sol et plantes n'étaient pas

limitées en eau (EO). Cette évapotranspiration (équation 1.9) est une fonction de l'indice foliaire et fait intervenir le coefficient cultural maximal KMAX :

$$EO = TETP \times \left(1 + \frac{KMAX - 1}{1 + e^{(-1.5 \times LAI - 3)}} \right) \qquad \text{Equation 1.9}$$

Avec
EO : Variable intermédiaire pour le calcul de l'évapotranspiration ($mm.j^{-1}$)
TETP : Evapotranspiration de référence ($mm.j^{-1}$)
KMAX : coefficient cultural maximal de la culture (SD)
LAI : indice foliaire (m^2 feuilles.m^{-2} sol)

Dans un deuxième temps, la transpiration maximale est calculée à partir de l'énergie disponible au niveau des plantes, estimée par la différence EO-EOS, mais aussi de l'état de l'atmosphère dans la végétation. Pour tenir compte de l'augmentation de la demande en eau des plantes induite par la sécheresse du sol sous végétation, le calcul de la transpiration maximale de la culture (EOP) repose sur une relation empirique (Brisson *et al.*, 1992). Cette relation conduit à une augmentation de EOP de 40 % au maximum quand le sol est complètement sec (équation 1.10).

$$EOP = (EO - EOS) \times (1.4 - 0.4 \times \frac{ES}{EOS}) \qquad \text{Equation 1.10}$$

Avec
EOP : Transpiration maximale ($mm.j^{-1}$)
EO : Variable intermédiaire pour le calcul de l'évapotranspiration ($mm.j^{-1}$)
EOS : évaporation maximale su sol ($mm.j^{-1}$)
ES : évaporation réelle du sol ($mm.j^{-1}$)

Finalement, la transpiration réelle de la culture tient compte de la quantité d'eau physiquement disponible dans le sol et de la capacité de la culture à extraire cette eau compte tenu de ses caractéristiques racinaires. Ainsi, la transpiration relative, *i.e.* le rapport transpiration réelle sur transpiration maximale (EP/EOP), est une fonction bilinéaire (Figure 1.7) de la teneur en eau disponible dans la zone racinaire, ou réserve utile racinaire, appelée TETA. TETA vaut zéro pour un sol au point de flétrissement permanent et atteint sa valeur maximale pour un sol à l'humidité à la capacité au champ. Le seuil TETSTOMATE séparant la phase de transpiration maximale de la phase de transpiration réduite dépend de la densité

racinaire, du fonctionnement stomatique et de la demande climatique. Une formulation de ce seuil tenant compte de tous ces facteurs est proposée par Brisson (1998).

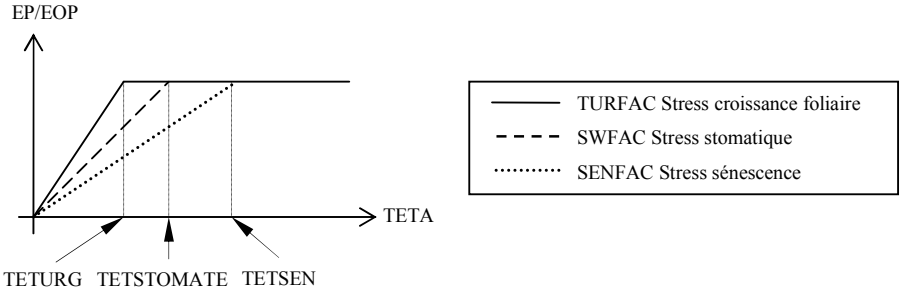


Figure 1.7 Relation entre la transpiration relative EP/EOP (indice de stress hydrique) et la réserve utile racinaire (TETA), d'après Brisson et al. (1998).

L'absorption d'eau est répartie dans la zone racinaire en fonction du profil racinaire efficace.

- Pour le calcul des stress hydriques

Lorsque la demande climatique est supérieure à l'offre en eau au niveau des racines, deux indices de stress sont générés et déduits des calculs précédents. En effet, SWFAC, indice de stress stomatique est égal au rapport EP/EOP, l'indice de stress TURFAC qui joue lui sur la croissance foliaire intervient plus tôt dans le développement. Son calcul est similaire à celui de SWFAC, le seuil TETURG, correspondant à TETSTOMATE, étant plus élevé. Ceci signifie que la croissance foliaire peut être freinée alors que la transpiration est encore à son niveau maximal. Enfin un indice de stress spécifique à la sénescence a été défini, faisant intervenir le seuil TETSEN proportionnel à TETURG. Voir Figure 1.7.

vi) Le bilan azoté

Le bilan d'azote s'effectue à partir de la dynamique de l'azote dans le sol (minéralisation, nitrification et transferts), de l'absorption de la plante (besoins et offre). L'azote minéral (sous forme de nitrates NO_3^- et d'ammoniac NH4+) disponible pour la plante provient de la fertilisation par les engrais synthétiques (voir paragraphe sur l'interface techniques culturales/culture/sol) et de la minéralisation de la matière organique. Celle-ci est représentée

par trois compartiments (ou pools), chacun étant caractérisé par son rapport C/N : l'humus du sol (compartiment le plus stable de la matière organique), la biomasse vivante du sol (micro-organismes) et les apports organiques au sol (résidus de cultures, effluents d'élevage ou coproduits des industries alimentaires par exemple).

- Au niveau du sol

Le sol est le siège de la minéralisation de la matière organique : la minéralisation nette d'azote du sol résulte de la somme de deux composantes (Figure 1.8) :

- **la minéralisation de l'humus**, qui résulte de la décomposition de la matière organique humifiée du sol est un processus permanent, ayant toujours une valeur positive.
- **la minéralisation des résidus** (ou apports) organiques qui résulte de la décomposition des résidus de cultures ou des amendements organiques, est un processus d'intensité variable, lié à la fréquence, la quantité et la qualité des apports. Généralement, suite à l'incorporation des résidus au sol, la minéralisation est d'abord négative (organisation de l'azote minéral du sol) puis positive (reminéralisation de l'azote microbien, provenant soit du résidu, soit du sol).

La minéralisation de l'humus se fait jusqu'à la profondeur PROFHUM qui est supérieure ou égale à la profondeur de labour. La vitesse de cette minéralisation dépend des propriétés du sol (équation 1.11). Les caractéristiques permanentes de ce dernier (teneur en argile et calcaire) fixent un potentiel de minéralisation (K2POT), alors que son état physique (température et humidité) le réduit.

$$VMINH = K2POT \times NHUM \times FH \times FTH \qquad \text{Equation 1.11}$$

Avec
VMINH : Vitesse de minéralisation (kg de $N.ha^{-1}.j^{-1}$)
K2POT : Potentiel de minéralisation, fonction de la texture et la teneur en calcaire su sol (j^{-1})
NHUM : Stock d'azote organique contenu sur la profondeur PROFHUM (kg de $N.ha^{-1}$)
FH : Facteur d'influence de l'humidité du sol sur la minéralisation
FTH : Facteur d'influence de la température du sol sur la minéralisation

STICS simule la décomposition des divers résidus et apports organiques sur l'action de la biomasse microbienne selon un modèle proposé par Nicolardot *et al.*, 2001. La minéralisation dépend de la vitesse de décomposition (flux de carbone représentés par les vitesses de

décomposition KBIO et BRES et les paramètres de rendement YRES et HRES) et des rapports C/N des résidus organiques (Wr), de la biomasse (Wb), et de l'humus formé (Wh) (voir les flux et compartiments représentés Figure 1.8). Ces paramètres sont soit constants, soit calculés en fonction du C/N du composé organique apporté. Le paramétrage obtenu est spécifique de chacune des huit catégories définies : résidus de cultures principales (végétaux mûrs), résidus de cultures intermédiaires (végétaux jeunes), fumiers, lisiers, compost, boues, vinasses, corne. L'évolution de chaque apport organique est simulée séparément.

La vitesse de décomposition des résidus dépend de la nature des résidus (C/N), de leur profondeur d'incorporation dans le sol (PROFTRAV), de la température et de l'humidité du sol.

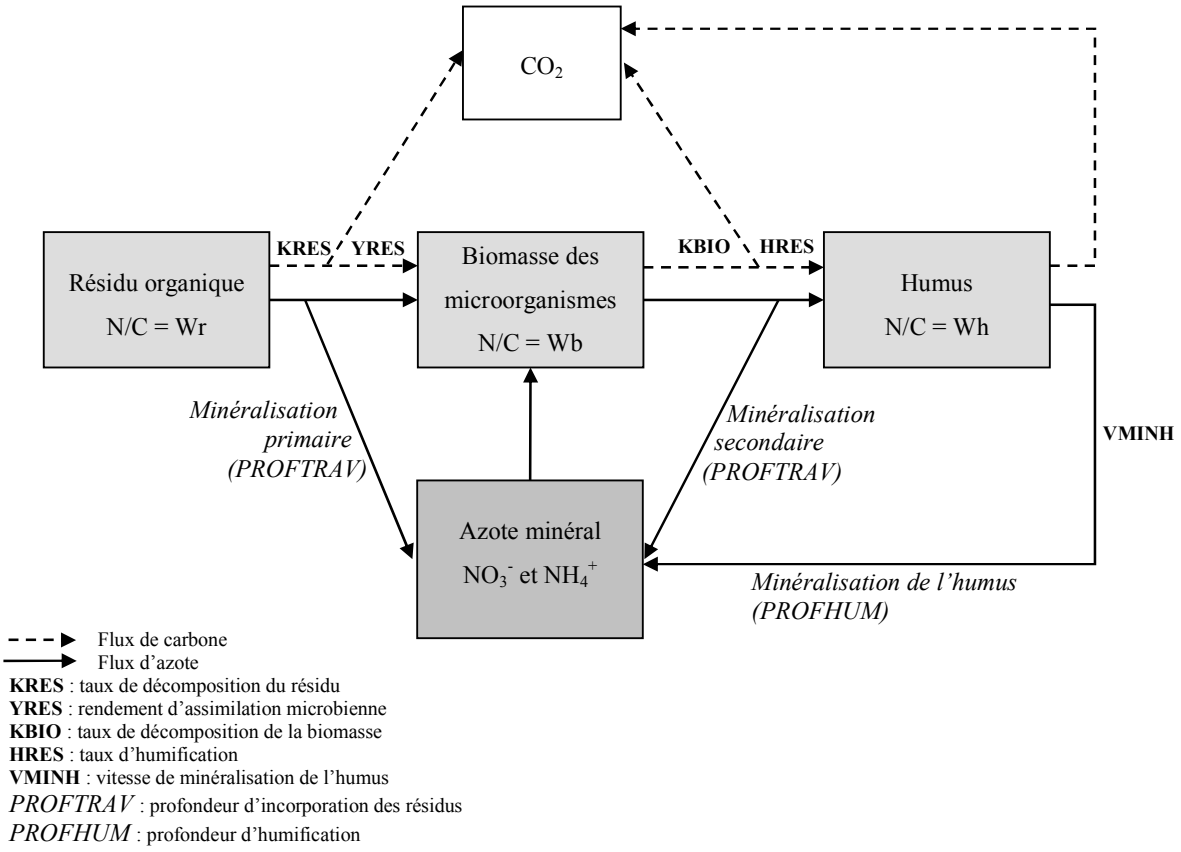


Figure 1.8 La minéralisation de l'azote dans STICS

L'ammonium formé par minéralisation et apporté par les engrais minéraux et organiques est partiellement transformé en nitrates selon le coefficient NITRIF qui varie entre 0 et 1. Il

traduit les effets du pH, de la température et de la teneur en eau sur la nitrification, ces trois facteurs sont eux-mêmes affectés d'un coefficient dont l'effet est multiplicatif et indépendant. Seule la forme nitrique de l'azote est affectée par le lessivage. Par contre, le pool minéral dans lequel puise la plante est composé d'azote nitrique et ammoniacal : il n'y a pas de sélectivité entre NO_3^- et NH_4^+ pour l'absorption.

- Au niveau de la plante

La modélisation de l'absorption d'azote par le système racinaire se fait chaque jour en comparant l'offre du sol et la demande de la culture : la vitesse d'absorption est égale au plus petit de ces deux termes.

Pendant la phase végétative (*i.e.* jusqu'au stade de début de remplissage des grains), la demande en azote de la culture est estimée à partir de la courbe de dilution « maximale », représentée par la courbe de dilution enveloppe supérieure des courbes de dilution de l'azote (*cf.* Figure 1.9). La demande journalière (dNa/dt) est le produit de la vitesse de croissance (dW/dt) par la dérivée de la courbe de dilution maximale (dNa/dW), Na étant la quantité d'azote absorbée cumulée (Na = W.N%).

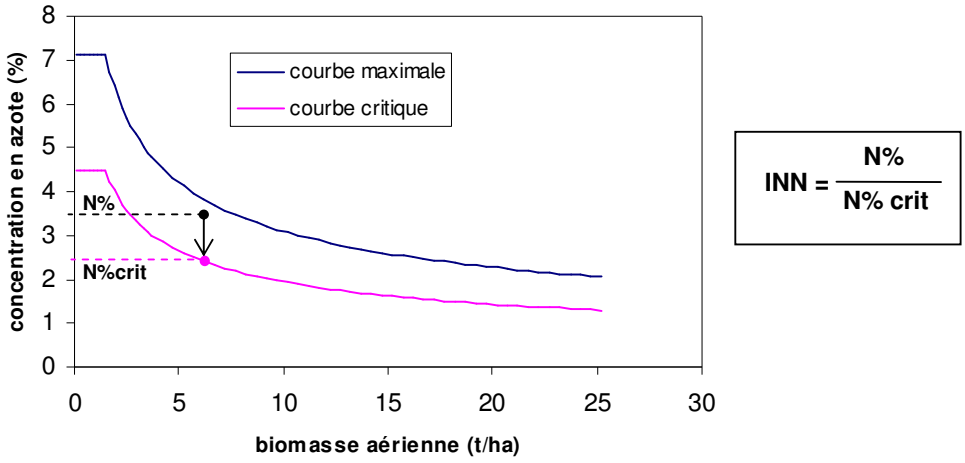


Figure 1.9 Principe de la courbe de dilution maximale et définition de l'INN (N% étant la teneur en azote en % de la biomasse aérienne de la plante).

Pendant la phase reproductive, **la demande** liée à la partie végétative de la plante continue d'obéir à la courbe de dilution maximale, alors que la demande liée aux organes de stockage dépend de l'état azoté de la culture (par l'intermédiaire de la variable ABSODRP) : la biomasse MASECABSO est utilisée pour calculer la demande en azote à partir de la courbe de dilution maximale (équation 1.12).

$$MASECABSO = MASECVEG + ABSODRP \times MAGRAIN \qquad \text{Equation 1.12}$$

Avec
MASECABSO : Biomasse prise en compte pour définir le statut azoté de la plante ($g.m^{-2}$)
MASECVEG : Biomasse de la partie végétative ($g.m^{-2}$)
ABSODRP : Variable intermédiaire pour la définition de la demande en azote des organes de stockage (SD)
MAGRAIN : Masse des organes de stockage ($g.m^{-2}$)

L'offre en eau du sol est calculée par couche élémentaire de 1 cm, jusqu'à la profondeur racinaire maximale (ZRAC), elle est déterminée par deux processus différents :

- **le transfert** du nitrate d'un point du sol vers la racine la plus proche, processus physique de convection et diffusion. Le flux de convection dans chaque couche élémentaire est égal au produit du flux d'eau de transpiration par la concentration nitrate de la couche. Ce flux est nul lorsque la transpiration l'est, suite à un fort stress hydrique ou à l'absence de racine dans la couche. Le flux de diffusion est le produit du flux de diffusion apparente du nitrate par le gradient de concentration en nitrate. Ce gradient est calculé en faisant l'hypothèse que les racines sont verticales, équidistantes, et que la concentration nitrique décroît linéairement jusqu'à la surface de la racine où elle s'annule. Ceci entraîne un flux de diffusion calculé maximal.
- **l'absorption active** du nitrate par la racine, processus physiologique actif de la plante. Ce flux dépend de la capacité intrinsèque d'absorption de la plante, de sa densité racinaire, et de la concentration en nitrate dans le sol. L'absorption spécifique *Vabs* par unité de longueur racinaire augmente avec la concentration en nitrate selon une double cinétique de Michaëlis-Menten (*cf.* équation 1.13). Celle-ci correspond à deux systèmes de transport actifs : l'un doté d'une forte affinité (caractérisé par les paramètres V_{MAX1} et K_{M1} faibles), l'autre doté d'une faible affinité (caractérisé par les paramètres V_{MAX2} et K_{M2} élevés). Ces paramètres sont spécifiques à chaque espèce.

$$Vabs = \frac{V_{MAX1} \cdot C_i}{K_{M1} + C_i} + \frac{V_{MAX2} \cdot C_i}{K_{M2} \cdot Ci} \qquad \text{Equation 1.13}$$

Avec
$Vabs$: Vitesse d'absorption spécifique (µmol.h^{-1}.cm^{-1} de racine)
V_{MAX1} : Vitesse maximale d'absorption pour le transport actif à forte affinité (µmol.h^{-1}.cm^{-1} de racine)
K_{M1} : Constante de Michaëlis pour le transport actif à forte affinité (SD)
V_{MAX2} : Vitesse maximale d'absorption pour le transport actif à faible affinité (µmol.h^{-1}.cm^{-1} de racine)
K_{M2} : Constante de Michaëlis pour le transport actif à faible affinité (SD)
C_i : Concentration initiale en nitrate dans le milieu extérieur (µmol.cm^{-3})

- Le transfert d'azote dans le sol

Le transfert de l'azote dans le sol est simulé par une approche de type réservoir, il ne concerne que l'azote nitrique, et se fait toujours dans la microporosité du sol. La macroporosité, les fentes, et les cailloux constituent des compartiments de circulation d'eau supplémentaires et optionnels. Les apports d'eau remplissent en cascade chaque couche de 1 cm de sol, qui constituent des réservoirs élémentaires limités par leur capacité au champ. Les caractéristiques permanentes des couches élémentaires sont déduites de celles des 5 horizons de sol (humidité minimale au point de flétrissement permanent, humidité à la capacité au champ, densité apparente). Il en est de même pour les conditions initiales de teneur en eau et en azote des couches élémentaires. S'il n'y a pas d'obstacle à l'écoulement, l'eau excédentaire par rapport à la capacité au champ est drainée. En surface (*i.e.* jusqu'à la profondeur ZESX définissant la zone affectée par l'évaporation), le sol peut se dessécher jusqu'à l'humidité résiduelle. En profondeur (en dessous de ZESX), l'eau n'est consommée que par la plante et l'humidité du sol reste donc toujours supérieure ou égale au point de flétrissement.

Les nitrates en solution dans l'eau suivent le même type de transfert. L'eau qui s'écoule d'une couche élémentaire vers la couche inférieure lui apporte une quantité de nitrates. La totalité de cet apport en nitrate se mélange avec le nitrate déjà présent dans la couche inférieure. L'excès d'eau repart avec la nouvelle concentration du mélange. Il peut exister une concentration plancher au-dessous de laquelle l'azote minéral ne peut plus être lessivé (il ne reste alors que de l'azote ammoniacal). Finalement, les quantités d'eau drainée et d'azote lessivé à la base du profil de sol sont définies.

vii) Interface techniques culturales/culture/sol

- L'irrigation

Les quantités d'eau apportées à la culture peuvent être définies à l'avance et lues ou bien calculées par le modèle. Dans le premier cas, les dates calendaires et doses sont déclarées dans le fichier « technique ». Dans le second, le modèle ajuste les apports aux besoins de la plante, à hauteur du paramètre RATIOL (option de « calcul automatique des irrigation »). Ce paramètre, dont la valeur est comprise entre 0 et 1, correspond au taux de satisfaction des besoins en eau de la plante défini par l'utilisateur. Dès que l'indice de stress hydrique stomatique SWFAC devient inférieur à RATIOL, le modèle déclenche une irrigation, de façon à remplir réserve en eau du sol jusqu'à sa capacité au champ, sans dépasser la dose maximale de l'apport journalier (DOSIMX) fixée par l'utilisateur. S'il n'a pas plu au moment du semis, une dose de 20 mm d'eau est apportée pour permettre la germination. L'irrigation peut être localisée sur ou sous frondaison, ou bien encore dans le sol.

- Les apports d'azote

L'azote minéral peut être apporté aux cultures de plusieurs manières : les engrais synthétiques, les apports organiques (qui contiennent une partie d'azote minéral), la pluie et l'eau d'irrigation. Nous nous intéresserons aux deux premiers types d'apports que nous avons utilisés.

Les **engrais minéraux** peuvent être apporté au sol ou en profondeur. Un seul type d'engrais azoté peut être apporté au cours d'une campagne culturale. Huit types d'engrais sont prédéfinis dans STICS (Tableau 1.3). Ils sont caractérisés par quatre paramètres : *engamm*, qui représente la proportion d'azote ammonium dans l'engrais, *orgeng*, *deneng* et *voleng* qui définissent respectivement les pertes maximales de l'engrais par organisation, dénitrification et volatilisation.

Le calcul de l'efficience de l'engrais permet de définir la quantité d'azote effectivement disponible dans le sol suite à un apport d'engrais : on distingue les pertes gazeuses (par dénitrification et volatilisation) et les pertes par organisation (c'est-à-dire utilisation par les

microorganismes du sol pour leur métabolisme). Les pertes d'azote varient en fonction du type de sol et de la vitesse d'absorption de la culture : elles sont soumises à la compétition entre la plante et le sol. Des études avec des engrais marqués ^{15}N ont montré que l'organisation microbienne de l'azote dépend du type de l'engrais et de la dose de l'apport : une relation hyperbolique a été établie entre la quantité organisée et la quantité apportée. Ces études et les travaux de Limaux *et al.*, 1999, ont montré que l'efficience de l'engrais est d'autant plus forte que la vitesse de croissance de la plante l'est aussi. Cela suggère que les pertes gazeuses sont d'autant plus fortes que la demande en azote du peuplement est faible. La part d'engrais volatilisé ou dénitrifié est donc supposée diminuer avec la vitesse d'absorption d'azote qu'a la culture juste avant l'apport. La volatilisation dépend également du pH, selon une fonction linéaire.

Type d'engrais	**engamm** proportion d'ammonium	**orgeng** perte d'azote par organisation (kg $N.ha^{-1}$)	**deneng** perte par dénitrification (part de l'apport)	**voleng** perte par volatilisation (part de l'apport)	**efficience** calculée : 1 – deneng - voleng
Nitrate d'ammonium	0.50	46	0.15	0.15	0.7
Solution azotée	0.75	42	0.13	0.30	0.57
Urée	1.00	38	0.10	0.35	0.55
Ammoniac anhydre	1.00	38	0.10	0.35	0.55
Sulfate d'ammonium	1.00	38	0.10	0.25	0.65
Phosphate d'ammonium	1.00	38	0.10	0.25	0.65
Nitrate de calcium	0.00	25	0.20	0.00	0.8
Efficience fixe*	∅	0.2	0.05	0.05	valeur fixée

Tableau 1.3 Les types d'engrais dans STICS et leurs paramètres

(* l'efficience fixe correspond à la manière dont étaient simulées les pertes en azote dans les versions antérieures de STICS : elles étaient fixées, alors qu'elles sont maintenant calculées)

Comme pour l'irrigation, les apports azotés peuvent être fixés par l'utilisateur ou calculés par le modèle. Dans le premier cas, le calendrier (dates, doses et type d'engrais) sont stipulés dans le fichier technique. Dans le second cas, le modèle déclenche automatiquement un apport d'azote lorsque l'INN (indice de stress azoté) devient inférieur au seuil RATIOLN, paramètre défini par l'utilisateur, correspondant au niveau de satisfaction des besoins en azote de la plante. De plus, deux conditions supplémentaires doivent être réalisée pour déclencher l'apport. Tout d'abord, l'absorption d'azote doit être limitante (l'offre d'azote doit être inférieure à la demande) car l'azote apporté doit pouvoir être absorbé par la plante. En effet,

l'INN traduisant l'état azoté de la plante, il ne tient pas compte de l'absorption racinaire qui peut être maximale (et ne pas pouvoir augmenter) malgré un déficit d'azote. Toujours pour permettre l'absorption de l'azote apporté, la deuxième condition au déclenchement de l'apport d'azote est un sol suffisamment humide. La dose apportée est calculée par la différence entre la quantité maximale de l'azote dans la plante (définie par la courbe de dilution maximale *cf.* Figure 1.9) et la quantité réelle d'azote pondérée par l'efficacité de l'engrais.

Les **apports organiques** concernent les résidus de culture (culture principale ou intermédiaire), les fumiers, lisiers, composts et autres, et sont définies par huit catégories (*cf.* vi) Le bilan azoté au niveau du sol). La fraction minérale de l'azote de ces apports est soumise à la volatilisation, à la nitrification, au lessivage et à l'absorption par la plante. La seconde fraction se décompose et se minéralise (*cf.* vi) Le bilan azoté au niveau du sol). La minéralisation nette de chaque apport organique est liée à la catégorie de produit et de son rapport C/N. Il est nécessaire de renseigner les caractéristiques de l'apport : la catégorie générale, la profondeur d'incorporation, la quantité de matière fraîche apportée, la teneur en carbone, le rapport C/N, la teneur en eau, et la teneur en azote minéral Lors de l'enchaînement de deux cultures, les résidus du précédent cultural qui sont restitués au sol sont pris en compte par le modèle, qui simule automatiquement leur évolution sur et dans le sol.

STICS est modèle de culture dynamique qui fournit également les bilans hydrique et azoté des cycles culturaux, ainsi que les variables d'intérêt agronomique tel le rendement. Pour produire des résultats fiables, le modèle nécessite un grand nombre de paramètres en entrée, concernant en particulier le sol, le climat et l'itinéraire technique de l'entité homogène à simuler. Dans notre cas, ce sera la culture correspondant à chaque activité végétale de chaque ferme type de AROPAj. Pour cette dernière nous devrons donc définir les entrées correspondantes pour le modèle STICS.

1.1.3. Conclusion

Les deux modèles mis en jeu dans cette thèse, AROPAj d'un côté et STICS de l'autre sont de nature très différente. Le modèle économique, comme nous l'avons vu au paragraphe 1.1.1 est un modèle statique, fonctionnant sur une année comptable, à l'échelle de fermes statistiques,

virtuelles et sans localisation précise à l'intérieur d'une région. Il cherche à simuler le comportement des producteurs agricoles en utilisant la programmation mathématique, et en intégrant, outre des données comptables, des informations techniques complémentaires. Le modèle agronomique (*cf.* paragraphe précédent) est de nature dynamique au pas de temps journalier et produit également une synthèse du cycle cultural. Il cherche à simuler le développement et la croissance du couvert végétal dans son environnement physique et technique. Les modèles imposent des contraintes par leur nature même : échelles très différentes, besoin de localisation et de nombreux paramètres pour STICS, hypothèses générales de l'économie pour AROPAj (maximisation du profit). Afin de rapprocher ces deux outils il est nécessaire de prendre en compte leurs spécificités pour pouvoir établir la réponse des rendements des cultures aux intrants azotés qui permettra de faire le lien entre ces modèles. En se servant des données utilisées et issues de chacun des modèles pour permettre « d'alimenter » l'autre, toutes les informations pourront être exploitées. Nous pourrons ainsi palier le manque de dynamique d'AROPAj et l'absence de localisation des fermes-types, renseigner les entrées du modèle STICS pour ces fermes types tout en prenant en compte des informations économiques. Les courbes de réponse à l'azote des cultures qui nous permettront de relier les deux modèles apparaissent beaucoup dans la littérature mais ne sont pas toujours abordées de manière similaire selon l'objectif de leur utilisation et leur domaine d'application (évaluation économique, aide à la décision agronomique par exemple).

1.2. Les courbes de réponse à l'azote

En économie, la notion de fonction de réponse du rendement à l'azote d'une culture renvoie à la notion de fonction de production. En effet, l'azote est considéré comme un facteur de production, *i.e.* il fait partie des « entités, personnes physiques ou objets économiques, dont les services sont utilisés lors des opérations de production » (Varian, 2003). Dans le cas d'une production agricole, les facteurs de production peuvent être l'azote, l'eau, le travail de l'agriculteur, etc. … L'ensemble de toutes les combinaisons d'intrants (ou facteurs de production) et de produits correspondant à un processus de production techniquement réalisable est appelé un ensemble de production (*cf.* schéma Ensemble et fonction de production (d'après Varian, 2003). Figure 1.10). Les intrants représentant un coût pour l'exploitation agricole, on ne considère que le produit maximum correspondant à chaque niveau d'intrant donné : cette frontière est représentée par une fonction appelée de production

(*cf.* schéma Figure 1.10). Elle mesure la quantité de produit maximum qu'il est possible d'obtenir à partir de quantités fixées d'intrants. Les fonctions de production en agriculture ne sont pas un concept nouveau et nous allons en faire un rapide historique et discuter de cette notion, avant de justifier du choix de la forme fonctionnelle que nous avons retenue pour notre travail.

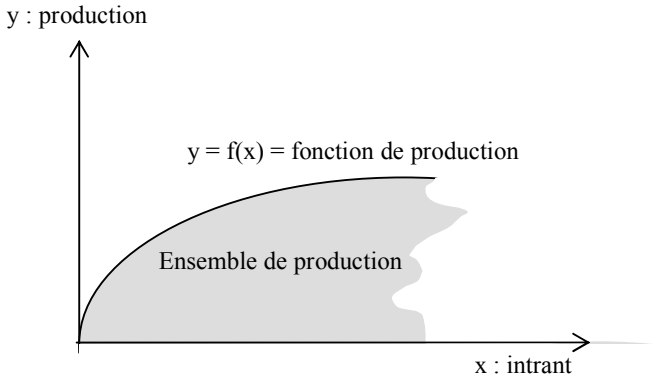


Figure 1.10 Ensemble et fonction de production (d'après Varian, 2003).

1.2.1. Les fonctions de production en agriculture

1.2.1.a. Historique et loi d'action des éléments fertilisants en agronomie

L'étude de la relation entre l'apport d'une quantité d'engrais, ou d'élément fertilisant, et le rendement de la culture remonte au milieu du XIXème siècle, et se base sur les observations de deux chimistes allemands, Von Liebig et Mitscherlich. Ils ont énoncé des « lois » de la fertilisation qui prévalent encore dans leurs principes. La « Loi du minimum », énoncée par Liebig, (1803-1873), exprime « la possibilité de voir les rendements des cultures limités par l'insuffisance ou l'absence d'un élément nécessaire à la végétation » (von Liebig, 1855). D'une manière plus souple, il faut admettre que l'action d'un élément fertilisant sera d'autant meilleure que les autres seront absorbés en quantité suffisante et que différents facteurs de croissance (climatiques, génétiques et culturaux) seront plus près de leur optimum. La loi de

Mitscherlich (Mitscherlich, 1909), peut se traduire ainsi : "Quand on apporte des doses croissantes d'éléments fertilisants, les augmentations de rendement sont de plus en plus faibles au fur et à mesure que les doses s'élèvent.". Cette loi est aussi appelée « loi des rendements moins que proportionnels » (voir Figure 1.11). Ces deux hypothèses ne suggèrent cependant pas directement de forme algébrique de la fonction de production correspondante (Heady et Dillon, 1961, Paris, 1992), nous discuterons de cette forme dans le paragraphe 1.2.2. Plusieurs méthodes peuvent être utilisées pour construire des fonctions de production. En économie agricole en particulier, les statistiques, mais aussi les informations provenant de modèles techniques peuvent être utilisées. Nous discutons de ces méthodes dans les paragraphes suivants.

1.2.1.b. Les fonctions de productions de l'ingénieur en agriculture

i) Intérêt des fonctions de production de l'ingénieur

L'agriculture est un des domaines où les économistes utilisent depuis longtemps des «fonctions de production de l'ingénieur », selon une méthodologie décrite de manière générale par Chenery (1949). Une fonction de production de l'ingénieur est une fonction de production dont la forme est déterminée empiriquement, c'est-à-dire déterminée à partir de données intégrant des paramètres techniques et technologiques et non pas basée uniquement sur l'analyse statistique de séries de données économiques. En intégrant la part technologique liée à la production, ces fonctions de production de l'ingénieur peuvent plus facilement prendre en compte les interactions et la substituabilité des facteurs de production entre eux (Chenery, 1949).

En cherchant à décrire le processus de production, l'économiste et l'ingénieur agronome s'intéressent tous deux aux variables de quantité, qualité, et de prix des intrants possibles pouvant permettre la production d'une quantité donnée de produit. L'ingénieur est d'abord intéressé par la sélection des intrants les plus influents, puis par leur quantité, les prix sont traités comme des paramètres extérieurs qui sont considérés constants, ou prenant quelques valeurs au cours de l'analyse. La difficulté pour l'ingénieur agronome est la nécessité de prendre en compte le milieu dans lequel le processus s'effectue, entité difficile à décomposer

en fonction de paramètres auxquels on peut attribuer un prix. D'un autre côté, l'économiste s'intéresse aux effets des variations de prix sur les combinaisons des facteurs de production. Il traite donc chaque variation quantitative comme une entrée à part entière, de telle sorte que chacune ait un prix individuel propre, qui peut être difficile à obtenir. L'ingénieur est intéressé par la description du processus de production : par exemple, l'élaboration du rendement d'une culture et ses différentes étapes clés. Comme l'ingénieur s'intéresse au processus lui-même, il le décrit en termes de propriétés des entrées qui vont l'influencer. Les prix interviennent seulement à la fin de son analyse. L'ingénieur ne considère donc pas une large gamme de prix possibles mais considère plutôt, à la fin, ceux qui minimisent le coût total du processus.

Pour que la fonction de production de l'ingénieur soit facile à construire, il est nécessaire que les sciences sous-jacentes soient suffisamment développées, et que les éléments techniques des principaux processus soient déterminants pour le coût de production. Le but de la méthode proposée par Chenery et reprise depuis par plusieurs études (Donaldson *et al.*, 1995, Vold, 1998) est de réduire les calculs effectifs des ingénieurs en une forme utilisable par l'économiste tout en retenant un maximum d'informations. L'analyse de l'ingénieur suggère les variables à utiliser et souvent la forme de l'équation à ajuster et la détermination statistique de la fonction de coût est simplifiée. L'idée est de « résumer » des processus de production complexes en une description analytique simple (*cf.* paragraphe 1.2.2), de telle sorte que les fonctions de production qui en découlent peuvent être appliquées à une très large gamme de situations. Ceci permet également de se limiter au(x) facteur(s) les plus influent(s) (dans notre cas, l'azote), tout en considérant les effets conjoints des autres facteurs (milieu : sol, climat, et autres paramètres techniques : irrigation entre autres) (Marsden et Pingry, 1986). Les fonctions de production de l'ingénieur sont complémentaires des méthodes statistiques. Cependant, la courbe de coût dérivée d'un tel type de fonction de production présente pour principal avantage de ne nécessiter que la définition des paramètres propres à chaque cas, alors que dans le cas d'une analyse statistique classique de la fonction de production, il est nécessaire de déterminer la forme de la fonction, les variables pertinentes, et les paramètres (Chenery, 1949, Marsden et Pingry, 1986). Ces derniers soulignent également l'apport des fonctions de production de l'ingénieur en tant qu'informations pertinentes pour tester des hypothèses économiques : elles permettent de les « révéler » grâce aux formulations détaillées de l'ingénieur, alors qu'elles restent cachées dans l'estimation statistique habituelle. Si l'utilisation de la fonction de production de l'ingénieur se doit d'être adaptée au problème

traité (Wibe, 1984), elle se révèle intéressante pour notre cas, où ni l'isolement des facteurs de production ni leur interaction n'est triviale. Afin de construire les courbes de réponse des rendements des cultures à l'azote, nous ajustons donc une forme fonctionnelle générique (dont le choix est explicité au paragraphe 1.2.2) sur des données qui sont issues d'un modèle de culture. Nous pouvons ainsi intégrer les différents facteurs qui influence la production végétale tout en nous focalisant sur les apports azotés. Nous utilisons ainsi des « pseudo-données », qui constituent une alternative aux enregistrements d'expérimentations au champ dans le cas de l'agronomie.

ii) Utiliser des « pseudo-données »

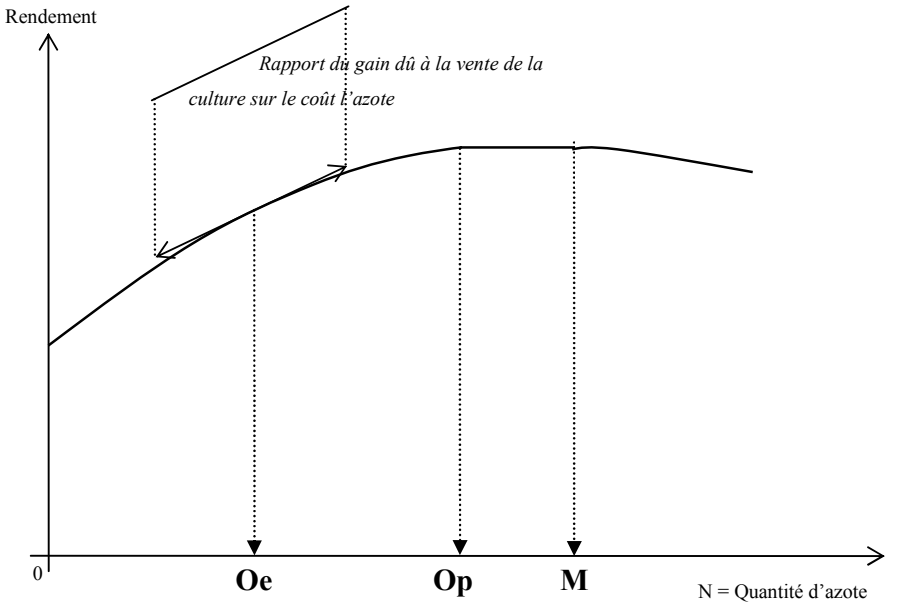
Les pseudo-données sont issues de modèles et servent ensuite à définir les fonctions de production : ce sont pour nous les points (azote, rendement) issus de simulations STICS. Si, selon Wibe, l'analyse statistique ordinaire de données observées permet seule la compréhension globale du processus de production (Wibe, 1986), cette approche nous était impossible compte tenu de l'étendue et de la résolution géographiques à traiter et du manque total d'observations aussi importantes concernant la fertilisation azotée. Pour Smith, les fonctions ajustées sur des pseudo-données permettent de prendre en compte les interactions complexes intégrées dans les modèles dont elles sont issues (Smith, 1986). Selon cet auteur, elles permettent également de « répondre à des questions économiques », même si dans ce cas, l'analyse détaillée est nécessaire, pour l'agronome comme pour l'économiste, ce qui appelle des modèles sous-jacents à la structure détaillée elle aussi.

Si les fonctions de réponse à l'azote ont une forme fonctionnelle générique pour l'ensemble des situations auxquelles elles s'appliquent (pour nous, les différentes cultures de différentes fermes-types européennes), plusieurs de ces fonctions sont possibles.

1.2.2. Justification du choix de la forme fonctionnelle

Le choix de la forme fonctionnelle de la courbe de réponse à l'azote est envisagé à la fois du point de vue de l'agronome, et du point de vue de l'économiste.

La forme de la courbe de réponse à l'azote, en conditions non limitantes par ailleurs, attendue par l'agronome, répond à plusieurs critères qui permettent de rapprocher cette courbe de différents modes de consommation des nutriments azotés par la plante et de l'interpréter (Gate, 1995, Encyclopédie des Techniques agricoles, 1999) : *cf*. Figure 1.11. Tout d'abord, le rendement obtenu pour un apport nul est positif (la fourniture du sol et les arrières effets des fertilisations antérieures sont les sources d'azote pour la plante). Les rendements étant « moins que proportionnels » (Encyclopédie des Techniques agricoles, Collectif, 1999), la courbe se doit d'être croissante, mais avec une dérivée décroissante, jusqu'à atteindre une dose optimale (optimum physique : point Op *cf.* Figure 1.11). Cette diminution de l'efficacité de l'azote apporté à la culture qui peut être interprétée comme une conséquence directe de la loi de Beer d'interception du rayonnement par le couvert végétal (Sylvester-Bradley *et al.*, 1990a, Sylvester-Bradley *et al.*, 1990b). Au-delà de cette dose Op, le rendement plafonne puis diminue pour des doses d'azote encore supérieures.



Oe : optimum économique, dose au delà de laquelle le gain marginal lié au supplément de récolte ne compense plus a dépense due à l'application d'azote supplémentaire

Op : optimum physique correspondant à la dose d'engrais la plus faible permettant d'avoir le rendement le plus élevé (si conjointement la qualité de la récolte n'est pas améliorée, il y a « consommation de luxe »)

M : Dose qui permet d'obtenir le rendement maximal (égal à celui obtenu avec Op), au delà, le rendement décroît, ceci peut être dû à une toxicité de l'élément fertilisant, mais plus souvent à des effets indirects (par exemple verse, antagonisme avec d'autres éléments, …)

Figure 1.11 Courbe de réponse du rendement à l'azote attendue par l'agronome (d'après l'Encyclopédie des techniques agricoles, 1999)

La théorie économique suppose elle une fonction de production standard avec plusieurs propriétés : elle est positive, croissante et concave (ce qui correspond à une hypothèse de rendements décroissants, c'est-à-dire que les rendements augmentent moins rapidement que l'apport d'azote). Les attentes des deux disciplines agronomie et économie sont concordantes pour presque toutes les caractéristiques de la courbe de réponse.

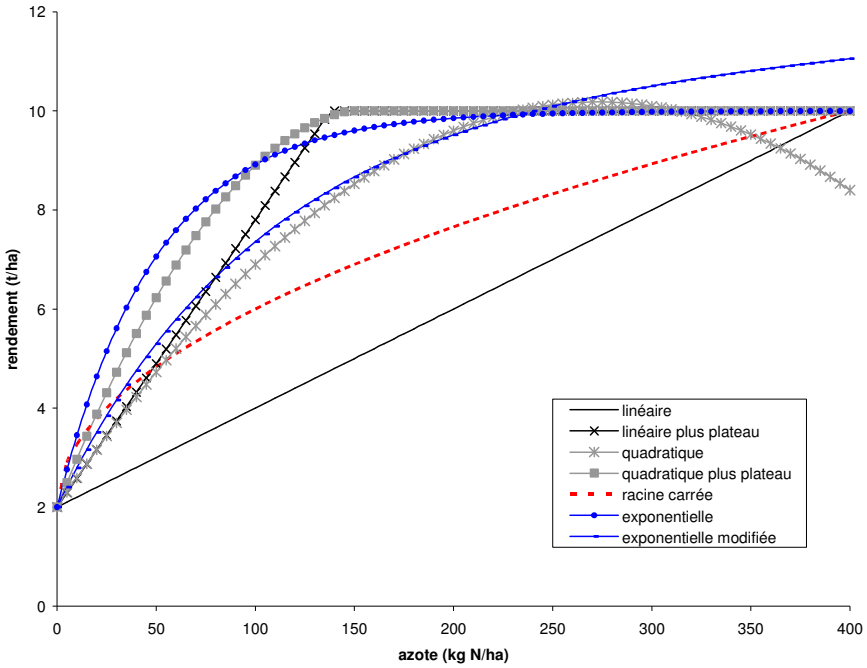


Figure 1.12 Les formes fonctionnelles de courbe de réponse les plus courantes.

(cf. description des courbes Tableau 1.4)

Plusieurs formes fonctionnelles sont proposées dans la littérature et ont été discutées en fonction des objectifs de l'étude dans le cadre de laquelle elles ont été utilisées, sans véritable consensus (Makowski *et al.*, 1999). Les différentes formes fonctionnelles le plus souvent utilisées sont représentées Figure 1.12, et leurs principales caractéristiques Tableau 1.4. Une forme basée sur la physiologie représentée par une cinétique michaëlienne peut aussi être utilisée, à défaut de données expérimentales ou de modèle écophysiologique ou de culture (Vold, 1998).

Dénomination (Figure 1.12)	Expression générique	Avantages	Inconvénients
Linéaire	$r = a_1 N + A$	• Simple à mettre en œuvre • Paramètres facilement estimables	• Pas de maximum fini • Ajustement seulement sur la première partie des données expérimentales ou issues des modèles
Linéaire plus plateau	$r = \min(B, a_1 N + A)$	• Simple à mettre en œuvre • Paramètres facilement estimables • Le plateau prend en compte le facteur limitant de production et la non substituabilité des facteurs entre eux	• Surestimation des rendements autour de l'optimum économique (car discontinuité abrupte de la courbe au voisinage de l'optimum), ce qui entraîne une sous-estimation du niveau de fertilisation optimal • Discontinuité en désaccord avec les attentes agronomiques
Quadratique	$r = a_2 N + a_3 N^2 + A$	• Simple à mettre en œuvre • Paramètres facilement estimables • Prend en compte la décroissance attendue par les agronomes après le maximum	• Courbe symétrique autour du maximum, tendance à surestimer l'optimum économique si le maximum pris pour optimum • Difficulté d'interprétation agronomique des paramètres
Quadratique plus plateau	Si $r < r^{-1}(B)$ $r = a_2 N + a_3 N^2 + A$ Sinon $r = B$	• Le plateau prend en compte le facteur limitant de production et la non substituabilité des facteurs entre eux	• Résout en partie la question de surestimation de l'optimum qui existe avec la forme quadratique • Difficulté d'interprétation agronomique des paramètres
Racine carrée	$r = a_4 N^{1/2} + A$	• Simple à mettre en œuvre • Paramètres facilement estimables	• Tendance à surestimer le rendement maximum • Difficulté d'interprétation agronomique des paramètres
Exponentielle	$r = B - (B - A) \cdot e^{-a_5 N}$	• Compromis entre le plateau vrai et la continuité de la fonction • Représentation de la non substituabilité des facteurs de production	• Rendement maximum jamais atteint
Exponentielle modifiée	$r = B - (B - A) \cdot e^{-a_5 N} + a_6 N$	• Compromis entre le plateau vrai et la continuité de la fonction • Représentation de la non substituabilité des facteurs de production	• Rendement maximum jamais atteint

Avec r = rendement de la culture, N = quantité d'azote apportée, A = rendement pour $N = 0$, B = rendement maximal et $a_1 \ldots a_n$ = autres paramètres.(d'après références du Tableau 1.5, Heady et Dillon, 1961)

Tableau 1.4 Caractéristiques des formes de courbes de réponse les plus courantes

La plupart du temps, les fonctions sont choisies selon leur capacité à s'ajuster sur des données expérimentales. Suite aux expérimentations historiques faites sur le maïs par Heady et Pesek dans les années 1950 aux Etats-Unis (Heady et Pesek, 1954, Heady *et al.*, 1955), les formes « linéaire plus plateau » et « quadratique plus plateau » ont souvent été utilisées pour déterminer les optima dans des analyses économiques (Tableau 1.5 Cerrato et Blackmer, 1990, Bullock et Bullock, 1994, Vanotti et Bundy, 1994, Belanger *et al.*, 2000). Les formes polynomiales (même avec plateau) ont été beaucoup critiquées, surtout parce qu'elles ne permettent pas de prendre en compte la notion de facteur limitant et de non substituabilité entre les facteurs énoncée par Liebig (Lanzer et Paris, 1981, Ackello-Ogutu *et al.*, 1985). Nous cherchons non seulement à avoir un ajustement correct sur les données issues du modèle STICS, mais aussi, à déterminer un optimum économique (cf. Figure 1.11). Cet optimum ne servira pas de base à l'établissement de recommandations de pratiques de fertilisation, ou d'aide à la décision pour la fertilisation auprès des agriculteurs (contrairement aux recherches faites par Neeteson et Wadman, 1987 et Oger, 1994). Il sera déterminé au cours de l'optimisation du modèle AROPAj et doit répondre aux hypothèses de la théorie économique sous-jacente tout en étant le plus en accord avec l'agronomie. En nous basant sur les résultats des travaux les plus récents, et l'analyse de la littérature résumée dans le Tableau 1.5, nous avons donc opté pour la forme exponentielle, qui nous permet de répondre le mieux possible aux critères agronomiques et économiques que nous nous sommes fixés. Nous avons explicité cette forme ainsi :

$$r = B - (B - A) \cdot e^{-tN}$$

Avec
r : rendement de la culture
A : rendement minimum de la culture
B : rendement maximum de la culture
t : taux « d'accroissement »
N : quantité totale d'azote issue de l'engrais de synthèse apportée à la culture

Référence	Cultures testées	Objectifs recherchés	Courbes testées	Lieu/conditions expérimentales	Conclusions sur les courbes de réponse à l'azote
Ackello-Ogutu *et al.*, 1985	Maïs (de la succession Maïs/Soja/Blé/foin)	Etablir un test robuste pour comparer 2 formes fonctionnelles et baser des recommandations de fertilisation correctes	Quadratique Exponentielle Racine carrée	USA, Indiana, Purdue University données expérimentales (série 30 ans)	La forme polynomiale (carré) n'est pas adaptée pour prendre en compte la non substituabilité des facteurs, son « plateau » étant même moins adapté que celui de la racine carrée. La forme exponentielle est mieux adaptée à représenter une fonction de production en accord avec l'agronomie
Belanger *et al.*, 2000	Pomme de terre	Optimum économique pour recommandations fertilisation	Quadratique Exponentielle Racine carrée	Canada New Brunswick Données expérimentales	La forme quadratique est la plus appropriée pour décrire les données et prévoir un optimum économique pour la pomme de terre au Canada
Boyd *et al.*, 1976	Céréales	Représentation des données et optimum économique	Linéaire plus plateau Quadratique Cubique « Polynôme inverse »[27] Exponentielle Exponentielle modifiée	Royaume-Uni	La forme linéaire plus plateau est bien adaptée pour représenter les données expérimentales, ce qui n'est pas le cas des autres formes.
Bullock et Bullock, 1994	Maïs grain	Recommandations fertilisation Optimum économique	Quadratique Quadratique plus plateau	USA Illinois Données expérimentales	La forme quadratique plus plateau est meilleure que la forme quadratique pour les recommandations de fertilisation Importance de la localisation pour la recommandation de fertilisation
Cerrato et Blackmer, 1990	Maïs	Recommandations fertilisation Optimum économique	Linéaire plus plateau Quadratique Quadratique plus plateau Exponentielle Racine carrée	USA Iowa Données expérimentales	Toutes les courbes donnent le même rendement maximal La forme quadratique plus plateau s'ajuste le mieux aux données expérimentales et est utilisée pour déterminer l'optimum économique. Les valeurs de la quantité d'azote optimale économiquement sont croissantes dans l'ordre pour les formes quadratique plus plateau, quadratique et exponentielle
Frank *et al.*, 1990	Maïs	Optimum économique fonction de production	Quadratique Exponentielle	USA, Iowa, jeu de données « historiques » de Heady et Pesek, 1954	La forme exponentielle est bien adaptée pour représenter le jeu de données de Heady et Pesek, et pour prendre en compte la non substituabilité des facteurs. L'écart entre l'optimum économique estimé et l'optimum réel est le plus faible lorsque la forme exponentielle est utilisée, sans être la plus adaptée au jeu de données. Cet écart est toujours pour les autres formes de l'étude utilisées à mauvais escient.
Herlihy, 1992	Betterave à sucre	Etude des effets de la fertilisation sur le rendement et la qualité de la betterave	Linéaire Quadratique Racine carrée	Irlande	Surestimation de l'optimum économique avec la fonction quadratique, meilleur ajustement aux données et meilleure détermination de l'optimum pour la forme racine carrée.
Isfan *et al.*, 1995	Maïs ensilage	Recommandations fertilisation Optimum économique	Linéaire plus plateau Quadratique Quadratique plus plateau	Canada, Québec	Surestimation du rendement maximum et de l'optimum économique avec la fonction quadratique
Llewelyn et Featherstone, 1997	Maïs	Optimum de fertilisation technique et économique	Linéaire plus plateau Quadratique Exponentielle	USA, Kansas ouest Simulations du modèle CERES	Le modèle exponentiel s'ajuste le mieux aux données Utiliser la forme exponentielle alors qu'elle n'est pas la plus adaptée au jeu de données engendre des coûts moindres que si l'on considère les

[27] On entend par polynôme inverse, une fonction de la forme $\frac{x}{y} = P(x)$ où *P(x)* est un polynôme de x.

			Exponentielle modifiée Racine carrée		autres formes de l'étude à mauvais escient.
Neeteson et Wadman, 1987	Pomme de terre Betterave à sucre	Recommandations de fertilisations économiquement optimales	Quadratique Exponentielle modifiée	Pays-Bas Données expérimentales	La forme exponentielle modifiée est le plus souvent utilisée pour déterminer l'optimum, car elle s'ajuste le plus souvent le mieux aux données expérimentales
Oger, 1994	Céréales	Recommandations fertilisation, et fractionnement de l'apport azoté, prenant en compte un optimum économique	Quadratique Exponentielle modifiée (2 formes) Racine carrée	Belgique Données expérimentales	Supériorité des modèles exponentiels modifiés pour représenter les données expérimentales Recherche d'un optimum satisfaisant pour le rendement mais très variable pour la quantité d'azote correspondante
Paris, 1992	Maïs	Trouver la meilleure forme traduisant l'hypothèse de Von Liebig (*cf.* paragraphe 1.2.1.a)	Linéaire plus plateau Quadratique Exponentielle Racine carrée	USA, Iowa, jeu de données « historiques » de Heady et Pesek, 1954	Contrairement aux affirmations données de Heady et Pesek, l'hypothèse de von Liebig n'implique pas la linéarité. La forme exponentielle a montré sa capacité à mieux représenter les données de Heady et Pesek (avec un minimum puisqu'il s'agit de l'action de 2 facteurs : N et P)
Schroder *et al.*, 1998	Maïs ensilage	Accumulation de matière sèche et optimum économique de fertilisation pour la production et l'environnement	Quadratique Quadratique plus plateau Exponentielle	Pays-Bas	Les valeurs de la quantité d'azote optimale économiquement sont croissantes dans l'ordre pour les formes quadratique plus plateau, exponentielle et quadratique. Fortes variabilités des quantités d'azote correspondant à l'optimum économique pour les différentes formes.
Sparrow, 1979	Orge de printemps	Représentation de données expérimentales et aide à la détermination de l'optimum économique	Linéaire Quadratique Cubique « Polynôme inverse »[27] Linéaire plus plateau Exponentielle modifiée Fraction rationnelle	Angleterre et Pays de Galle Données expérimentales	Selon le critère moindre erreur moyenne au carré, aucun des modèles ne représente mieux les données sur plusieurs sites expérimentaux. En prenant l'erreur moyenne sur plusieurs années, la forme inverse quadratique s'ajuste très légèrement mieux aux données que les autres, mais toutes les formes sont très proches. La forme quadratique offre un biais systématique autour de l'optimum estimé (sous-estimation des rendements). Quand tous les critères sont pris en compte, c'est la forme inverse quadratique qui s'ajuste le mieux aux données. Pour déterminer un optimum économique, les formes polynomiales inverses (linéaire et quadratique) sont les plus adaptées.
Vanotti et Bundy, 1994	Maïs	Recommandations fertilisation en intégrant différents sols et les effets de leur teneur en N Optimum économique	Quadratique Quadratique plus plateau Quadratique (surface de deux variables : la teneur en nitrate du sol et l'apport d'azote par engrais)	USA Wisconsin	Le plus souvent la forme quadratique surfacique est utilisée (ou bien la forme quadratique simple), jamais la forme quadratique plus plateau, pour déterminer l'optimum économique

Tableau 1.5 Etudes comparatives des formes fonctionnelles de courbes de réponse à l'azote (ordre alphabétique)

1.3. Conclusion

Le modèle AROPAj peut fournir des informations partielles sur les cultures recouvertes par les activités végétales qu'il prend en compte. STICS peut prendre en compte une information économique pour pouvoir fonctionner à l'échelle des fermes types de AROPAj. Après avoir postulé la forme de la courbe de réponse qui répond le mieux aux attentes des deux disciplines impliquées (agronomie et économie), la méthodologie de construction de ces courbes proprement dites est à établir. Comment construire ces courbes de réponse pour les cultures et fermes-types du modèle AROPAj pour lesquelles cela est possible ? Comment faire fonctionner le modèle STICS à cette échelle et pour cela, comment renseigner les données d'entrée correspondant à chaque culture de chaque groupe type ?

Chapitre 2
La détermination des entrées du modèle STICS

2. La détermination des entrées du modèle STICS

Les fermes types du modèle AROPAj ne disposent que de peu ou pas d'information physique permettant leur localisation à l'intérieur des régions RICA de l'UE. Les informations techniques sont également frustes. Ces deux traits des fermes types posent une difficulté pour définir les entrées du modèle STICS qui simule les cultures de chacune de ces entités, celles-ci représentant chacune une situation homogène du point de vue physique et technique. L'objet de ce chapitre est donc de montrer comment nous avons exploité les caractéristiques disponibles des fermes types en établissant des « règles de décision », tout en les complétant par des bases de données existantes, des dires d'experts et des informations bibliographiques. Nous avons distingué d'une part les entrées relevant du milieu physique (climat et sol) qui relèvent surtout de bases de données, d'autre part les entrées concernant l'itinéraire technique. Ces dernières sont en effet très peu disponibles, et encore moins aisément à l'échelle des régions et pour toute l'Europe.

2.1. Les entrées physiques : climat et sol

Les données physiques (climat et sol) utilisées sont principalement issues de bases de données existantes, le lien avec les fermes types a principalement été réalisé par l'intermédiaire de l'information de l'appartenance régionale et de la classe d'altitude. Nous détaillerons tout d'abord la méthode utilisée pour attribuer le climat aux groupes types, puis celle utilisée pour l'attribution des sols.

2.1.1. Le climat

Les données climatiques utilisées pour les simulations de STICS doivent être en accord avec les données comptables dont on dispose. En effet, pour chacune des cultures de chaque groupe type, le rendement issu du processus d'estimation de AROPAj (*cf.* § 1.1.1.b.iii)) est connu et constitue une situation optimale économiquement (par hypothèse économique). Ces rendements correspondent aux enregistrements comptables d'une année précise, 1997, et

peuvent avoir été affectés de manière positive ou négative par les évènements climatiques de cette année-là. Nous avons donc considéré l'année 1997 comme année de récolte (ce qui implique l'utilisation des années climatiques 1995, 1996 et 1997 pour pouvoir modéliser chaque culture, qu'elle soit d'hiver ou de printemps, ainsi que son précédent cultural).

2.1.1.a. Les données disponibles

i) La base de données climatiques

La base de données utilisée pour les données climatiques a été fournie par le Joint Research Center (JRC) d'Ispra (en Italie). Elle a au départ été développée dans le cadre du projet MARS (Monitoring Agriculture by Remote Sensing), et du système (CGMS, Crop Growth Monitoring System) mis en place pour évaluer des rendements à l'aide du modèle WOFOST (*cf.* 1.1.2.a.i)). La base spatialisée couvre toute l'Europe continentale et une partie du Maghreb, selon une grille dont des cellules mesurent 50 km de côté (*cf.* Figure 2.1). Les données météorologiques de cette base ont en effet été spatialisées de manière à représenter une moyenne des conditions climatiques de chaque cellule (en prenant en compte les effets d'altitude, d'éloignement de la mer), à partir d'enregistrements de stations météorologiques réparties sur l'ensemble du territoire couvert (van der Goot, 1998). Les variables climatiques disponibles à un pas de temps journalier dans cette base sont :

- La température maximale,
- La température minimale,
- La pression de vapeur saturante de l'air,
- La vitesse du vent,
- L'ETP Penmann, et
- Le rayonnement global (calculé).

Les données étant homogènes sur chaque cellule de la grille, il n'est pas possible de redéfinir des données pour des cellules de taille inférieure ou des points. Nous avons donc utilisé la base en conservant sa résolution originale.

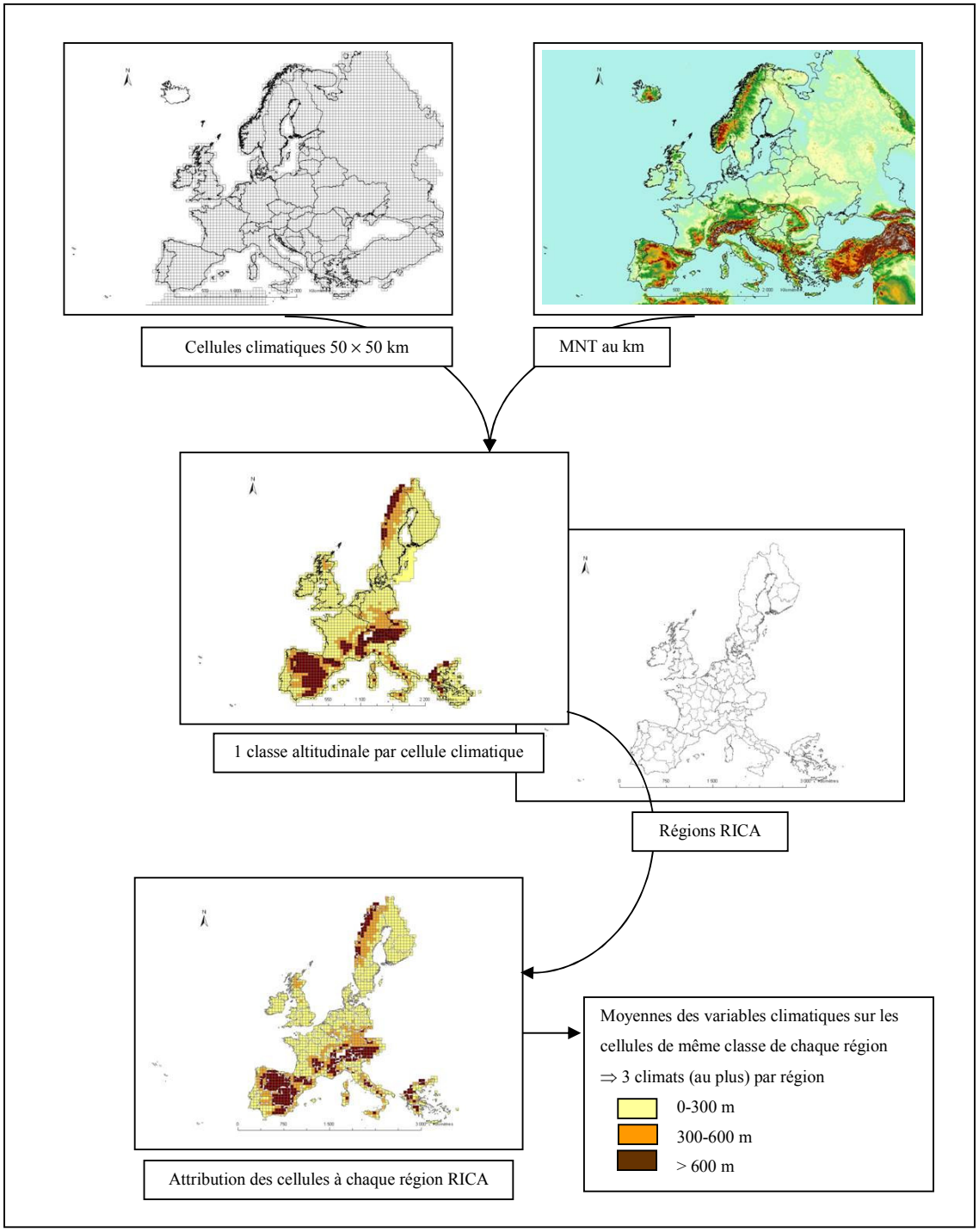
ii) Les caractéristiques des fermes types

En ce qui concerne les fermes-types, les seuls éléments permettant une localisation spatiale sont une indication sur leur classe d'altitude et bien évidemment leur appartenance régionale (région administrative RICA). Cependant, la classe d'altitude (0-300 m, 300-600 m, et plus de 600 m) de chaque ferme type n'est pas forcément unique (cf. Encadré 1.2 La typologie et les fermes-types du modèle AROPAj).Nous avons donc défini une classe moyenne pour chaque ferme type. Pour cela, nous avons calculé la moyenne des classes d'altitudes pondérée par les effectifs des populations de référence du RICA, de chaque ferme type (en arrondissant ensuite cette moyenne à l'entier le plus proche).

En faisant l'hypothèse que l'altitude est un critère important à la fois pour définir les fermes types et pour le climat (en particulier pour la température et l'humidité de l'air), nous avons utilisé cette clé pour définir un climat moyen par classe d'altitude pour chaque région, puis pour attribuer un climat moyen à chaque ferme type.

2.1.1.b. Attribution d'un « climat » à chaque ferme type

Tout d'abord, nous avons défini la classe d'altitude de chacune des cellules de la grille climatique. En utilisant un Modèle Numérique de Terrain 5MNT) au kilomètre sur l'Europe, nous avons attribué à chaque cellule la médiane de l'altitude à la cellule toute entière ; puis nous avons classé ces altitudes selon les mêmes définitions de classe que pour les groupes types (classe 1 : de 0 à 300 m, classe 2 : de 300 à 600 m, classe 3 : plus de 600 m). Ensuite, l'appartenance de chaque cellule climatique à une région administrative a été définie, car une cellule climatique peut se trouver sur plus d'une seule région. La surface d'intersection entre les entités géographiques région administrative et cellule (*cf.* Figure 2.1) la plus grande détermine l'appartenance régionale de la cellule. Enfin, au sein d'une région RICA, nous avons calculé les valeurs moyennes des variables climatiques pour chaque cellule de même classe altitudinale. Nous obtenons ainsi au plus 3 « climats » moyens (1 par classe d'altitude) par région.



Source des fonds de carte : Direction Générale Agriculture, Commission européenne

Figure 2.1 Définition du climat des régions RICA et des fermes types

Finalement, le climat de chaque ferme type de chaque région correspond au « climat régional moyen » de la classe altitudinale correspondante.

2.1.2. Le sol

Au contraire du climat, le sol n'est pas définitivement déterminé par avance. Nous avons dans un premier temps déterminé une palette de sols possibles pour chaque groupe type. Puis, le sol définitif associé à chaque culture sera par la suite défini en faisant intervenir les caractéristiques économiques des courbes de réponse à l'azote construites à partir des cinq sols attribués au groupe type (voir chapitre 3). L'élaboration de la base de données de paramètres des sols spécifique à cette thèse a été réalisée par Christine Le Bas de l'Unité INFOSOL de l'INRA d'Orléans, dans le cadre d'un projet Gestion et Impact des Changements Climatiques (GICC) financé par le ministère de l'Environnement. Ce travail s'articule autour de deux volets. Premièrement, il s'agit de définir les valeurs des paramètres STICS pour les sols, à partir des données de la base géographique des sols d'Europe au millionième (King *et al.*, 1994). Deuxièmement, les types de sol pour les cultures à simuler ont été déterminés, et leur surface à l'intérieur de chaque région administrative RICA. Après avoir brièvement présenté les sources de données utilisées, ces deux parties du travail seront décrites plus précisément.

2.1.2.a. La base de données géographique des sols d'Europe au millionième

La base de données géographique des sols d'Europe est la seule source de données cartographiques harmonisées et numérisées sur les sols qui couvre l'ensemble du territoire européen. Elle fournit une représentation simplifiée de la diversité et de la variabilité spatiale des sols à l'échelle du millionième. A cette échelle, seules des associations de sol correspondant aux principaux paysages pédologiques européens peuvent être délimitées. Elles sont appelées Unités Cartographiques de Sol (UCS) et sont constituées par plusieurs types de sol différents dont on connaît le pourcentage de surface qu'ils représentent au sein de l'UCS (Figure 2.2). Ces types de sol, appelés Unités Typologiques de Sol (UTS), sont décrits par un ensemble de variables essentiellement qualitatives, caractérisant la nature et certaines propriétés du sol, telles que le nom du sol, la texture de surface, la texture de profondeur, le matériau parental, etc.

Cette base de données correspond à une synthèse réalisée par les experts nationaux et ne contient pas de données analytiques. De plus, l'état de connaissance des sols est variable d'un

pays à l'autre. La précision de la base de données est donc faible tant du point de vue spatial que sémantique.

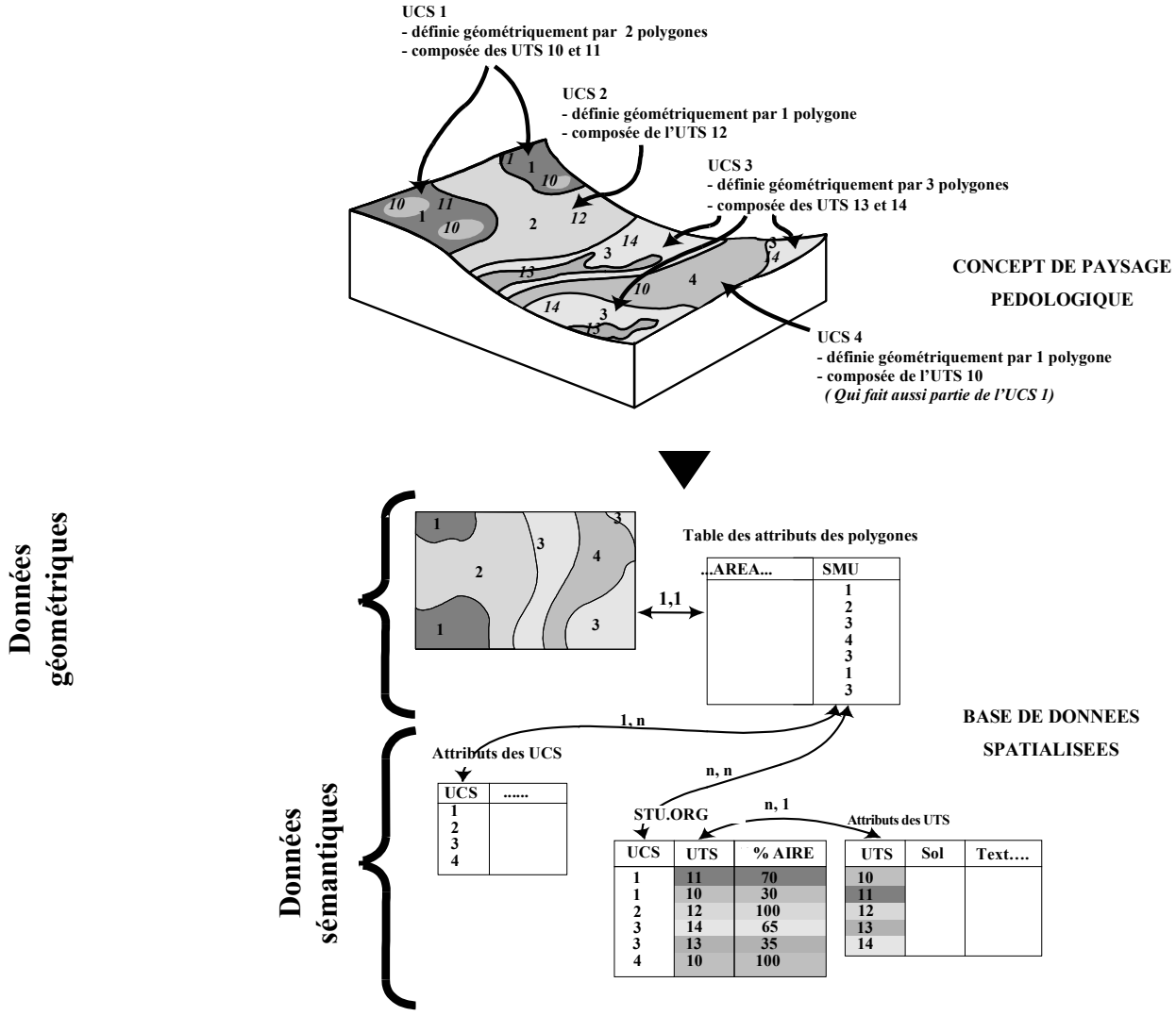


Figure 2.2 Organisation de l'information dans la base de données géographique des sols d'Europe (d'après le CD-Rom *The European Soil Data Base, version 1.0*, The European Soil Bureau, 1998).

2.1.2.b. La définition des paramètres STICS pour les sols européens

Les paramètres sol nécessaires en entrée du modèle STICS (dont la liste détaillée est présentée en Annexe 3) ne sont pas directement disponibles dans la base de données géographique des sols d'Europe. Il est donc nécessaire de les estimer, nous présentons ici les principales règles de pédotransfert utilisées. Ces règles permettent d'estimer, à dires d'expert, les paramètres nécessaires au modèle STICS, à partir des variables disponibles dans la base de données. Dans le cadre de cette thèse, deux types de paramètres STICS peuvent être distingués : les paramètres à valeur fixe (une seule valeur pour toutes les UTS), et les paramètres à valeur variable selon les UTS, estimées par règles de pédotransfert, dont certaines ont été mises au point spécifiquement pour cette thèse. L'Annexe 3 détaille, pour chaque paramètre du modèle STICS, son mode d'obtention.

i) Les paramètres à valeur fixe

Ces paramètres correspondent soit à des options du modèle qui sont activées ou inactivées (par exemple inactivation des remontées capillaires…), soit à des valeurs fixées de manière unique. Le choix de fixer la valeur d'un paramètre peut résulter du manque d'information sur le paramètre (par exemple, *ruisolnu* (fraction de pluie ruisselée) a été fixée à 0 car sa détermination est très difficile avec les données dont on dispose, on fait donc l'hypothèse qu'il n'y a pas de ruissellement). Ce choix peut aussi représenter une hypothèse plausible pour tous les sols traités (par exemple : *profhum* (profondeur d'humification) a été fixée à 30 cm pour tous les sols).

ii) Les paramètres à valeur variable

Ces paramètres ont été estimés à partir de règles de pédotransfert adaptées à la base de données géographique des sols d'Europe au millionième. Ce sont la plupart du temps des estimations qualitatives retransformées en valeurs numériques pour STICS (par exemple, l'albédo a été estimé d'abord en trois classes (faible, moyenne, forte) et une valeur numérique a été ensuite attribuée à chaque classe). Ce travail s'est appuyé sur les règles de pédotransfert existantes développées pour la Base de Données Géographique des Sols d'Europe (Van Ranst

et al., 1995, Daroussin et King, 1997, Le Bas *et al.*, 1997), ainsi que sur celles réalisées pour l'estimation des paramètres sols pour STICS-prairie dans le cadre du projet ISOP (Information et Suivi Objectif des Prairies) sur la France (Donet *et al.*, 2001).

Les travaux ont consisté d'une part à étendre à l'ensemble de la base de données les règles de pédotransfert disponibles pour le territoire français suite aux travaux du projet ISOP (albédo, teneur en $CaCO_3$ de l'horizon de surface, taux d'argile de l'horizon de surface, teneur en eau à la capacité au champ et au point de flétrissement, densité apparente, etc.). D'autre part, les travaux du projet ISOP ont été réalisés avec la version 3 de STICS. Dans le cadre de cette thèse, nous utilisons la version 5 de STICS dans laquelle de nouveaux paramètres ont été introduits. Il a alors été nécessaire de développer de nouvelles règles de pédotransfert comme par exemple pour les types de cailloux et leurs caractéristiques hydriques.

Dans le cadre du projet ISOP, une seule valeur d'azote organique a été utilisée pour tous les types de sol. Elle avait été déterminée en utilisant d'une base de données de profils de sol français, à partir des valeurs moyennes du taux de carbone organique et du C/N sous prairies. Au niveau européen, on ne dispose pas d'une telle base de données permettant une estimation de la teneur en azote organique des sols d'Europe sous cultures annuelles. Nous avons donc choisi d'utiliser une estimation de la teneur en carbone organique réalisée par le Centre Commun de Recherche (CCR) d'Ispra (Italie) (Jones *et al.*, 2005). Cette estimation a été réalisée sur une maille de 1 km^2 à partir des données suivantes :

- pour les sols : la base de données géographique des sols d'Europe au 1/1 000 000ème, rastérisée sur la maille de 1 km^2
- pour l'occupation du sol : la couche European Land Cover Data du Catchment Information System (Hiederer, 2002[28]) qui combine des données issues de Corine Land Cover (CLC, *cf.* Encadré 2.1) et des données de la couche occupation du sol pour l'Eurasie du service géologique américain (United States Geological Survey, 2003)[29]
- pour les pentes : un MNT d'une résolution de 1 km
- pour le climat : les données utilisées proviennent des données météorologiques du Global Historical Climatology Network, GHCN (Easterling *et al.*, 1996).

[28] http://www.gisig.it/eco-geowater (dernière mise à jour 21 Décembre 2004).
[29] http://www.lpdaac.usgs.gov/glcc/globdoc2-0.asp

Encadré 2.1 Corine Land Cover

Corine Land Cover est un programme européen qui a pour but de fournir une information géographique homogène sur la couverture du sol. La base de données géographique qui a été utilisée dans cette thèse couvre l'Europe des 15 (sauf la Suède) et date de décembre 2000. Cet inventaire des couvertures de sol s'est fait à partir d'images satellitaires photointerprétées (acquises entre 1987 et 1994). L'échelle de travail a été le 1 : 100 000ème, la résolution finale étant de 250 m, présentée en Lambert II étendu. La nomenclature standardisée s'organise en trois niveaux hiérarchiques et quarante-quatre postes qui caractérisent les cinq grands types d'occupation du territoire : territoires artificialisés, territoires agricoles, forêts et milieux semi-naturels, zones humides, et surfaces en eau.

Source : site de l'Institut Français de l'Environnement (IFEN) http://www.ifen.fr/donIndic/Donnees/corine/3corin.htm

La base de l'estimation de la teneur en carbone organique est une règle de pédotransfert mise au point en 1994 et révisée par Jones *et al.*, 2005. Cette règle permet d'estimer la teneur en carbone organique à partir du nom du sol et de l'occupation du sol. Cette première estimation est ensuite corrigée par une équation utilisant la température moyenne annuelle cumulée. Les pentes n'ont été utilisées que pour affiner l'attribution du type de sol à chaque maille de 1 km^2. Le CCR nous a fourni le résultat de l'estimation, c'est-à-dire la teneur en carbone organique, par maille de 1 km^2, ainsi que le numéro de l'UCS correspondant à la maille et l'occupation du sol considérée (terres cultivées, prairies, végétation halophile, végétation naturelle). Comme nous avions besoin d'une estimation par UTS, nous avons tout d'abord calculé par UCS dans chaque région RICA, la moyenne des teneurs en carbone organique pour les mailles de 1 km^2 présentes dans la région, affectées à l'UCS et dont l'occupation du sol était « terres cultivées ». Nous avons ensuite attribué cette teneur moyenne à toutes les UTS qui composent l'UCS par région RICA (une UCS qui se situe dans plusieurs régions RICA aura donc des teneurs en carbone organique différentes selon les régions).

Pour déterminer la teneur en azote organique par UTS et par région, nous avons utilisé les valeurs moyennes de C/N calculées par Batjes, 1996, pour les sols du monde, et par Batjes, 2002, pour les sols d'Europe Centrale. La valeur de Norg (teneur en azote organique) de l'UTS est donc égale à la valeur de Corg de l'UTS divisée par le rapport C/N correspondant au type de sol de l'UTS. Les valeurs de Norg ont été arrondies à 0,01 près. Finalement, pour garder une certaine précision mais réduire quand même le nombre d'unités de simulation, sept classes ont été conservées (*cf.* Tableau 2.1). Comme nous n'avons pris en compte que les mailles de « terres cultivées » et que les données ont été rastérisées à la maille de 1 km^2, nous

ne disposons pas d'une estimation de Corg pour toutes les UCS de la base de données des sols d'Europe. Dans chaque région, les UCS sans estimation de Corg, et par conséquent les UTS qui les composent, ont donc été éliminées faute de pouvoir estimer leur taux de Norg.
Les UTS ayant les mêmes valeurs pour l'ensemble des paramètres d'entrée de STICS ont ensuite été regroupées pour former les unités de simulation sol pour STICS (présentes dans le fichier « param.sol »). Une unité de sol STICS peut donc représenter plusieurs UTS.

Valeur Norg brute calculée	Classe	Valeur de Norg retenue pour la classe
≤ 0.07	1	0.05
0.08	2	0.08
0.09		
0.10	3	0.10
0.11		
0.12	4	0.12
0.13		
0.14	5	0.14
0.15		
0.16	6	0.16
0.17		
≥ 0.18	7	0.20

Tableau 2.1 Les classes de valeurs de Norg (teneur en azote organique en % pondéral)

2.1.2.c. La détermination des surfaces de sol à l'intérieur de chaque région

Pour estimer les surfaces des types de sols par région, nous avons calculé par région RICA les surfaces de chaque UCS, et par conséquent les surfaces des UTS qui la composent, ayant une occupation du sol en accord avec les cultures modélisées par AROPAj et STICS. Pour cela, seules les zones de territoire agricole « terres arables » (hors rizières) et « zones agricoles hétérogènes » ont été conservées. Nous avons donc exclu les sols couverts par : les prairies et cultures permanentes (arboriculture, viticulture), les territoires artificialisés, les forêts et milieux semi-naturels, les zones humides et surfaces en eau. CLC étant disponible sous forme raster (au pas de 250 m), la base de données des sols d'Europe et le contour des régions RICA ont préalablement été rasterisés selon une maille de 250 m × 250 m. Pour les îles grecques et la Suède qui ne sont pas couvertes par CLC, la couche d'information sur l'occupation du sol fournie par le CCR (avec une résolution de 1 km) a été utilisée.
Ainsi, nous disposons, pour chaque région, des types de sols utilisés pour les cultures du modèle AROPAj (cultures annuelles) et modélisables par STICS. Pour chacun d'eux, nous connaissons sa surface définie à partir des couvertures du sol disponibles.

2.1.2.d. L'attribution des sols aux fermes types

Le sol étant un élément fondamental dans la croissance et le développement de la culture, il joue un rôle déterminant dans l'élaboration du rendement. Dans chaque région RICA, de nombreux sols sont présents (de 8 à 181, et en moyenne 73 types de sols par région), et les fermes types n'étant pas localisées dans la région RICA, nous avons dû faire des hypothèses pour choisir les sols à attribuer à chaque culture et à chaque ferme type. Nous n'avons pas limité la ferme type à un seul type de sol, et, à l'intérieur d'une même exploitation, nous avons considéré que les cultures peuvent être pratiquées sur des types de sol différents. Nous avons donc conservé plusieurs types de sol par exploitation type : les cinq types de sol, de la classe d'altitude de la ferme type, ayant la surface la plus étendue. Le nombre cinq nous permet en effet d'arbitrer entre la préservation de la variabilité et le nombre de simulations.

2.2. Les entrées techniques

Contrairement aux données physiques qui peuvent plus facilement être appréhendées par des données satellitales de télédétection ou par des enregistrements ne nécessitant pas d'intervention humaine (station météo), les données techniques sont souvent issues d'enquêtes, ou de dires d'experts. Les bases de données au niveau européen n'existent pas pour les itinéraires techniques, nous avons cependant utilisé une base de données phénologiques issue également du projet MARS (Willekens *et al.*, 1998). Ainsi, en nous basant sur les informations disponibles dans la bibliographie, complétées à dires d'experts, nous avons défini et attribué les entrées techniques requises par STICS pour simuler les cultures de chaque ferme type de chaque région de l'Union Européenne à 15. Après avoir précisé les cultures dont nous cherchons à modéliser le rendement, nous présenterons les principales règles de décision concernant :

- l'initialisation de la simulation,
- le positionnement du cycle cultural (groupes de précocité et dates de semis),
- la gestion de la fertilisation azotée minérale et organique, et
- l'irrigation.

Les activités végétales du modèle AROPAj définissent les cultures étudiées, ce sont les principales grandes cultures européennes. Cependant, d'un point de vue agronomique, une activité de production végétale peut recouvrir plusieurs réalités (comme nous l'avons déjà mentionné p.37). Les blés tendre et dur sont bien distingués, ainsi que les maïs ensilage et grain. Par contre, l'activité « orge » comprend aussi bien l'orge de printemps que l'orge d'hiver, l'orge fourragère que l'orge brassicole, l'activité « pomme de terre » ne distingue pas les plants, des pommes de terres de consommation, féculières ou primeurs. S'ajoutent aux cultures déjà citées : le tournesol, le colza et la betterave à sucre, qui posent moins de problèmes dans la mesure où leur aire de répartition est plus réduite et le nombre de types variétaux utilisés plus faible.

2.2.1. « Initialiser » le système et déterminer un précédent cultural

Afin d'initialiser le système à modéliser, nous avons « enchaîné » deux simulations STICS, c'est-à-dire que nous avons simulé deux cultures d'une succession culturale. En effet, pour fournir au modèle des teneurs en eau et en azote réalistes au début de la simulation de la culture, il convient de prendre en compte son précédent. La teneur en azote étant importante pour notre travail, nous avons considéré les apports potentiels d'une fixation symbiotique d'azote par un précédent qui serait une légumineuse. Plusieurs études ont en effet montré l'effet favorable d'un précédent cultural légumineuse sur la culture suivante par rapport à un précédent céréale (Vaidyanathan *et al.*, 1987, Jensen et Haahr, 1990, Sylvester-Bradley et Cross, 1991). Dans le but de limiter cependant le nombre de simulations, nous avons réduit les précédents culturaux potentiels à deux cas : une légumineuse (représentée par un pois de printemps) et une non-légumineuse (représentée par un blé d'hiver). Les pailles sont exportées, seules les chaumes sont incorporées 15 jours avant le semis de la culture suivante à modéliser. Bien que les initialisations des simulations des précédents influent peu sur les résultats des simulations qui nous intéressent, ces teneurs en eau et en azote du sol initiales ont été fixées. Pour la teneur en azote (NO3initf), nous avons réparti uniformément la teneur totale (50 kg de N/ha) entre chaque horizon du sol. En fonction du sol et du nombre d'horizons, nus avons appliqué un coefficient aux valeurs de l'humidité à la capacité au champ de la terre fine (HCCf) de chaque horizon (donnée du fichier sol), pour faire augmenter l'humidité initiale (Hinitf) avec la profondeur (*cf.* Tableau 2.2). Les itinéraires techniques des deux précédents ont été définis à dires d'experts, des variétés « moyennes »

ont été utilisées pour les deux plantes, une fertilisation de 200 unités d'azote pour le blé, aucune fertilisation et une irrigation satisfaisant les besoins de la plante à 100 % pour le pois.

	Sol à 1 horizon	Sol à 2 horizons	Sol à 3 horizons	Sol à 4 horizons	Sol à 5 horizons
Horizon 1	80 %	70 %	50%	30%	30%
Horizon 2		80 %	70 %	50%	50%
Horizon 3			80 %	70 %	70 %
Horizon 4				80 %	80 %
Horizon 5					80 %

Tableau 2.2 Coefficients multiplicateurs de l'humidité à la capacité au champ pour les valeurs initiales du précédent cultural

2.2.2. Pour « caler » le cycle cultural

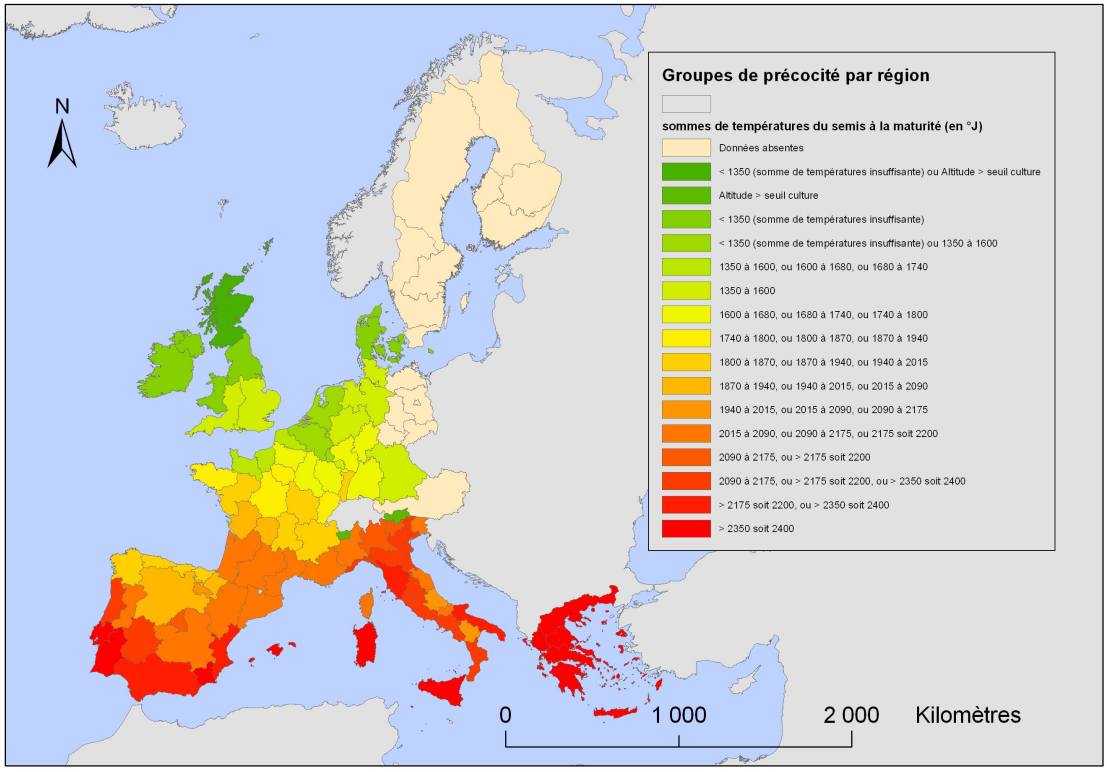
Afin d'adapter la position du cycle de chaque culture au climat de chaque région, nous avons utilisé deux « leviers » principaux : la précocité et les dates de semis. Suivant le type de culture, nous avons soit fixé le groupe de précocité et fait varier la date de semis (stratégie 1), soit fixé la date de semis et fait varier la précocité (stratégie 2).

La première stratégie a été adoptée pour des cultures comme le colza. Pour cette culture en effet, la précocité intervient très peu dans le choix variétal et ce sont surtout les dates de semis qui différencient les régions. En pratique, nous avons retenu une variété moyenne (la seule disponible dans STICS) pour toutes les régions européennes et nous avons considéré trois dates de semis possibles (autour d'une date de semis moyenne, issue des données des instituts techniques et de la base de données phénologiques du projet MARS, Willekens *et al.*, 1998). Cette attitude est raisonnable dans la mesure où l'aire de culture du colza est cantonnée principalement au Nord de l'Europe. De même, nous avons adopté cette méthode pour les blés tendre et dur hors de la France, où les informations techniques dont nous disposions ne nous permettaient pas de différencier plusieurs groupes de précocité. Compte tenu de l'aire étendue de la culture du blé, nous avons cependant distingué deux groupes de précocité : cycle long pour le Nord de l'Europe, et cycle court pour le Sud de l'Europe. Nous avons adopté cette même stratégie pour l'orge d'hiver, l'orge de printemps, la pomme de terre et la betterave à sucre. De plus, comme la dénomination « orge » regroupe dans le modèle économique tous les types d'orge (printemps/hiver, brassicole/fourrager, 2 rangs/6 rangs), nous n'avons conservé qu'une seule orge par groupe type, et ce, de la manière suivante :

- pour les groupes types éleveurs (*cf.* Annexe 2) : escourgeon fourrager,
- pour les groupes types cultivateurs (*cf.* Annexe 2) : orge de printemps brassicole.

La seconde stratégie a été adoptée pour le maïs, culture pour laquelle la précocité est déterminante dans le choix variétal. En pratique, trois groupes de précocité ont été retenus parmi les données de l'atlas agroclimatique du maïs (Lorgeou et Souverain, 2003) et des résultats de l'étude menée par Ruget *et al.*, 1995. La date de semis a été fixée à partir de la base de données phénologiques du projet MARS. Cependant, pour les pays situés plus au Nord ou plus au Sud de l'Europe, il a fallu paramétrer, pour le modèle STICS, des groupes de précocité non utilisés en France : « ultra précoce » (1550 degrés-jours du semis à la maturité pour le Nord de l'Angleterre), ou « ultra tardif 1, 2 et 3 » (respectivement 2133, 2200 et 2400 degrés-jours du semis à la maturité, pour le Sud de l'Europe) (*cf.* Figure 2.3).

Pour chaque groupe de précocité, nous avons calculé pour STICS les paramètres clefs du cycle. Nous avons utilisé pour cela la méthodologie donnée par Brisson *et al.*, 2002. Le paramétrage des groupes de précocité supplémentaire est présenté au Tableau 2.3.



Source du fond de carte : Direction Générale Agriculture, Commission européenne

Figure 2.3 Les groupes de précocité du maïs par région RICA.

		Ultra précoce	Très précoce	Très tardif	Ultra tardif 1	Ultra tardif 2	Ultra tardif 3
Abréviation	**Mode de Calcul**	Durées en °J					
PLT FLO	**Définition du groupe : connue**	785	827	998	1043	1060	1200
LEV MAT	**Définition du groupe : connue**	1470	1560	1973	2053	2120	2320
LEV AMF	1/3×(LEV LAX)	203	219	299	310	327	347
AMF LAX	LEV LAX – LEV AMF	412	444	606	630	663	704
LAX SEN	0.75(FLO MAT) + LAX FLO	659	690	819	852	865	970
SEN LAN	SEN MAT *(hypothèse MAT à 32 % eau)*	196	207	250	261	265	300
LEV DRP	LEV MAT – FLO MAT + FLO	935	983	1225	1260	1310	1370
DRP MAT	LEV MAT – LEV DRP	535	577	748	793	810	950

Tableau 2.3 Paramétrage de groupes de précocité supplémentaires pour le maïs

Végétatifs (indice foliaire)	**Organes récoltés**
PLT : semis ou plantation	
LEV : levée	
	FLO : floraison (début sensibilité au gel des fruits)
AMF : accélération maximale de croissance foliaire – fin de phase juvénile	**DRP** : début remplissage des organes récoltés
LAX : indice foliaire maxi	
SEN : début de sénescence	
LAN : indice foliaire nul	**MAT** : maturité physiologique

Tableau 2.4 Stades de développement dans STICS

Pour le blé et le blé dur, nous avons de même considéré trois groupes de précocité par régions pour la France où les informations techniques dont nous disposions étaient plus importantes que dans les autres pays européens.

Ainsi, nous avons obtenu une gamme de trois situations possibles pour chaque culture de chaque groupe type, quelle que soit la stratégie retenue (nous avions soit une combinaison de trois dates de semis pour une variété, soit une combinaison de trois variétés pour une date de semis). Cette gamme de variation nous permet ainsi de positionner le cycle cultural dans l'année climatique particulière que nous avons considérée, et ce pour chaque région.

Les groupes de précocité et variétés utilisées sont détaillés pour chaque culture en Annexe 4.

2.2.3. La fertilisation azotée

Nous avons distingué les apports d'engrais synthétiques des apports d'effluents d'élevage potentiels. En effet, si la ferme type possède un cheptel, on peut supposer qu'une partie au moins des apports azotés, phosphoriques et potassiques provient des effluents liés à son ou ses élevages.

2.2.3.a. Avec les engrais synthétiques

i) Type d'engrais utilisé

Le type d'engrais synthétique apporté à chaque culture a été défini pour chaque culture à dire d'experts et également en tenant compte de la contrainte « prix ». En effet, pour certains pays, les données concernant les prix des engrais étant très réduites, nous avons dû adopter l'engrais dont nous connaissions le prix. Par ailleurs, si les apports phosphatés et potassiques ne sont pas pris en compte par le modèle de culture, ce dernier fait l'hypothèse que ces éléments ne sont pas limitants pour la culture. De plus, ils sont nécessaires à la culture et s'ils sont apportés sous forme d'engrais synthétique, ils pèsent dans les charges variables. Il était donc nécessaire de prendre en compte ces apports. Nous avons défini, à dire d'experts, pour chaque culture de chaque région, la combinaison de chaque type d'engrais du marché lui apportant les

trois éléments N, P et K. (*cf.* Annexe 5). Lorsque la dose totale d'azote varie, nous avons conservé la part massique de chaque engrais de la combinaison. Afin de pouvoir apporter deux types d'engrais azotés avec le modèle STICS, au cours d'une campagne, nous avons eu recours aux efficiences des engrais (cf. 1.1.2.b.vii) les apports d'azote). Ainsi nous avons pu ramener une dose totale d'engrais combinés à une dose totale équivalente d'un engrais azoté simple unique (*cf.*Annexe 5).

ii) Dates d'apports, fractionnement et doses apportées

Les dates d'apport ont été exprimées en unités de développement de manière à s'affranchir des dates calendaires tout en s'adaptant au mieux à la diversité des conditions climatiques de l'Europe. Ces dates correspondent, pour chaque plante, à un fractionnement « optimal » de la dose totale en engrais, satisfaisant au mieux les besoins en azote de la plante, et défini à partir de données bibliographiques et à dires d'experts (*cf.* Tableau 2.5, Tableau 2.6, et Tableau 2.7 respectivement pour le colza, les céréales à paille et le maïs). Le tournesol, la betterave et la pomme de terre ne bénéficient que d'un seul apport. Il se fait au semis pour le tournesol et 10 jours avant le semis pour la betterave et la pomme de terre. Ces modes d'apport correspondent à une majorité de pratiques et sont en accord avec une efficacité maximale de l'azote sur le rendement de ces cultures (Vos, 1999 pour la pomme de terre, Legrand et Vanstallen, 2000[30] pour la betterave et Leterme et Reau, 1993 pour le tournesol).

stades d'apport d'azote / variété	reprise	boutons accolés	boutons séparés
Goéland	1225	1258	1369

Source :Communication personnelle Luc Champolivier (CETIOM), rapport interne INRA-CETIOM

Tableau 2.5 Les stades d'apport d'azote pour le colza

[30] Voir site internet http://www.kbivb.be/fr/pdf/GuideAzote.pdf

	stades d'apport d'azote *selon les stades STICS* / variétés	Tallage *(PLT ;AMF)/2*	épi 1 cm *stade AMF*	entre gonflement des grains et 2 nœuds *(LAX ;(AMF ;LAX)/2)/2*
Blés tendres	**Arminda**	213	425	706
	Talent	198	395	590
	Promentin	208	415	648
	Sidéral	198	395	590
	Soissons	198	395	613
	Thésée	203	405	623
Blés durs	**Acalou**	180	360	555
	Ardente	180	360	555
	Lloyd	190	380	586
	Arcalis	190	380	586
	Or Jaune	190	380	586
	Ambral	198	395	613
	Néodur	198	395	613
	Artimon	198	395	613
	Nefer	203	405	638
	Allur	190	380	586
Orges	**Plaisant**	170	340	528
	Scarlett	250	499	687

Sources : Ecophysiologie du blé, de la plante à la culture, Gate, 1995, Fertilisation azotée du blé tendre d'hiver, ARVALIS Institut du végétal, 2005, Orges brassicoles et fourragères, ITCF, 2002

Tableau 2.6 Les stades d'apport d'azote pour les céréales à paille

groupes de précocité	stades d'apport d'azote *selon les stades STICS* / variétés	Semis *PLT*	4-10 feuilles *AMF*
A0	**Extrême précoce**	selon région	283
A	**très précoce**	selon région	299
B	**DK 250 =DK240 = Banguy**	selon région	305
C1	**DEA = Magrite = Nobilis**	selon région	313
C2	**Furio**	selon région	355
D	**Dunia**	selon région	365
E1	**Cecilia**	selon région	380
E2	**très tardif**	selon région	379
F	**Extrême tardif 1**	selon région	390
G	**Extrême tardif 2**	selon région	407
H	**Extrême tardif 3**	selon région	427

Sources :Communication personnelle, Philippe Desvigne(ex-AGPM Technique, ARVALIS)

Tableau 2.7 Les stades d'apport d'azote pour le maïs

Afin de pouvoir « balayer » une plage de valeurs représentant la dose totale d'azote apportée (qui permet de faire le lien avec l'économie), le fractionnement de la dose totale dépend du niveau même de cette dose (*cf.* Tableau 2.8, Tableau 2.9, Tableau 2.10 et Tableau 2.11).

Dose totale = Dt	dose à la reprise	dose à boutons accolés	dose à boutons séparés
Dt < 80	0	Dt	0
80 ≤ Dt ≤ 120	60	Dt-60	0
120 < Dt ≤ 180	70	Dt-70	0
180 < Dt ≤ 210	80	Dt-80	0

Sources : Colza d'hiver- Les techniques culturales, Le contexte économique, brochure CETIOM, 2003a

Tableau 2.8 Fractionnement de la dose totale d'azote apportée sur le colza

Dose totale = Dt	dose au tallage	dose à épi 1 cm	dose entre gonflement/2 noeuds
Dt < 80,	0	Dt	0
80 ≤ Dt < 130	30	Dt-30	0
130 ≤ Dt < 160	30	Dt-60	30
160 ≤ Dt < 170	40	Dt-70	30
170 ≤ Dt ≤ 200	40	Dt-80	40
200 < Dt ≤ 240	50	Dt-90	40
240 < Dt ≤ 300	50	Dt-100	50
300 < Dt ≤ 310	50	200	Dt-250
310 < Dt ≤ 360	60	200	Dt-260
Dt > 360	60	Dt-160	100

Sources : Ecophysiologie du blé, de la plante à la culture, Gate, 1995, Fertilisation azotée du blé tendre d'hiver, ARVALIS Institut du végétal, 2005

Tableau 2.9 Fractionnement de la dose totale d'azote apportée sur blés dur et tendre

Dose totale = Dt	dose au tallage	dose à épi 1 cm	dose entre gonflement/2 noeuds
Dt ≤ 60	0	Dt	0
60 < Dt < 150	Dt/3	2 Dt/3	0
150 ≤ Dt < 200	50	90	Dt-140
200 ≤ Dt ≤ 220	50	100	Dt-150
220 < Dt ≤ 240	Dt-170	100	70
240 < Dt ≤ 290	70	Dt-140	70
290 ≤ Dt < 320	80	Dt-150	70
320 ≤ Dt < 400	80	Dt-160	80
400 ≤ Dt < 450	90	Dt-170	80
450 ≤ Dt < 500	90	Dt-180	90
Dt ≥500	100	Dt-200	100

Sources : Ecophysiologie du blé, de la plante à la culture, Gate, 1995, Orges brassicoles et fourragères, ITCF, 2002

Tableau 2.10 Fractionnement de la dose totale d'azote apportée sur orges

Dose totale = Dt	dose au semis	dose à 4-10 feuilles
0 ≤ Dt	Dt/4	3 Dt/4

Sources :Communication personnelle, Philippe Desvigne(ex-AGPM Technique, ARVALIS)

Tableau 2.11 Fractionnement de la dose totale d'azote apportée sur maïs

2.2.3.b. Avec les effluents d'élevage

i) La typologie des effluents à épandre

Parallèlement aux apports d'engrais minéral, les effluents d'élevage potentiels de chaque ferme-type constituent la deuxième source d'azote. Lors de l'étape d'estimation des paramètres du modèle AROPAj (§ 1.1.1.b.iii)), le cheptel de chaque ferme-type et sa composition (en nombre et catégories d'animaux) a été déterminé. Comme nous l'avons déjà mentionné au paragraphe 1.1.1.b, le modèle économique a cependant des catégories animales très détaillées pour les bovins, mais pas réellement pour les autres élevages. Nous avons donc tout d'abord regroupé les catégories animales de AROPAj pour en faire des « producteurs » d'effluents (*cf.* Annexe 6 A). Nous avons ensuite défini les quantités produites par animal producteur et par an de chaque catégorie d'effluent (fumier, lisier, et fientes éventuellement) (*cf.* Annexe 6 B). Enfin, nous avons détaillé les grands types d'effluents produits en reliant cette typologie à celle des producteurs (*cf.* Annexe 6 C).

Ainsi, nous avons pu déduire des « stocks » (produits annuellement) d'effluents à épandre sur l'ensemble de l'assolement de la ferme type. En raison de leur teneur très différente en azote et de la nature des contraintes agronomiques spécifiques à chacun d'entre eux, nous avons distingué quatre grands types d'effluents : le stock « lisiers », le stock « fumiers », et deux stocks « effluents de volailles » (fumier d'un côté, lisier et fientes sèches, regroupés en un seul groupe de l'autre).

ii) Les règles de l'épandage

Pour l'épandage de ces effluents, nous avons défini des règles d'action portant sur la dose, en définissant une fourchette pour la quantité apportée en une fois (*cf.* Tableau 2.12, d'après *Fertiliser avec les engrais de ferme*, Institut de l'élevage *et al.*, 2001).

Type d'effluent	Dose moyenne	Dose minimale	Dose maximale
Fumier	40 t/ha	20 t/ha	50 t/ha
Lisier	30 m^3/ha	15 m^3/ha	40 m^3/ha
Fientes	10 t/ha	5 t/ha	20 t/ha

Tableau 2.12 Doses et fourchettes d'effluents épandables

L'épandage de chacun de ces stocks se fait selon un ordre d'affectation prioritaire par culture, en commençant par les surfaces cultivées valorisant le mieux chaque effluent, il est présenté dans le Tableau 2.13. Ces règles ont également été établies en tenant compte d'une série de contraintes agronomiques (par exemple risque de brûlure des feuilles lié à l'apport de fientes de volailles sur maïs). Enfin les périodes d'apport ont été définies, par culture, en fonction du type d'effluent (Tableau 2.14). Un exemple d'épandage est présenté en Annexe 6.D.

Culture « réceptrice »	lisiers bovins, porcins	fumiers bovins, porcins, ovins, caprins	lisiers et fientes volailles	fumier volailles
blé et autres céréales d'hiver	**1**	**3**	**1**	**3**
maïs grain et ensilage et autres cultures de printemps	**2**	**1**	**2**	**1**
colza d'hiver	**3**	**2**	**3**	**2**
prairies temporaires et permanentes	**4**	**4**	**JAMAIS**	**JAMAIS**

Tableau 2.13 Ordre de priorité d'épandage des effluents d'élevage pour les cultures

Culture « réceptrice »	lisiers bovins, porcins	fumiers bovins, porcins, ovins, caprins	lisiers et fientes volailles	fumier volailles
blé et autres céréales d'hiver	printemps avant épi 1cm	Automne avant labour	printemps avant épi 1cm	printemps avant épi 1cm
maïs grain et ensilage et autres cultures de printemps	au labour (10-15 j avant semis)	le plus tôt possible fin d'été (juil-août)	au labour (10-15 j avant semis)	au labour (10-15 j avant semis)
colza d'hiver	avant semis (qq. j)	automne au labour	avant semis (qq. j)	avant semis (qq. j)
prairies temporaires et permanentes	n'importe quand	n'importe quand	JAMAIS	JAMAIS

Définition des dates :

- Date semis – 10 j
- Stade issu de la BD phénologique
- Début de simulation (mi août)
- Culture non simulée

Tableau 2.14 Définition des dates d'apport des effluents pour chaque culture

L'apport d'effluents d'élevage intervient également dans la fertilisation phospho-potassique des cultures. Afin de prendre en compte les apports de P_2O_5 et de K_2O aux cultures d'une ferme type, nous avons donc effectué un bilan pour chacun de ces éléments, au niveau de l'exploitation toute entière. En effet, les apports de phosphore et de potassium se pratiquent habituellement plutôt sur les têtes d'assolement et pas systématiquement sur toutes les cultures. Compte tenu des rotations culturales, il nous a semblé intéressant de vérifier que la totalité des exportations des cultures en P_2O_5 et K_2O de l'année observée est comblée par les apports supposés habituels des effluents d'élevage (*cf.* Annexe 6 E). Si c'est le cas, le ou les

engrais apportant ces deux éléments (« engrais de fonds ») dans la combinaison prédéfinie ont été supprimé(s), seul l'engrais apportant l'azote a été conservé pour les simulations.

2.2.4. L'irrigation

L'irrigation est un élément technique fondamental à prendre en compte. En effet, si nous n'étudions pas la réponse en terme de rendement à la fois à l'azote et aux apports d'eau, ces derniers n'en restent pas moins déterminants dans l'élaboration du rendement. De plus, l'eau peut même être considérée comme le facteur limitant de la croissance et du développement de la culture dans certaines régions (en particulier les pays du Sud de l'Europe : Espagne, Portugal, Italie, et Grèce). L'eau n'ayant cependant pas véritablement de prix de marché, elle n'apparaît pas dans les comptabilités et donc pas dans les données du RICA en tant que charge identifiée. Par contre, ce dernier nous fournit des informations sur les surfaces irriguées : au cours de l'étape d'estimation (cf. § 1.1.1.b.iii)) d'AROPAj, on calcule une surface totale irriguée pour chacune des exploitations type.

Connaissant donc la surface irriguée totale de chaque ferme-type, et la surface estimée de chacune des cultures de chaque ferme, nous avons cherché à « répartir » la surface irriguée entre chacune d'elles. Pour cela, nous avons établi, à dires d'experts, un ordre de priorité vis-à-vis de l'irrigation des cultures (*cf.* Tableau 2.15). Cet ordre tient compte de la valorisation de l'irrigation par les cultures : dans une ferme disposant de l'irrigation, cette dernière est en premier destinée au maïs (Debaeke *et al.*, 1998) qui, avec le soja, valorise beaucoup mieux l'irrigation que le tournesol (Cabelguenne *et al.*, 1982), dont la conduite à faibles intrants est favorisée par la PAC (Reau et Wagner, 1994, Deumier *et al.*, 1995, Debaeke *et al.*, 1998). Par ailleurs, les systèmes de production dotés d'irrigation et où la betterave à sucre et la pomme de terre sont cultivées ne sont souvent pas les mêmes que ceux où sont pratiquées les cultures de printemps irriguées citées précédemment. La betterave supportant mieux les déficits hydriques que la pomme de terre, celle-ci est prioritaire pour l'attribution de l'irrigation au sein d'une exploitation.

Pour la culture à irriguer en premier, d'après l'ordre de priorité établi, et présente sur la ferme type, si la surface irriguée disponible permet de couvrir l'ensemble de la surface cultivée,

alors on considère que la culture est irriguée, que tous ses besoins en eau sont satisfaits (il n'y a pas d'irrigation de complément) ; on déduit de la surface irriguée de l'exploitation celle que l'on vient d'allouer. De proche en proche, on répartit ensuite la surface restante entre toutes cultures de l'exploitation. Pour la dernière culture à irriguer, dont la surface cultivée entière ne peut être couverte par la surface irriguée restante, on considère deux options : une culture menée en sec, et une culture irriguée dont les besoins en eau sont satisfaits entièrement. Le statut définitif de ce type de culture est ensuite tranché dans une dernière étape où intervient la prise en compte des critères économiques (voir les détails de la méthode dans le chapitre suivant). Lorsqu'une culture est irriguée, on considère que ses besoins en eau sont toujours comblés par l'irrigation (le paramètres de STICS *ratiol* égale 1) : le mode de calcul automatique des irrigations de STICS (*cf.* 1.1.2.b.vii)) est activé (le paramètre *dosimx*, dose apportée à chaque tour d'eau valant 50 mm).

Priorité vis-à-vis de l'irrigation	Culture
1	*Riz*
2	Cultures sous serre
3	*Soja*
4	Légumes frais de plein champ
5	Légumes autres que légumes frais de plein champ + fleurs
6	Fruits
7	**Pomme de terre**
8	**Betterave sucrière**
9	**Maïs grain**
10	**Maïs ensilage**
11	**Tournesol**
12	**Colza**
13	*Légumineuses fourragères (pois protéagineux)*
14	**Orges**
15	**Blé dur**
16	**Blé**

Légende

- Culture toujours irriguée
- Culture irriguée très souvent
- Culture parfois irriguée
- Culture rarement irriguée
- bleu : Culture présente dans les groupes types mais non modélisée par AROPAj (leur surface cultivée doit cependant être prise en compte)
- *italique* : Culture modélisée par AROPAj mais pas par STICS
- **gras** : Culture modélisée par STICS et AROPAj

Tableau 2.15 Hiérarchie des cultures vis-à-vis de l'irrigation.

2.3. Conclusion

La méthodologie mise au point permet de définir des itinéraires techniques et des conditions de milieu (environnement physique) pour les cultures des fermes types des régions RICA. Deux grands types d'entrées apparaissent en fait : celles dont on a fixé les valeurs a priori, et celles dont on a déterminé un champ de valeurs possibles. Les premières concernent le climat, les types d'engrais, l'irrigation pour certaines cultures, et les apports d'effluents d'élevage. Pour ces entrées, les informations dont nous disposons pour chaque ferme type nous ont permis de fixer des valeurs. Pour les autres entrées : le sol, les dates de semis et variétés, le précédent cultural et l'irrigation de certaines cultures, nous sommes restés dans un premier temps à une détermination d'une gamme de « possibles » à un niveau régional. En effet, compte tenu de l'importance de ces facteurs sur le rendement et du peu d'information à notre disposition pour les déterminer de manière univoque, il nous a paru important de conserver une certaine marge de manoeuvre. Ensuite, c'est au cours de la construction même de la courbe de réponse à l'azote, que ces entrées sont fixées, et que toutes les caractéristiques physiques et techniques sont donc en retour attribuées à chaque ferme-type.

Chapitre 3
Méthode de construction de la courbe

3. Méthode de construction de la courbe

La construction de la courbe de réponse à l'azote proprement dite utilise les entrées de STICS telles qu'elles ont été définies dans le chapitre précédent. Elle se fait en deux temps. Tout d'abord, la prise en compte des hypothèses économiques va permettre de fixer de manière univoque les entrées du modèle STICS pour lesquelles une « gamme de possibles » avait été définie. Dans un deuxième temps, la courbe de réponse à l'azote destinée au modèle économique est élaborée, en tenant compte des différentes sources minérales et organiques d'azote au sein de ce modèle. Cette méthode est présentée à partir d'exemples probants, pris parmi les régions Picardie et Midi-Pyrénées. Ces deux régions françaises illustrent en effet la diversité des situations rencontrées en terme de cultures, de sols, de climat, d'irrigation et d'apports éventuels d'effluents d'élevage.

3.1. Première étape : fixer les entrées de STICS à « possibilités multiples »

Nous avons défini les entrées du modèle STICS : certaines sont déterminées précisément (climat, apports d'azote issus des effluents d'élevage, irrigation dans certains cas, date de semis et précocité dans certains cas). Pour les autres (sol, précédent cultural, date de semis et précocité et irrigation dans certains cas), il est nécessaire de définir une seule valeur parmi un ensemble de valeurs que nous avons déterminées comme possibles. En effet, nous recherchons une seule et unique courbe de réponse à l'azote par culture et ferme type. C'est en exploitant les propriétés économiques de cette courbe que nous avons pu déterminer toutes les entrées de STICS.

3.1.1. Génération de 'familles de courbes' et utilisation des hypothèses économiques pour déterminer la courbe la plus adaptée

3.1.1.a. Génération d'une famille de courbes pour chaque culture de chaque ferme type.

Les entrées possibles du modèle STICS sont combinées pour définir autant de courbes qu'il y a de combinaisons de valeurs retenues pour les paramètres d'entrée restant à déterminer.

Concernant les apports d'engrais azoté, on effectue un balayage par pas de 20 sur une plage de 0 à 600 unités de N/ ha (les valeurs sont élevées pour voir si le modèle simule ou non un plateau). Ceci génère une famille de trente ou soixante jeux de points (*cf.* Tableau 3.1). Sur chacun de ces jeux de données, une courbe de réponse de la forme $r = B - (B - A) \cdot e^{-tN}$ a été ajustée (avec r le rendement de la culture, N, la quantité d'azote provenant de l'engrais, B et A respectivement les rendements maximum et minimum, et t le « taux d'accroissement »). La procédure de régression non linéaire NLIN du logiciel SAS version 8.0[31] a été utilisée pour estimer les paramètres de chacune de ces courbes[32].

Type d'entrée	Modalités	Mode de définition par culture et groupe type
Climat	1	1 fichier climatique : attribué avec la classe d'altitude
Sols	5	critère : 5 premières surfaces régionales de sols « STICS » i.e. sols représentant un ou plusieurs sols de la base européenne identiques entre eux du point de vue des paramètres sol STICS
Variétés	3 ou 1	Selon la culture variétés et dates de semis ont 3 modalités en tout
Date de semis	1 ou 3	
Précédents	2	Blé (non légumineuse) ou pois (légumineuse)
Apports d'engrais de synthèse	Types fixés Doses variables	Type(s) d'engrais fixé, fractionnement en fonction de la dose totale apportée selon la culture, dates d'apports en fonction des stades sensibles donnés en °j
Irrigation	1 ou 2	Sec ou irrigué : détermination en fonction des priorités vis-à-vis de l'eau, de la surface de la culture et de la surface irriguée de l'exploitation, sec et irrigué pour la culture « charnière » (cf.2.2.4)
Apports d'azote organiques	1	quantités et types d'effluents apportés évalués à partir d'ordre de priorité d'épandage des quantités déduites du cheptel animal estimé par AROPAj
Nombre total de courbes générées	1×5×3×2×1 = **30** ou 1×5×3×2×2 = **60**	

Tableau 3.1 Les modalités des entrées de STICS définissant les familles de courbes de réponse à l'azote.

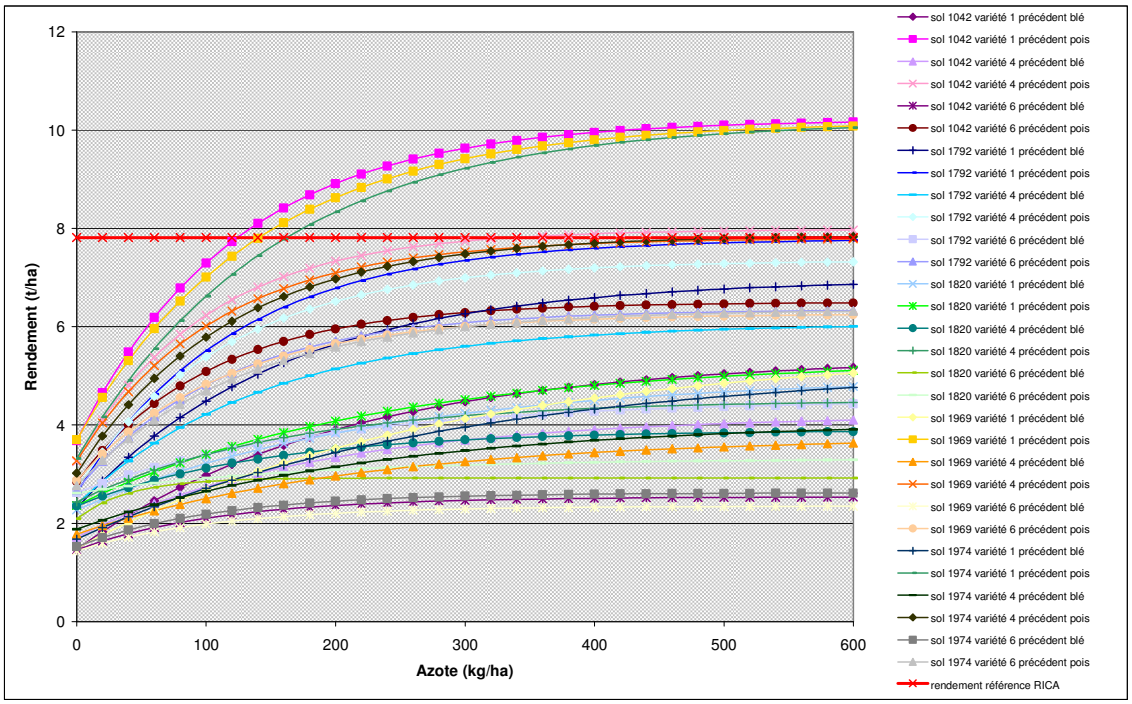
[31] http://v8doc.sas.com/sashtml/

[32] Afin d'initialiser le processus itératif d'ajustement, plusieurs valeurs initiales sont testées, le minimum de la somme des carrés des erreurs initiales détermine le meilleur jeu de paramètres initiaux qui est conservé pour cette initialisation. Le balayage de la gamme (rendement minimal + 10 %, rendement maximal + 10%) par 10 incréments égaux donne les valeurs initiales testées (les rendements minimal et maximal sont ceux de l'ensemble des jeux de données disponibles).

La Figure 3.1 montre un exemple de la gamme des courbes obtenues pour le blé du groupe type 8 (qui représente des exploitations de grandes cultures, OTE 13) de la région Picardie. On observe pour cette culture et ce groupe type que la gamme de courbes de réponse possibles est très étendue. Certaines correspondent à des rendements faibles et peu variables, alors que d'autres montrent un rendement plus sensible à la dose d'azote apportée. On remarque que l'effet variété combiné à l'effet précédent apparaît plus déterminant sur l'effet sol vis-à-vis du rendement. En effet, d'une manière générale, les courbes les plus « plates » et aux rendements les plus faibles correspondent au précédent blé et à la variété Sidéral, alors que les courbes à la croissance plus rapide et atteignant les rendements les plus élevés correspondent à la variété Arminda et au précédent légumineuse. Par contre, le même sol (par exemple, le sol alluvial argilo-limoneux profond 1042) combiné à la variété Arminda et au précédent pois conduit à la courbe à la croissance la plus forte de la gamme et qui permet d'atteindre les rendements les plus forts. Cependant, combiné à la variété Sidéral et au précédent blé, il produit une courbe très peu croissante et aux rendements faibles.

Les fournitures azotées du sol et du précédent cultural sont elles aussi très variables (entraînant des rendements allant de 1.7 t/ha à 3.9 t/ha). Le précédent semble être plus influent que le sol sur la gamme des fournitures azotées et donc des rendements atteignables sans apports d'engrais. On retrouve en effet majoritairement les rendement les plus faibles à intrant azoté nul pour un précédent cultural blé, alors que la fourniture d'azote au sol d'un précédent légumineuse produit des rendements plus élevés à intrant azoté nul.

A partir de cet exemple, on observe que la gamme des courbes de réponse à l'azote qu'il est possible d'obtenir avec les combinaisons d'entrées de STICS sélectionnées résulte bien de leurs interactions. La diversité des situations ne peut s'envisager a priori, ni la prépondérance d'un facteur sur l'autre. Les hypothèses conduisant à la gamme des entrées potentielles de STICS, bien que parfois fortes, peuvent être en partie validées au regard de la variabilité des courbes de réponse obtenues. En conservant 5 sols, 3 variétés et 2 précédents culturaux, nous visions à représenter la variabilité des situations possibles en terme de courbe de réponse pour une culture d'une ferme type. A partir de cet exemple, nous mettons en évidence cette variabilité des courbes de réponse potentielles pour chaque culture de chaque ferme type.



N° de sol	1042	1792	1820	1969	1974
Famille de sol	Fluvisol Eutrique	Cambisol Calcique	Rendzine Orthique	Luvisol Orthique	Cambisol Calcaro-Eutrique

N° groupe de précocité	1	4	6
Variété représentée	Arminda	Soisson	Sidéral

Figure 3.1 Un exemple de gamme de courbes de réponse possibles (blé tendre de la ferme type 8, en Picardie).

La sélection de la courbe de réponse la plus adaptée parmi la gamme de courbes de réponse à l'azote potentielles qui sont construites constitue la seconde étape de la méthode établie.

3.1.1.b. Utilisation des propriétés économiques de la courbe

La détermination de la courbe qui représente le mieux la réponse du rendement de chaque culture à l'azote, repose sur les informations disponibles et les propriétés économiques attendues. Tout d'abord, les estimations des paramètres du modèle AROPAj fournissent une valeur du rendement de chaque culture de chaque ferme type. Avec l'hypothèse de rationalité économique de l'agriculteur, ce rendement qui a été réalisé en 1997 est supposé optimal économiquement et la courbe de réponse à l'azote doit permettre d'atteindre ce rendement

(appelé rendement de référence r^0). Ceci constitue le premier critère de sélection de la courbe parmi la gamme des possibles. Ensuite, toujours en considérant cette hypothèse de rationalité économique, la maximisation de la marge brute, pour un hectare d'une culture j , notée π_j, se traduit par :

$$\max_N \pi_j = p_j \cdot r_j(N) - w_j \cdot N \quad \text{et} \quad N \geq 0$$

avec
p_j : prix de vente de la culture j
r_j : rendement de la culture j
w_j : prix de l'azote de l'engrais attribué à la culture j
N : quantité d'azote issu de l'engrais attribué à la culture j

En écrivant les conditions du premier ordre : $\frac{\partial \pi}{\partial N} = 0 \Leftrightarrow \frac{\partial r_j}{\partial N} = \frac{w}{p_j}$ Ce qui signifie qu'à l'optimum économique (profit maximal), la pente de la tangente à la courbe $r_j\ (N)$ (valeur de la dérivée) égale le rapport du prix de l'azote sur le prix de vente de la culture. Cette propriété nous sert de deuxième critère de sélection de la « bonne » courbe parmi la gamme des possibles et nous l'avons exploitée ainsi : au point d'intersection de la courbe et du rendement référence r^0, la tangente de la meilleure des courbes se rapproche le plus du rapport du prix de l'azote sur celui de la culture.

La Figure 3.2 illustre les deux étapes de sélection de la courbe de réponse la meilleure parmi la gamme : prise en compte du rendement référence, puis de l'hypothèse sur le rapport des prix.

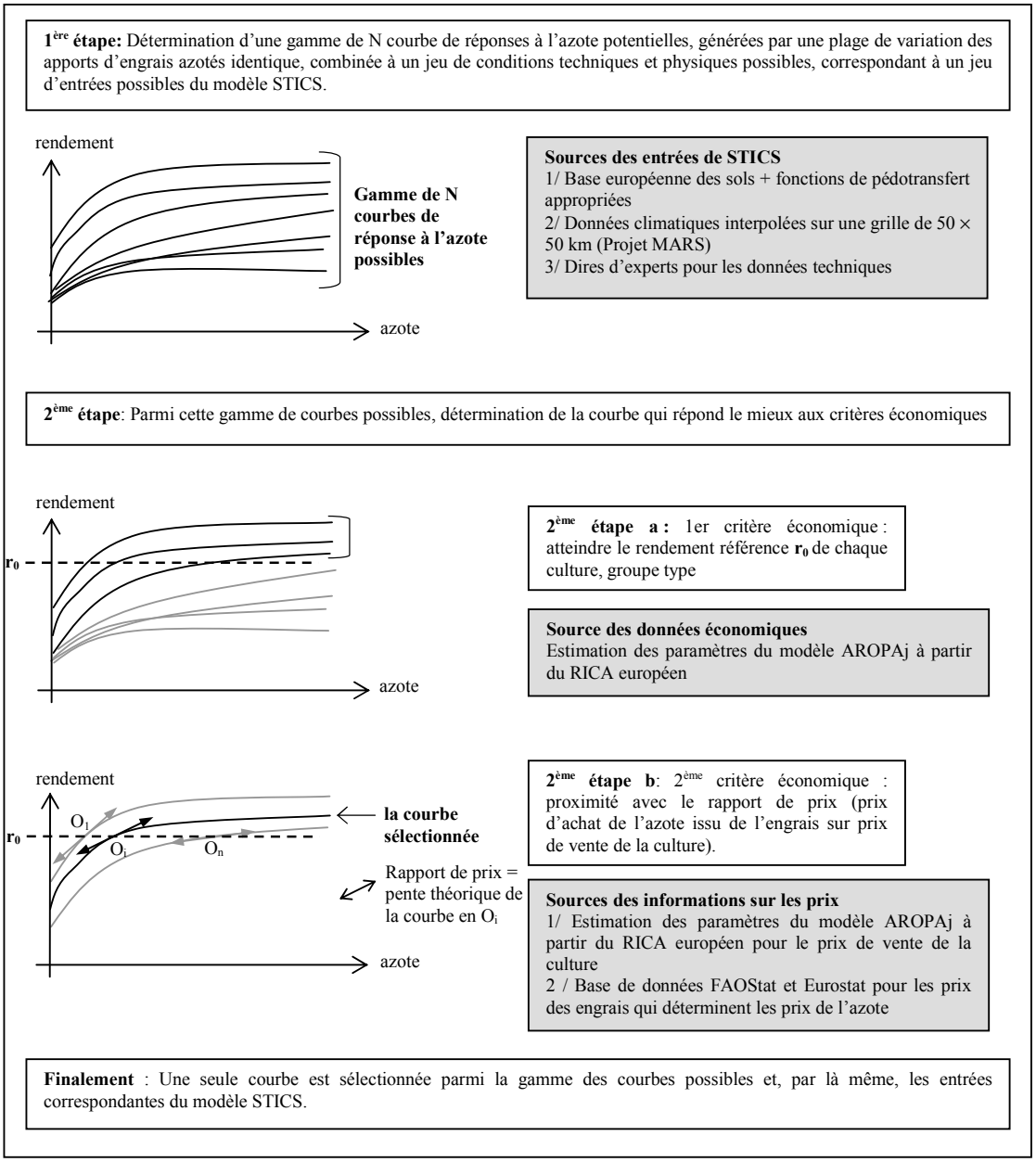


Figure 3.2 La méthode de construction de la courbe de réponse à l'azote pour une culture d'un groupe type, par la combinaison des modèles STICS et AROPAj.

Dans le cas présenté à la Figure 3.1 et repris Figure 3.3, seules sept courbes coupent la droite horizontale du rendement estimé en 1997, et peuvent être sélectionnées selon le premier critère décrit précédemment. Considérant l'apport azoté correspondant au rendement de référence RICA (en pointillé vertical sur la figure) comme la dose permettant d'atteindre l'objectif de rendement (on assimile alors le rendement de référence au rendement objectif),

nous pouvons interpréter les courbes de réponse obtenues au regard de la typologie des courbes de réponse à l'azote proposée par Meynard *et al.*, 1981. Même si la variable observée est le rendement et non le nombre de grains par m², on peut rapprocher les courbes obtenues selon leur type : on retrouve les courbes de type β pour lesquelles le rendement plafonne à un niveau de rendement inférieur à celui de référence. Les courbes de type α correspondent à la courbe retenue ou en sont très proches. Les courbes de type γ conduisent à des rendements inférieurs au rendement référence, l'azote étant encore un facteur limitant, puisque les courbes ne plafonnent pas encore pour des apports proches de l'apport référence (N^0). Enfin, les courbes de types δ sont celles pour lesquelles le rendement de référence est atteint pour des doses inférieures à N_0.

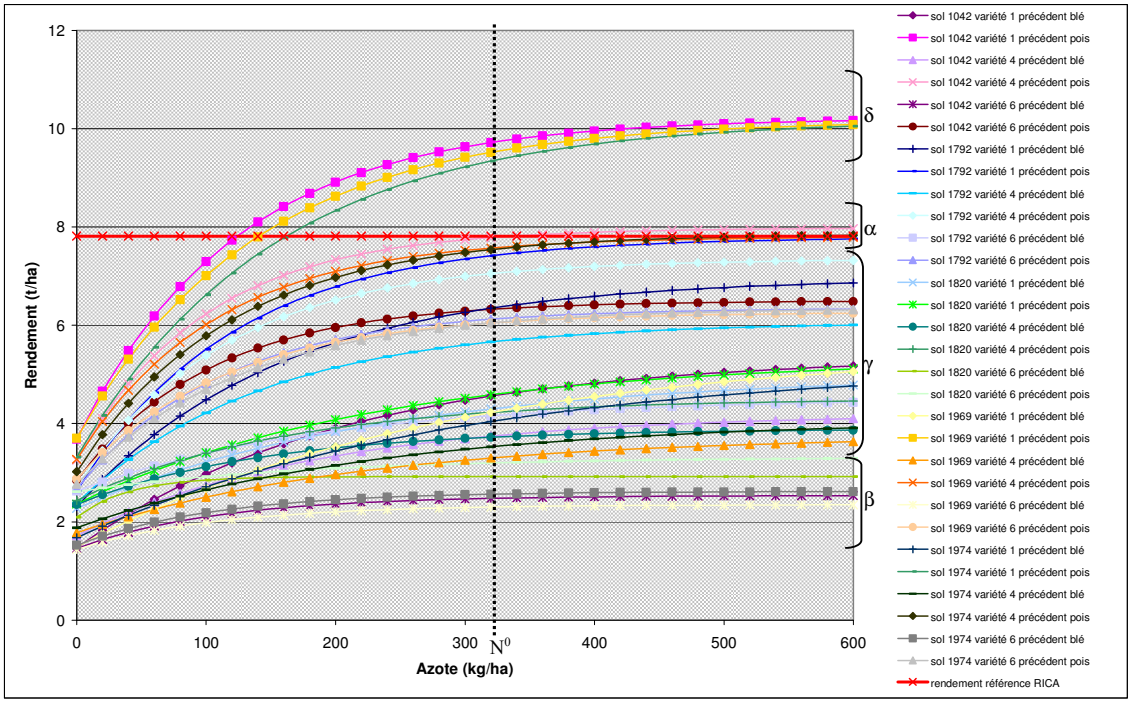


Figure 3.3 Types de courbes de réponse obtenues à partir de l'exemple du blé tendre de la ferme type 8, en Picardie, d'après Meynard *et al.*, 1981.

A la fin de cette étape, nous avons à la fois déterminé, « la meilleure courbe » du point de vue des critères économiques, et les entrées du modèle STICS qui ont permis de l'obtenir. Dans le cas d'apports azotés uniquement en provenance d'engrais synthétique, la courbe de réponse obtenue est également celle qui sera introduite dans le modèle économique. Par contre, dans le cas d'apports azotés par les effluents d'élevage en même temps que ceux de l'engrais, il est nécessaire d'isoler les sources d'azote. En effet, si l'azote organique provenant des effluents d'élevage contribue au rendement de la culture, il est supposé gratuit et n'entre pas dans les charges en engrais (pas de coût d'épandage). Des simulations supplémentaires sont donc nécessaires pour d'une part obtenir des courbes de réponse à l'azote-engrais seul, et d'autre part pouvoir étudier la relation entre les apports organiques et le rendement. Cette étape complémentaire fait l'objet du paragraphe 3.2.

La détermination des entrées parmi la gamme des entrées possibles est soumise aux hypothèses faites sur le type et le prix des engrais synthétiques, puisque la sélection des entrées se fait finalement à partir du critère économique « rapport de prix ». Afin de tester la robustesse de cette hypothèse sur les prix, nous avons effectué une analyse de sensibilité du choix de la courbe de réponse (et des entrées sous-jacentes de STICS) à une variation du prix de l'engrais azoté. Le choix du type d'engrais influence les valeurs de prix, mais également la réponse de la culture elle-même. Effectuer une analyse de sensibilité similaire sur le type d'engrais lui-même aurait demandé de trop nombreuses simulations, nous nous sommes donc limités à une étude de l'influence de la variation des prix de l'engrais.

3.1.2. La sensibilité de la méthode à une variation de prix des engrais azotés

La méthode mise au point permet à la fois de déterminer les entrées du modèle STICS et de construire une courbe de réponse à l'azote issu de l'engrais acheté, et ce, pour chaque culture de chaque ferme type. Nous avons étudié la sensibilité de cette méthode à une variation du prix de l'engrais azoté afin de montrer que, dans une gamme de prix raisonnables, cette méthode est robuste.

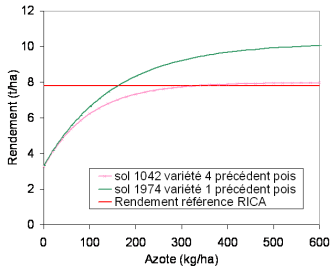
Pour cela, nous avons fait varier les prix de plus ou moins 30 % autour de leur valeur initiale (prix initial p_i), et observé la répercussion de cette variation sur :

- les entrées sélectionnées du modèle STICS, c'est-à-dire : le type de sol, le précédent cultural, et la date de semis ou le groupe de précocité,
- les valeurs des trois paramètres A, B et t de la courbe ajustée $r = B - (B - A) \cdot e^{-tN}$ issue de ces entrées, et
- la valeur N^0 (en kg/ha) de la quantité d'azote apportée correspondant au rendement référence du RICA r^0 , selon cette courbe de réponse.

Nous présentons ci-dessous en détail l'analyse réalisée pour la région Picardie, l'analyse détaillée, les figures et valeurs numériques correspondant à la région Midi-Pyrénées sont présentées en Annexe 7).

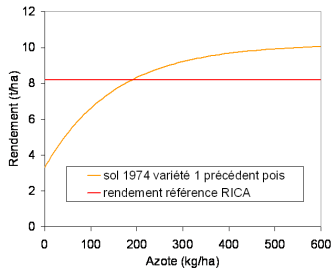
Pour la culture du blé en Picardie, quel que soit le groupe type considéré, une variation de prix de l'engrais azoté de plus ou moins 30 % autour du prix initial entraîne au plus 2 combinaisons d'entrées différentes pour le modèle STICS. Les groupes types 9 et 11 ne présentent qu'une seule combinaison (sol, variété, précédent cultural) chacun, pour la gamme de prix de l'engrais observée. L'attribution des entrées STICS, et par conséquent la courbe de réponse à l'azote qui en découle et la quantité totale d'azote apportée correspondant à r^0, ne sont pas sensibles au prix de l'engrais pour ces deux groupes types. Les groupes types 8 et 10 présentent chacun 2 combinaisons d'entrées différentes : le triplet d'entrées sélectionné pour des prix plus bas que p_i est identique à celui sélectionné avec p_i, alors qu'il en diffère pour des prix plus élevés (au délà de 110% et 105 % respectivement pour les groupes types 8 et 10). Pour le groupe type 8, seul le sol est sensible à la variation de prix, pour le groupe type 10, la variété et le sol sont modifiés. Les courbes de réponse obtenues sont alors différentes, et les quantités d'azote N^0 également. Les valeurs observées peuvent apparaître peu réalistes (plus de 300 U/ha) ou au contraire plausibles, comparées aux pratiques de fertilisation régionales (environ 160 U/ha contre 189 U/ha d'après l'Enquête sur les pratiques culturales en 2001, Rabaud et Cesse, 2004 en Picardie). D'une manière générale, en ce qui concerne le blé, l'attribution des entrées de STICS est peu sensible au prix de l'engrais azoté. La méthode mise au point conduit à sélectionner des entrées identiques, sauf pour des prix plus élevés que celui utilisé. Elle est très robuste pour le précédent cultural qui est toujours le même, lorsque 2 combinaisons d'entrées STICS sont observées. Par contre, les quantités d'azote correspondant à r^0 ne sont pas toujours réalistes, elles ne constituent qu'une première estimation d'un apport azoté optimal et ne remettent pas en cause la méthode.

Prix de l'engrais azoté	Sol	Groupe de précocité	Précédent cultural	A	B	t	N^0	Représentation graphique des courbes correspondantes
0.70 p_i								
0.75 p_i								
0.80 p_i								
0.85 p_i	1042	4	légumineuse	3.257	7.98	0.00994	337.536	
0.90 p_i								
p_i								
1.05 p_i								
1.10 p_i								
1.15 p_i								
1.20 p_i								
1.25 p_i	1974	1	légumineuse	3.319	10.186	0.00655	162.28	
1.30 p_i								
1.35 p_i								



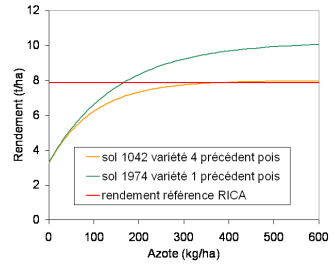
a. Blé Picardie groupe type 8

Prix de l'engrais azoté	Sol	Groupe de précocité	Précédent cultural	A	B	t	N^0	Représentation graphique des courbes correspondantes
0.70 p_i								
0.75 p_i								
0.80 p_i								
0.85 p_i								
0.90 p_i								
p_i								
1.05 p_i	1974	1	légumineuse	3.319	10.186	0.00655	190.36	
1.10 p_i								
1.15 p_i								
1.20 p_i								
1.25 p_i								
1.30 p_i								
1.35 p_i								



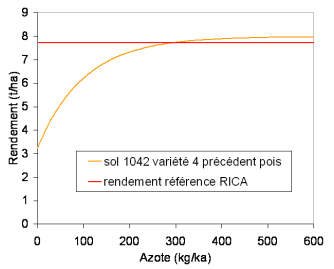
b. Blé Picardie groupe type 9

Prix de l'engrais azoté	Sol	Groupe de précocité	Précédent cultural	A	B	t	N^0	Représentation graphique des courbes correspondantes
0.70 p_i								
0.75 p_i								
0.80 p_i								
0.85 p_i	1042	4	légumineuse	3.257	7.98	0.00994	374.663	
0.90 p_i								
p_i								
1.05 p_i								
1.10 p_i								
1.15 p_i								
1.20 p_i								
1.25 p_i	1974	1	légumineuse	3.319	10.186	0.00655	165.59	
1.30 p_i								
1.35 p_i								



c. Blé Picardie groupe type 10

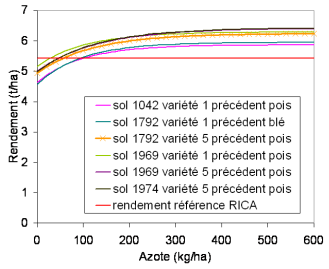
Prix de l'engrais azoté	Sol	Groupe de précocité	Précédent cultural	A	B	t	N^0	Représentation graphique des courbes correspondantes
0.70 p_i								
0.75 p_i								
0.80 p_i								
0.85 p_i								
0.90 p_i								
p_i								
1.05 p_i	1042	4	légumineuse	3.257	7.98	0.00994	289.832	
1.10 p_i								
1.15 p_i								
1.20 p_i								
1.25 p_i								
1.30 p_i								
1.35 p_i								



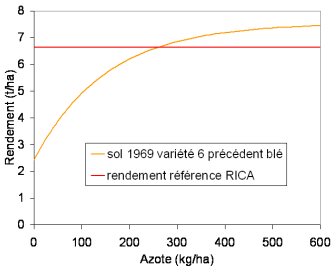
d. Blé Picardie groupe type 11

Figure 3.4 Sensibilité au prix de l'engrais des entrées STICS et courbes de réponse du blé en Picardie

Le blé dur laisse apparaître des situations qui semblent contrastées : aucune sensibilité de la méthode pour le groupe type 9, et six triplets d'entrées différents pour le groupe 8. Cependant, dans ce dernier cas, les courbes de réponse obtenues sont très semblables et parfois quasiment confondues, bien qu'issues de combinaisons d'entrées de STICS différentes. La répercussion sur la valeur de N^0 est plus variable : 3 combinaisons d'entrées STICS conduisent à des valeurs de N^0 semblables à celle obtenue avec p_i, les autres combinaisons menant soit à des valeurs de N^0 double ou moitié de celle obtenue avec p_i. Cependant, comme nous l'avons déjà souligné, ces valeurs ne constituent qu'une première estimation d'un apport azoté optimal et ne remettent pas en cause la méthode. Finalement, la culture de blé dur confirme également la robustesse de la méthode mise au point pour construire une courbe de réponse à l'azote.

Prix de l'engrais azoté	Sol	Groupe de précocité	Précédent cultural	A	B	t	N^0	Représentation graphique des courbes correspondantes
0.70 p_i	1042	1	légumineuse	4.631	5.864	0.01033	100.44	
0.75 p_i								
0.80 p_i	1792	1	blé	4.57	5.948	0.01041	93.511	
0.85 p_i								
0.90 p_i								
p_i	1792	5	légumineuse	4.94	6.244	0.00829	56.495	
1.05 p_i								
1.10 p_i								
1.15 p_i	1969	5	légumineuse	5.002	6.41	0.00773	46.518	
1.20 p_i								
1.25 p_i	1974	5	légumineuse	4.986	6.423	0.00799	45.935	
1.30 p_i	1969	1	légumineuse	5.156	6.29	0.00963	28.351	
1.35 p_i								

a. Blé dur Picardie groupe type 8

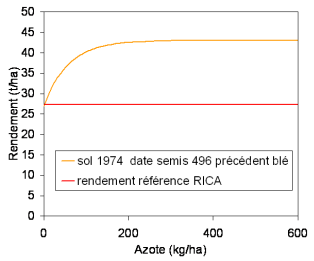
Prix de l'engrais azoté	Sol	Groupe de précocité	Précédent cultural	A	B	t	N^0	Représentation graphique des courbes correspondantes
0.70 p_i	1969	6	blé	2.425	7.545	0.00667	258.235	
0.75 p_i								
0.80 p_i								
0.85 p_i								
0.90 p_i								
p_i								
1.05 p_i								
1.10 p_i								
1.15 p_i								
1.20 p_i								
1.25 p_i								
1.30 p_i								
1.35 p_i								

b. Blé dur Picardie groupe type 9

Figure 3.5 Sensibilité au prix de l'engrais des entrées STICS et des courbes de réponse du blé dur en Picardie

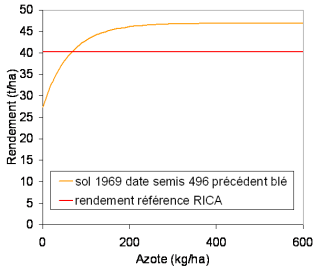
En ce qui concerne la pomme de terre, la méthode se montre insensible aux variations de prix pour les trois fermes types (8, 9 et 10) qui la cultivent : elle est très robuste pour cette culture.

Prix de l'engrais azoté	Sol	Date de semis	Précédent cultural	A	B	t	N^0	Représentation graphique des courbes correspondantes
0.70 p_i								
0.75 p_i								
0.80 p_i								
0.85 p_i								
0.90 p_i								
p_i								
1.05 p_i	1974	496	blé	26.975	43.052	0.01738	1.438	
1.10 p_i								
1.15 p_i								
1.20 p_i								
1.25 p_i								
1.30 p_i								
1.35 p_i								



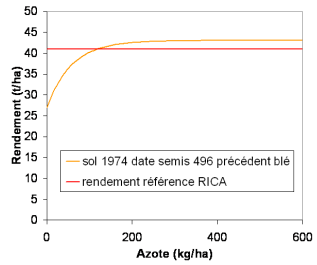
a. Pomme de terre Picardie groupe type 8

Prix de l'engrais azoté	Sol	Date de semis	Précédent cultural	A	B	t	N^0	Représentation graphique des courbes correspondantes
0.70 p_i								
0.75 p_i								
0.80 p_i								
0.85 p_i								
0.90 p_i								
p_i								
1.05 p_i	1974	496	blé	26.975	43.052	0.01738	101.288	
1.10 p_i								
1.15 p_i								
1.20 p_i								
1.25 p_i								
1.30 p_i								
1.35 p_i								



b. Pomme de terre Picardie groupe type 9

Prix de l'engrais azoté	Sol	Date de semis	Précédent cultural	A	B	t	N^0	Représentation graphique des courbes correspondantes
0.70 p_i								
0.75 p_i								
0.80 p_i								
0.85 p_i								
0.90 p_i								
p_i								
1.05 p_i	1974	496	blé	26.975	43.052	0.01738	119.243	
1.10 p_i								
1.15 p_i								
1.20 p_i								
1.25 p_i								
1.30 p_i								
1.35 p_i								

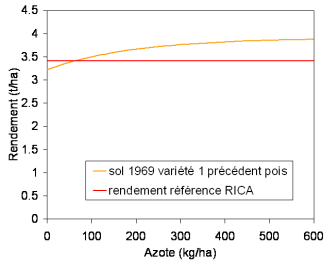


c. Pomme de terre Picardie groupe type 10

Figure 3.6 Sensibilité au prix de l'engrais des entrées STICS et des courbes de réponse de la pomme de terre en Picardie

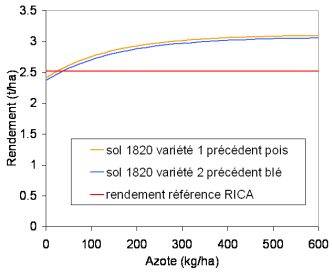
Le tournesol confirme lui aussi que la méthode est robuste : les groupes types 8 et 9 le cultivant ne montrent qu'une seule combinaison d'entrée de STICS, sauf pour le groupe type 9 et un prix diminué de 30% exactement. De plus, les courbes de réponse obtenues sont alors très similaires et quasiment confondues, de même que les valeurs de N^0 correspondant à chacune d'elles.

Prix de l'engrais azoté	Sol	Groupe de précocité	Précédent cultural	A	B	t	N^0	Représentation graphique des courbes correspondantes
0.70 p_i								
0.75 p_i								
0.80 p_i								
0.85 p_i								
0.90 p_i								
p_i								
1.05 p_i	1969	1	légumineuse	3.224	3.905	0.00526	63.039	
1.10 p_i								
1.15 p_i								
1.20 p_i								
1.25 p_i								
1.30 p_i								
1.35 p_i								



a. Tournesol Picardie groupe type 8

Prix de l'engrais azoté	Sol	Groupe de précocité	Précédent cultural	A	B	t	N^0	Représentation graphique des courbes correspondantes
0.70 p_i	1820	2	blé	2.372	3.071	0.00655	35.32	
0.75 p_i								
0.80 p_i								
0.85 p_i								
0.90 p_i								
p_i								
1.05 p_i	1820	1	légumineuse	2.416	3.109	0.00681	23.025	
1.10 p_i								
1.15 p_i								
1.20 p_i								
1.25 p_i								
1.30 p_i								
1.35 p_i								

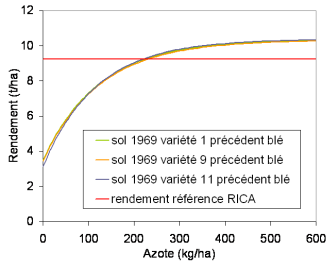


b. Tournesol Picardie groupe type 9

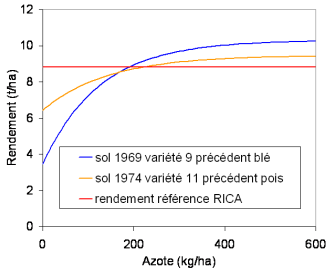
Figure 3.7 Sensibilité au prix de l'engrais des entrées STICS et des courbes de réponse du tournesol en Picardie

Le maïs en Picardie apparaît comme la culture pour laquelle la méthode se montre la plus sensible en ce qui concerne l'attribution des entrées STICS : au moins 2 et au plus 3 triplets d'entrées de STICS apparaissent pour la gamme de prix observée. Pour les groupes types 8 et 10 qui présentent trois combinaisons d'entrées possibles, c'est la variété qui est affectée par la variation de prix. Par contre, les trois courbes obtenues sont quasiment superposées, et la méthode est donc robuste pour la détermination de la courbe de réponse à l'azote dans ces cas-là, ainsi que pour la valeur de N^0. Pour le groupe type 9, les trois entrées sont affectées par

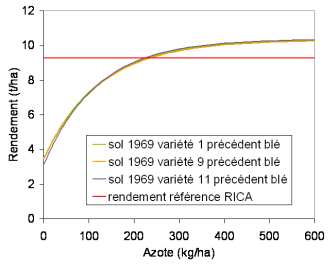
les prix, au-delà de 110 % du prix initial, ce qui conduit à des courbes assez différentes, mais à des valeurs de N^0 de même ordre de grandeur.

Prix de l'engrais azoté	Sol	Groupe de précocité	Précédent cultural	A	B	t	N^0	Représentation graphique des courbes correspondantes
0.70 p_i	1969	9	blé	3.452	10.31	0.00805	230.35	
0.75 p_i								
0.80 p_i								
0.85 p_i								
0.90 p_i								
p_i								
1.05 p_i								
1.10 p_i								
1.15 p_i								
1.20 p_i	1969	1	blé	3.509	10.357	0.0081	223.578	
1.25 p_i	1969	11	blé	3.124	10.37	0.00848	218.825	
1.30 p_i								
1.35 p_i								

a. Maïs Picardie groupe type 8

Prix de l'engrais azoté	Sol	Groupe de précocité	Précédent cultural	A	B	t	N^0	Représentation graphique des courbes correspondantes
0.70 p_i	1974	11	légumineuse	6.436	9.473	0.00702	218.508	
0.75 p_i								
0.80 p_i								
0.85 p_i								
0.90 p_i								
p_i								
1.05 p_i								
1.10 p_i								
1.15 p_i	1969	9	blé	3.452	10.31	0.00805	189.387	
1.20 p_i								
1.25 p_i								
1.30 p_i								
1.35 p_i								

b. Maïs Picardie groupe type 9

Prix de l'engrais azoté	Sol	Groupe de précocité	Précédent cultural	A	B	t	N^0	Représentation graphique des courbes correspondantes
0.70 p_i	1969	9	blé	3.452	10.31	0.00805	234.465	
0.75 p_i								
0.80 p_i								
0.85 p_i								
0.90 p_i								
p_i								
1.05 p_i								
1.10 p_i	1969	1	blé	3.509	10.357	0.0081	227.491	
1.15 p_i								
1.20 p_i	1969	11	blé	3.124	10.37	0.00848	222.518	
1.25 p_i								
1.30 p_i								
1.35 p_i								

c. Maïs Picardie groupe type 10

Figure 3.8 Sensibilité au prix de l'engrais des entrées STICS et des courbes de réponse du maïs en Picardie

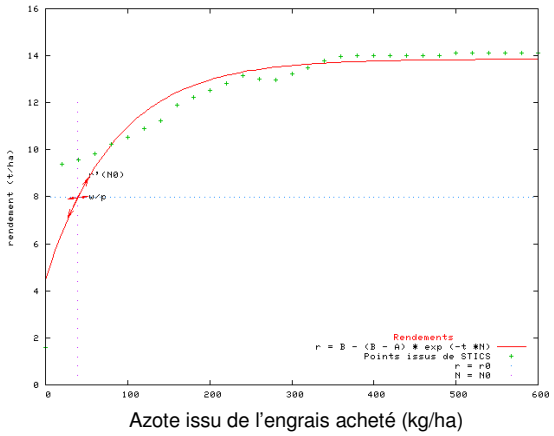
Nous observons globalement le même type de résultats en région Midi-Pyrénées, y compris pour les cultures plus spécifiques de cette région, c'est-à-dire le blé dur et le maïs irrigué. Les entrées du modèle STICS sélectionnées et les courbes de réponse se montrent stables et peu sensibles aux variations de prix de l'engrais (*cf.* Annexe 7).

En conclusion, pour les cultures pratiquées en Picardie et en Midi-Pyrénées, nous observons que les entrées de STICS sélectionnées sont assez peu sensibles à la variation des prix. Lorsqu'elles le sont, les courbes de réponse à l'azote qui en découlent sont généralement très peu différentes. La méthode mise au point pour sélectionner les entrées de STICS et donc attribuer des conditions physique et techniques aux fermes types se montre donc peu sensible à la variation de prix. Pour les cas où la sensibilité de la méthode est plus forte, la courbe de réponse à l'azote construite par les diverses entrées sélectionnées est elle-même peu variable : la méthode se montre robuste.

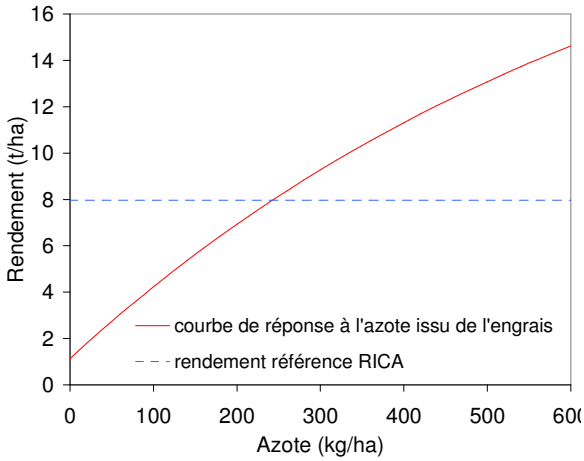
3.2. Deuxième étape : déterminer les courbes de réponse à l'azote acheté ou produit sur la ferme

3.2.1. Les courbes de réponse à l'azote issu de l'engrais

Comme nous l'avons déjà souligné, dans le cas d'apports azotés provenant uniquement d'engrais achetés, la courbe de réponse à l'azote est entièrement fixée lors de la première étape de la méthodologie (cf. § 3.1). Dans le cas d'apports azotés à la fois par les engrais et par les effluents de la ferme type, il est nécessaire d'effectuer des simulations ayant pour unique apport azoté celui du ou des engrais. Les entrées sélectionnées à l'étape précédente (sol, variété ou date de semis, précédent cultural et éventuellement régime d'irrigation), ainsi que le climat qui était déjà fixé auparavant, sont utilisés. On procède de la même manière que lors de l'étape 1, pour ajuster sur les sorties de STICS une forme fonctionnelle similaire : on utilise la même procédure SAS et les mêmes options.



A. Courbe ajustée sur les points obtenus à la fin de l'étape 1



B. Courbe ajustée sur les points issus des simulations avec l'engrais azoté comme seule sources d'azote

Figure 3.9 Les deux étapes de construction de la courbe de réponse à l'azote du maïs grain du groupe type 16 en Midi-Pyrénées

La Figure 3.9 représente pour le groupe type 16 de la région Midi-Pyrénées la courbe de réponse à l'engrais obtenue à la fin de l'étape 1 d'une part (apport azotés d'engrais et d'effluents) et celle obtenue avec de l'engrais comme seul apport d'azote.

L'apport de 6.31 t de fientes sèches de volailles qui est pris en compte dans la première étape (Figure 3.9 courbe A) conduit à des rendements élevés, même sans aucun apport d'engrais azoté. Le rendement atteint pour une quantité nulle d'apport d'engrais indique que l'équivalent des 6.31 t/ha de fientes apportées équivaut à environ 300 unités d'azote dans les mêmes conditions techniques et pédo-climatiques. Cet exemple confirme qu'il est nécessaire de prendre en compte les apports organiques en plus des apports minéraux provenant des engrais synthétiques pour ne pas sous-estimer le rendement pouvant être atteint dans des conditions pédo-climatiques et techniques données. Ceci influencerait directement l'attribution des paramètres d'entrée de STICS. Par contre, le rendement de référence estimé à partir des données du RICA peut, dans certains cas ne pas être atteint avec pour un apport azoté de provenant seulement de l'engrais synthétique (courbe B Figure 3.9) dans les conditions de sol, de variété et de précédent cultural sélectionnées avec un apport « incompressible » de fumures organiques produites sur la ferme (*cf.* par exemple cas du tournesol des groupes types 19 et 20 en Midi-Pyrénées, Annexe 7).

3.2.2. Les courbes de réponse à l'azote provenant des effluents d'élevage

Les apports de fumiers, lisier et autres effluents d'élevage aux cultures constituent une source d'azote complémentaire à celle de l'engrais (en plus des fournitures du sol et des résidus éventuels de cultures intermédiaires ou de la culture précédente de la rotation). Etudier l'influence de l'azote issu des effluents d'élevage sur le rendement est plus complexe que d'étudier la relation entre l'azote provenant de l'engrais et le rendement. En effet, il est difficile de constituer une typologie de ces effluents, et celle que nous proposons en annexe (voir Annexe 6.C) se révèle nécessairement réductrice, mais indispensable à notre travail. Non seulement les compositions initiales des effluents sont très variables d'un produit à l'autre, mais aussi même pour un produit donné : ces compositions dépendent de la physiologie de l'animal, du mode de conduite de l'élevage (nature - paille, sciure, copeaux - et quantité de litière, composition et mode de distribution de l'alimentation). D'autre part, ces compositions ne sont pas stables dans le temps et dépendent fortement des conditions de stockages et éventuels traitements que subissent les déjections (séchage, compostage, séparation de phase par centrifugation ou traitement biologique). De plus, les effluents contiennent à la fois de l'azote minéral mais aussi de l'azote organique qui est minéralisé plus ou moins facilement et rapidement selon : le rapport C/N de l'effluent, les conditions d'humidité et de température du sol (elles-mêmes soumises au climat).

Afin de limiter le nombre de paramètres et de pouvoir se ramener à une courbe de réponse à l'engrais « de référence » (*i.e.* celui qui a été attribué à chaque culture de chaque ferme type), nous avons cherché à définir des « coefficients d'équivalence » entre les différents types d'effluents et cet engrais « de référence ». Pour cela, nous avons construit des courbes de réponses à chaque type d'effluent indépendamment des autres sources d'azote : nous avons effectué des séries simulations avec STICS avec des apports croissants de chaque type de déjection animale. Nous avons fait pour ces courbes les hypothèses suivantes :

- La courbe de réponse à l'azote total de chaque effluent E a la même forme fonctionnelle générique que celle de la courbe de réponse à l'azote-engrais :

  $r = B - (B - A) \cdot e^{-T_E N_E}$ (avec r le rendement de la culture, N_E, la quantité totale d'azote provenant de l'effluent E, B et A respectivement les rendements maximum et minimum, et T_E le « taux d'accroissement » propre à l'effluent E)

- Les rendements minimum et maximum sont fixés et égaux à ceux obtenus avec l'engrais de référence (i.e. on conserve les mêmes valeurs des paramètres *A* et *B* obtenues avec de l'engrais seul comme apport azoté, pour chaque culture de chaque groupe type). Ceci se justifie car, à apport d'azote nul, et toutes conditions égales par ailleurs, le rendement de la culture doit être le même quelle que soit la source d'azote. De même, le rendement maximum pouvant être atteint en condition non limitantes en azote, doit être identique quelle que soit la source d'azote (même si, dans la pratique, les conditions non limitantes en azote ne sont pas rencontrées pour des quantités d'effluents apportées raisonnables).
- Le domaine de validité de la courbe de réponse est limité aux doses maximales épandables fixées pour chaque effluent : c'est-à-dire : 50 t/ha pour les fumiers, 40 m^3/ha pour les lisiers, et 20 t/ha pour les fientes sèches de volailles.

Ainsi, on peut définir simplement des coefficients d'équivalence entre les apports azotés des effluents et ceux de l'engrais de référence, comme le rapport des deux coefficients *t* et T_E :

$$r = B - (B - A) \cdot e^{-T_E N_E} = r = B - (B - A) \cdot e^{-tN} \Rightarrow T_E N_E = tN \text{ soit } N_E = \frac{t}{T_E} N$$

Cette relation n'est valable que pour le domaine de validité que nous avons précisé pour chaque effluent (cf. 2.2.3.b La fertilisation azotéeAvec les effluents d'élevage).

Un exemple de courbes de réponse à l'azote des différents effluents est présenté Figure 3.10 pour le maïs du groupe type 16 de la région Midi-Pyrénées. Les valeurs du paramètre T_E des courbes de réponse, et les coefficients d'équivalence entre l'azote provenant des effluents et celui de l'engrais sont présentés dans le Tableau 3.2.

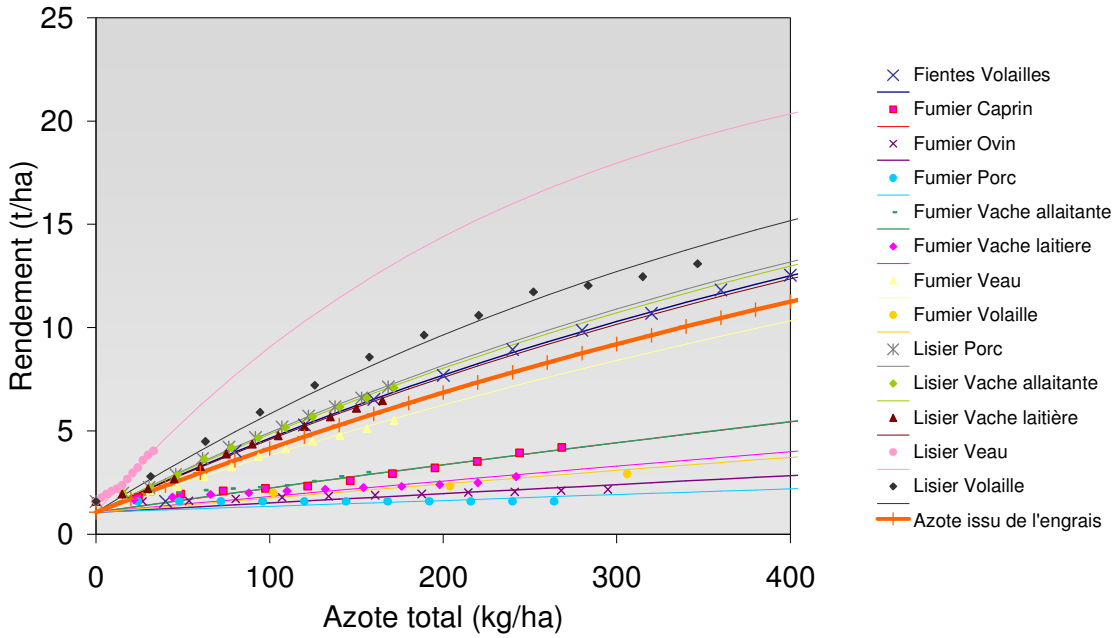


Figure 3.10 Réponse à l'azote provenant des différents effluents animaux pour le maïs grain du groupe type 16 en Midi-Pyrénées (points issus de STICS et courbes ajustées).

On vérifie que les lisiers, ainsi que les fientes de volaille, plus riches en azote minéral que les fumiers, produisent des courbes de réponse proche de celles obtenues avec des engrais uniquement minéraux. Les coefficients d'équivalence sont proches de 1 pour ces effluents.

On retrouve les courbes issues des fumiers, moins riches en azote minéral que les fumiers, moins proches de la courbe issue de l'engrais synthétique, et atteignant des rendements similaires pour des quantités apportées beaucoup plus importantes.

Les déjections de veaux, très concentrées en azote minéral produisent des courbes qui montrent un azote plus efficace vis-à-vis du rendement : le lisier de veau est le plus efficace de tous les apports, le fumier de veau est le plus efficace de tous les fumiers. Contrairement aux autres fumiers, son coefficient d'équivalence est de l'ordre de 1 (ce qui est similaire à ceux des lisiers et fientes).

Source d'azote	T_E	Coefficient d'équivalence (t/T_E)
Fientes Volailles	0.00161	1.17187175
Fumier Caprin	0.00050	0.36416012
Fumier Ovin	0.00019	0.13912635
Fumier Porc	0.00012	0.08790799
Fumier Vache allaitante	0.00050	0.36514222
Fumier Vache laitière	0.00032	0.23581231
Fumier Veau	0.00121	0.88194675
Fumier Volaille	0.00029	0.21304387
Lisier Porc	0.00175	1.27127898
Lisier Vache allaitante	0.00171	1.24071037
Lisier Vache laitière	0.00158	1.14928672
Lisier Veau	0.00403	2.93086662
Lisier Volaille	0.00220	1.60058343
Engrais synthétique (ici ammonitrate et ternaire 15 15 15)	**0.00138**	

Tableau 3.2 Paramètres des courbes de réponse à l'azote et coefficients d'équivalence entre azote provenant des effluents d'élevage et d'engrais synthétique pour le maïs du groupe type 16 en Midi-Pyrénées.

Ainsi, nous avons pu définir une courbe de réponse à l'azote en provenance de l'engrais pour chaque culture de chaque groupe type. De plus cette courbe sert également de référence aux apports organique des effluents d'élevage qu'il peut y avoir sur les cultures des fermes types. On peut s'y ramener par l'intermédiaire de coefficients d'équivalence spécifiques de chaque culture de chaque groupe type régional.

3.3. Conclusion

La méthode mise au point pour construire les courbes de réponse à l'azote prend en compte la diversité des fermes types du modèle AROPAj à travers leurs caractéristiques techniques, physiques et économiques. Cette méthode permet en effet d'attribuer aux différentes cultures de ces fermes, de manière non équivoque, un type de sol, une variété et une date de semis, un précédent, et selon les cas, l'utilisation de l'irrigation. L'analyse de sensibilité aux variations des prix de l'engrais a montré que ce mode d'affectation était robuste, et les courbes construites peu sensibles aux variations de prix. Ceci valide les hypothèses faites sur les prix

des engrais sur lesquelles repose la méthode de construction de la courbe de réponse à l'azote. La courbe construite pour chaque culture de chaque ferme type répond ainsi aux attentes économiques, tout en intégrant les caractéristiques techniques de la fertilisation azotée, par l'intermédiaire des entrées du modèle STICS. Elle peut prendre en compte l'azote provenant des déjections animales produites sur la ferme type par l'intermédiaire de coefficients d'équivalence. Les courbes de réponse obtenues vont ensuite être évaluées avant d'être intégrées dans le modèle économique AROPAj, puis soumises à un changement de climat. Ces trois volets constituent les trois chapitres de la deuxième partie.

Deuxième partie
Evaluation et utilisation des courbes de réponse à l'azote

Chapitre 4
Evaluation des courbes de réponse à l'azote

4. Evaluation des courbes de réponse à l'azote

Ce chapitre est consacré à un essai de validation, par différentes approches, des courbes de réponse à l'azote obtenues par la méthode présentée précédemment. Nous présentons tout d'abord les régions qui ont servi de test à cette validation. Ensuite, nous discutons des entrées du modèle STICS attribuées à chaque ferme type. Enfin, le dernier paragraphe met en évidence la variabilité des courbes de réponse à l'azote et montre leur cohérence avec les références de la littérature. Ainsi, nous analysons les résultats en terme de variabilité physique et technique prise en compte par le modèle qui s'exprime aussi dans la variabilité des courbes de réponse obtenues selon la localisation, la culture, le groupe type, et la source d'azote (engrais ou différents effluents d'élevage).

4.1. Présentation des régions tests

Les régions utilisées pour présenter les résultats méthodologiques ont été choisies pour leur diversité en terme de : climat, altitude, sols, cultures pratiquées, pratiques culturales et types d'exploitations. Les tableaux ci-dessous présentent les caractéristiques des deux régions Picardie et Midi-Pyrénées.

La Picardie apparaît comme une région où les grandes cultures dominent et où l'élevage est peu présent. Dans les fermes types d'AROPAj, on distingue 3 fermes types (8, 9 et 10) où les grandes cultures sont majoritaires dans la SAU, et une seule ferme type d'élevage qui représente pêle-mêle les exploitations laitières, d'élevage allaitant ou de hors –sol de la région. En raison de son homogénéité pédoclimatique et en terme de types d'exploitations agricoles, seulement 4 groupes types représentent la Picardie dans le modèle AROPAj. Dans notre échantillon régional, la betterave et la pomme de terre sont principalement présentes dans cette région.

La région Midi-Pyrénées présente des conditions pédoclimatiques variées, et des cultures qui lui sont plus spécifiques parmi les régions test : le blé dur et le maïs irrigué. Elle est constituée de 12 fermes types, appartenant aux trois classes d'altitude, majoritairement parmi les classes 1 et 2. Les surfaces en prairies et fourrages y sont importantes, surtout pour les groupes types 19 à 26, où elles représentent plus de 50% de la SAU.

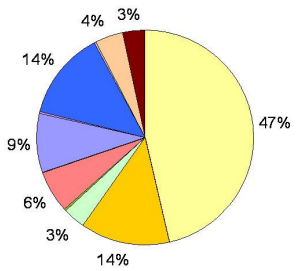
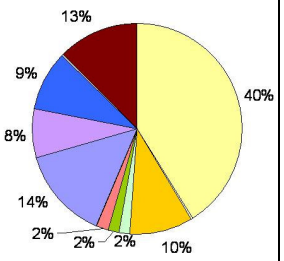
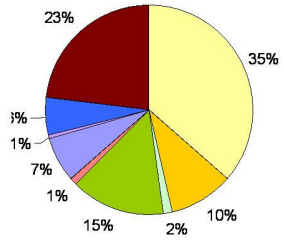
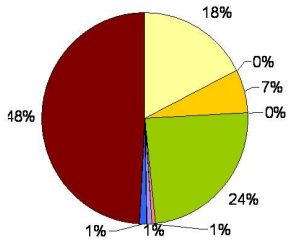
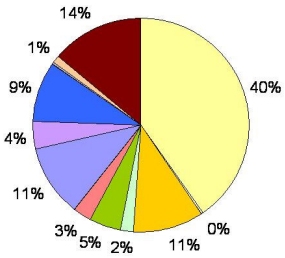
	Groupe type 8	Groupe type 9	Groupe type 10	Groupe type 11	Picardie
OTE représentées	13	14	81	411, 412, 43,71,82,5	13, 14, 81, 411, 412, 43, 71, 82, 5
« Cultivateur » ou « Eleveur »	Cultivateur	Cultivateur	Eleveur	Eleveur	
Altitudes représentées	1	1	1	1	1
Altitude moyenne	1	1	1	1	1
Population réelle représentée	2 819	4 786	2 116	1 002	10 723
Population de l'échantillon	98	106	64	37	
SAU totale représentée (ha)	297 465	615 590	188 646	66 375	1 168 076
SAU du groupe type (ha)	105.5	128.6	89.1	66.242699	
Assolement du groupe type (en% de la SAU)						

Tableau 4.1 Les caractéristiques des groupes types de la région Picardie

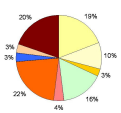
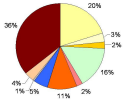
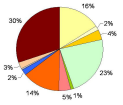
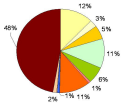
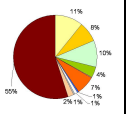
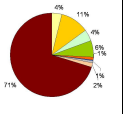
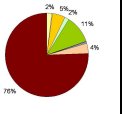
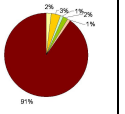
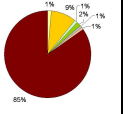
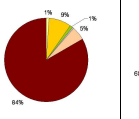
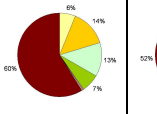
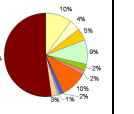
	Groupe type 15	Groupe type 16	Groupe type 17	Groupe type 18	Groupe type 19	Groupe type 20	Groupe type 21	Groupe type 22	Groupe type 23	Groupe type 24	Groupe type 25	Groupe type 26	Midi-Pyrénées
OTE représentées	13	13	14	6	81	6,81	411, 412, 42, 71, 44	411, 412, 43	42,71	44	44	82, 72, 5	Toutes[33]
« Cultivateur » ou « Eleveur »	Cultivateur	Cultivateur	Cultivateur	Cultivateur	Eleveur	Eleveur	Eleveur	Eleveur	Eleveur	Eleveur	Eleveur	Eleveur	
Altitudes représentées	1	2	1,2	1	1	2,3	1	2,3	2,3	2	3	1,2,3	1,2,3
Altitude moyenne	1	2	1	1	1	2	1	2	2	2	3	1	2
Population réelle représentée	8719	1756	1501	1927	1965	872	2711	3676	6032	2946	1430	1004	34 539
Population de l'échantillon	125	21	21	37	29	18	29	45	45	40	25	22	
SAU totale représentée (ha)	630 190	120 395	93 396	83 175	117 460	63 729	99 714	178 246	317 839	152 960	92 355	30 563	1 980 023
SAU du groupe type (ha)	72.2778	68.5622	62.2222	43.1628	59.7762	73.0838	36.7811	48.4892	52.6922	51.9214	64.5842	30.4412	
Assolement du groupe type (en % de la SAU)														

Tableau 4.2 Les caractéristiques des groupes types de la région Midi-Pyrénées

[33] Toutes les OTE : 13, 14, 6, 81, 411, 412, 43, 42, 71, 44, 82, 72 et 5, voir la signification exacte en Annexe 2

4.2. Discussion des entrées de STICS attribuées à chaque ferme type par région

Les entrées de STICS attribuées à chaque culture de chaque groupe type permettent de définir, pour chacune d'elles un itinéraire technique simplifié. Pour les deux régions test, nous analysons la cohérence des quatre groupes de paramètres d'entrée de STICS attribués à chaque de chaque groupe type :

- le type de sol,
- la position et la longueur du cycle (suivant les cas, choix de la variété ou de la date de semis),
- le précédent cultural (gamme de variation des effets précédent sur le stock d'azote minéral dans le sol)
- l'irrigation (lorsque c'est un paramètre attribué au cours de la construction de la courbe).

4.2.1. En Picardie

Les sols sur lesquels sont potentiellement cultivées les cultures sont globalement de bonne qualité, même s'ils sont parfois caillouteux, mise à part la rendzine (N° 1820). Ce sol n'a été attribué qu'une seule fois aux cultures : au tournesol du groupe type 9, qui est une culture minoritaire dans cette région et qui peut effectivement être pratiquée sur de sols de moindre qualité (*cf.* Tableau 4.3). La variété de tournesol sélectionnée pour les groupes types picards est toujours la plus précoce possible (n° 1), ce qui correspond bien à un choix possible pour une région du Nord de la France.

La pomme de terre est toujours localisée sur le sol N° 1974 (sol brun argilo-limoneux de 80 cm de profondeur, caillouteux). Ceci est peu réaliste compte tenu de la présence de cailloux qui constituent des conditions de récolte peu favorables vis-à-vis des conditions de culture et de récolte requises pour la pomme de terre. La date de plantation sélectionnée est systématiquement la plus tardive possible, et la culture systématiquement menée en sec. Il est difficile de commenter ces résultats de manière plus précise, compte tenu des diverses cultures que recouvre la « pomme de terre » dans AROPAj et la variété (Bintje pomme de

terre de consommation « standard ») qui la représente dans le modèle STICS. Le précédent cultural est systématiquement le blé, ce qui apparaît cohérent avec une succession réelle, si l'on considère que l'autre précédent possible était une légumineuse.

Le maïs présente deux itinéraires techniques en Picardie : un commun aux groupes types 8 et 10, et un pour le groupe type 9. Ces deux itinéraires techniques diffèrent par : leur sol, leur précédent cultural et leur variété, mais le maïs picard n'est jamais irrigué, ce qui est en accord avec les pratiques régionales. Les exploitations types 8 et 10 cultivent le maïs sur le sol N° 1969 (argilo-limoneux lessivé et profond), avec pour précédent cultural le blé et le groupe de précocité 9 (C1 « demi précoce »). L'exploitation type 9 cultive le maïs de précocité A « très précoce », sur le sol N° 1974 (sol brun argilo-limoneux de 80 cm de profondeur, caillouteux), en succession d'une légumineuse. Les groupes types 8 et 10 présentent des rendements estimés à partir des données RICA très similaires et un peu supérieurs à celui du groupe type 9 (9.27 t/ha contre 8.8 t/ha). Ceci peut expliquer un sol plus favorable (N° 1974) pour les groupes types 8 et 10.

Le blé qui occupe des surfaces importantes en Picardie présente comme le maïs deux itinéraires techniques différant par leur groupe de précocité et leur sol, le précédent cultural est toujours une légumineuse. Un itinéraire technique est commun aux groupes types 8,10 et 11 et l'autre est celui du groupe type 9. Les trois groupes types 8, 10 et 11 cultivent une variété semi précoce sur un sol alluvial profond (N° 1042). Le groupe type 9 cultive une variété tardive sur un sol un peu moins favorable (N° 1974).

Le blé dur qui représente très peu en terme de surface dans le RICA pour cette région montre une combinaison d'entrée de STICS différente pour les deux groupes types qui le cultivent. La variété du groupe type 8 est plus précoce que celle du groupe type 9 (très précoce contre semi précoce). Le sol du groupe type 9 (N° 1969) est plus favorable, plus profond que celui du groupe type 8 (N° 1792) qui est de plus très caillouteux.

Le groupe type 9 se singularise par ses itinéraires techniques par rapport aux autres groupes types de la région. Les choix techniques apparaissent plus « risqués » (par exemple les groupes de précocité du blé, ou du blé dur sont plus tardifs que ceux des autres groupes types), malgré des rendements de référence du RICA plus élevés pour ces cultures. La grande surface de cette exploitation type pourrait aller de pair avec une conduite plus intensive qui peut exploiter des variétés plus à la limite des exigences climatiques de la région. Le maïs

semble être, au contraire, une culture avec un rendement moindre pour ce groupe type en comparaison aux autres groupes types régionaux (aux vues des rendements estimés à partir du RICA). La conduite du maïs serait alors plus « conforme » aux conditions climatiques régionales : groupe de précocité plus précoce, et sur un sol un peu moins favorable que celui où est cultivé le maïs des autres groupes.

Groupe type	culture	N° de sol	Type de sol (FAO)	N° variété	Variété / précocité	Date de semis	Précédent cultural	Irrigué/ sec	Surface totale (ha)
8	blé	1042	fluvisol eutrique	4	Soissons	15/10	pois	Sec	137 877
9	blé	1974	cambisol calcaro-eutrique	1	Arminda	15/10	pois	Sec	253 612
10	blé	1042	fluvisol eutrique	4	Soissons	15/10	pois	Sec	68 770
11	blé	1042	fluvisol eutrique	4	Soissons	15/10	pois	Sec	11 629
8	blé dur	1792	cambisol calcique	5	Ardente	15/10	pois	Sec	456
9	blé dur	1969	luvisol orthique	6	Lloyd	15/10	pois	Sec	1 098
8	maïs grain	1969	luvisol orthique	9	C1	05/05	blé	Sec	10 094
9	maïs grain	1974	cambisol calcaro-eutrique	11	A	05/05	pois	Sec	9 770
10	maïs grain	1969	luvisol orthique	9	C1	05/05	blé	Sec	2 930
8	pomme de terre	1974	cambisol calcaro-eutrique	1	Bintje	10/05	blé	Sec	506
9	pomme de terre	1974	cambisol calcaro-eutrique	1	Bintje	10/05	blé	Sec	46 225
10	pomme de terre	1974	cambisol calcaro-eutrique	1	Bintje	10/05	blé	Sec	1303
8	tournesol	1969	luvisol orthique	1	précoce	25/04	pois	Sec	348
9	tournesol	1820	rendzine orthique	1	précoce	25/04	pois	Sec	553

En gris sont indiqués les paramètres qui n'ont pas été déterminé au cours de la construction de la courbe mais qui étaient fixés dès le départ.

Tableau 4.3 Les entrées de STICS attribuées aux cultures de la région Picardie par groupe type

4.2.2. En Midi-Pyrénées

En Midi-Pyrénées, les cultures et fermes types sont très diversifiées (cf. Tableau 4.4), aussi, il n'est pas toujours aisé d'interpréter a posteriori les données techniques attribuées, même si des tendances se détachent dans certains cas.

Quel que soit le groupe type considéré, le maïs en Midi-Pyrénées est cultivé sur le sol N° 2427 (rendzine peu profonde, calcaire et caillouteuse). Malgré ces conditions de sol a priori peu favorables, ce choix n'est pas impossible. En effet, la culture du maïs est irriguée pour tous les groupes types de la région (hormis le groupe type N° 20 pour lequel le rendement référence r^0 provenant du RICA inférieur à tous ceux des autres groupes types peut expliquer cette technique). Ceci tamponne fortement l'effet « sol » sur le rendement du maïs. Cette culture pour laquelle l'eau est un facteur aussi important que l'azote vis-à-vis du rendement, n'est en effet jamais en stress hydrique, puisque l'irrigation est déclenchée dans le modèle STICS chaque fois que cela se produit. Le précédent cultural sélectionné est majoritairement le blé (seuls les groupes types 20 et 23 ont un précédent légumineuse). Le groupe de précocité

le plus largement attribué est d'une précocité moyenne parmi celles possibles dans la région (« extrême tardif 1 »), sauf pour les groupes types 26, 22 et 20, où le groupe de précocité N° 3 est cultivé (« extrême tardif 2 »). Il ne semble pas y avoir d'effet de la classe d'altitude du groupe type sur le choix du groupe de précocité.

L'orge de printemps est cultivée par les groupes types 15, 16 et 18 qui sont des groupes types « cultivateurs ». Elle est systématiquement présente sur le sol 601 qui est une des meilleures terres régionales parmi celles possibles (sol lessivé limono-argileux et profond). Alors que l'on s'attendrait à voir l'orge du groupe type 16 semée plus tard que celle des 2 autres groupes types, compte tenu de son altitude moyenne plus haute, elle est semée 10 jours plus tôt que celle des groupe types 15 et 16. Le précédent cultural sélectionné est le pois pour les groupes types 16 et 18, et le blé pour le groupe type 15. On pourrait s'attendre à observer plutôt le blé que le pois comme précédent cultural à l'orge de printemps, étant donné qu'il est préférable d'éviter de trop forts reliquats azotés pour ne pas engendrer d'excès de protéines dans les grains destinés à la malterie.

Les groupes types 19 à 26 considérés comme « éleveurs » cultivent de l'orge d'hiver. Les groupes types d'altitude moyenne 2 (20, 22, 23 et 24) la cultivent tous sur le sol N° 2460 (sol brun calcaire argileux de profondeur moyenne), alors que les groupes types d'altitude moyenne 1 lui consacre les sols N° 1351 (un sol alluvial profond très favorable) ou 2466 (i.e. un sol très similaires au 2460). Le précédent cultural du blé d'hiver est presque toujours un blé, sauf pour les groupes types 19, 26 et 25. Ce dernier se singularise aussi par rapport aux autres par son sol et sa date de semis. Le sol 2354 qui est spécifique de la classe d'altitude 3 est moins favorable que les autres (sol brun calcaire peu profond), ce qui peut expliquer le précédent pois qui laisse un stock plus important d'azote dans le sol que le blé. Concernant les semis, les groupes types d'altitude 1 et 2 sèment plus tôt que le groupe 25 d'altitude 3, ce qui peut sembler contradictoire avec des températures plus basses en moyenne à cette altitude.

Le tournesol est majoritairement cultivé sur le sol 2427 (rendzine superficielle), les sols 601 et 2460, plus favorables aux cultures étant attribués respectivement aux groupes types 15, 17 et 18. La culture est toujours menée en sec lorsque ce choix technique ne fait pas partie des entrées de STICS à attribuer, ainsi l'irrigation n'est affectée au tournesol que pour le groupe type 16 pour lequel on teste les deux modalités « sec » ou « irrigué ». Les sols peu favorables et l'absence majoritaire d'irrigation semblent cohérents avec des rendements références RICA

globalement faibles (inférieurs ou égaux à 2 t/ha environ) pour l'ensemble des groupes types de Midi-Pyrénées.

Le blé est cultivé dans tous les groupes types de Midi-Pyrénées, de manière prépondérante sur le sol N° 601 (sol lessivé limono-argileux et profond). Sur ce sol, le blé est toujours précédé d'un pois (sauf pour le groupe type 23), ce qui n'est le cas des autres sols où le blé est majoritairement précédé d'un blé. Il est difficile d'interpréter les précocités qui ne semblent pas être en relation avec l'altitude des groupes types, mais interagissent avec les autres paramètres techniques.

La région Midi-Pyrénées est une région traditionnelle de culture du blé dur, ce qui signifie que les surfaces de cette culture sont aidées par la PAC. Le rendement n'est pas l'objectif principal de cette culture, mais plutôt la qualité, dont la rémunération n'est pas prise en compte par AROPAj. Par conséquent, c'est surtout la surface qui va déterminer la rémunération du blé dur pour le producteur d'une exploitation type dans AROPAj. Ceci peut expliquer que le sol attribué au blé dur est pour la plupart la rendzine 2427 (groupes types 15, 18, 21 et 22) et plus rarement le sol brun calcaire 2466 (groupes types 16 et 19), mais en aucun cas les meilleures terres possibles. Sur la rendzine, le précédent cultural est systématiquement un pois, alors qu'il s'agit d'un blé pour l'autre sol plus favorable à la culture, et a priori moins déficitaire en azote que la rendzine. La précocité est en majorité la plus tardive possible (variété N°10, Arcalis ½ tardive), on ne remarque pas de corrélation particulière avec l'altitude du groupe type.

Le colza est une culture peu importante en surface en Midi-Pyrénées, et pratiquée seulement par les groupes types 19 et 20. Les entrées de STICS attribuées à ces groupes types diffèrent seulement par le sol, le précédent et la date de semis sont les mêmes (pois et semis le plus précoce possible).

Groupe type	culture	N° de sol	Type de sol (FAO)	N° variété	Variété / précocité	Date de semis	Précédent cultural	Irrigué/ sec	Surface totale (ha)
15	blé	601	podzoluvisol eutrique	3	Thésée	02/11	pois	Sec	120 853
16	blé	601	podzoluvisol eutrique	3	Thésée	02/11	pois	Sec	11 855
17	blé	601	podzoluvisol eutrique	6	Sidéral	02/11	pois	Sec	18 567
18	blé	601	podzoluvisol eutrique	6	Sidéral	02/11	pois	Sec	13 247
19	blé	2460	cambisol calcique	4	Soissons	02/11	pois	Sec	14 271
20	blé	601	podzoluvisol eutrique	3	Thésée	02/11	pois	Sec	6 824
21	blé	1351	fluvisol fluvi-calcarique	6	Sidéral	02/11	blé	Sec	3 822
22	blé	601	podzoluvisol eutrique	3	Thésée	02/11	pois	Sec	3 500
23	blé	601	podzoluvisol eutrique	4	Soissons	02/11	blé	Sec	6 516
24	blé	1702	luvisol orthique	6	Sidéral	02/11	blé	Sec	2 105
25	blé	1351	fluvisol fluvi-calcarique	3	Thésée	02/11	blé	Sec	1 089
26	blé	601	podzoluvisol eutrique	3	Thésée	02/11	pois	Sec	1 836
15	blé dur	2427	rendzine orthique	10	Arcalis	22/11	pois	Sec	63 019
16	blé dur	2466	cambisol calcique	10	Arcalis	22/11	blé	Sec	15 074
18	blé dur	2427	rendzine orthique	7	Néodur	22/11	pois	Sec	1 349
19	blé dur	2466	cambisol calcique	10	Arcalis	22/11	blé	Sec	3 231
21	blé dur	2427	rendzine orthique	10	Arcalis	22/11	pois	Sec	70
22	blé dur	2427	rendzine orthique	4	Acalou	22/11	pois	Sec	216
19	colza	2427	rendzine orthique	1	Goeland	25/08	pois	Sec	1 076
20	colza	601	podzoluvisol eutrique	1	Goeland	25/08	pois	Sec	244
15	maïs grain	2427	rendzine orthique	2	F	28/04	blé	Irrigué	101 948
16	maïs grain	2427	rendzine orthique	2	F	28/04	blé	Irrigué	10 997
17	maïs grain	2427	rendzine orthique	2	F	28/04	blé	Irrigué	14 776
18	maïs grain	2427	rendzine orthique	2	F	28/04	blé	Irrigué	19 454
19	maïs grain	2427	rendzine orthique	2	F	28/04	blé	Irrigué	13 334
20	maïs grain	2427	rendzine orthique	3	G	28/04	pois	Sec	6 587
21	maïs grain	2427	rendzine orthique	2	F	28/04	blé	Irrigué	4 360
22	maïs grain	2427	rendzine orthique	3	G	28/04	blé	Irrigué	3 004
23	maïs grain	2427	rendzine orthique	2	F	28/04	pois	Irrigué	3 979
24	maïs grain	2427	rendzine orthique	2	F	28/04	blé	Irrigué	1 776
26	maïs grain	2427	rendzine orthique	3	G	28/04	blé	Irrigué	3 981
15	orge de printemps	601	podzoluvisol eutrique	2	Scarlett	05/02	blé	Sec	16 782
16	orge de printemps	601	podzoluvisol eutrique	2	Scarlett	26/01	pois	Sec	2 155
18	orge de printemps	601	podzoluvisol eutrique	2	Scarlett	05/02	pois	Sec	3 155
19	orge d'hiver	2466	cambisol calcique	1	Plaisant	15/10	pois	Sec	6 343
20	orge d'hiver	2460	cambisol calcique	1	Plaisant	05/10	blé	Sec	5 028
21	orge d'hiver	1351	fluvisol fluvi-calcarique	1	Plaisant	05/10	blé	Sec	11 062
22	orge d'hiver	2460	cambisol calcique	1	Plaisant	05/10	blé	Sec	9 231
23	orge d'hiver	2460	cambisol calcique	1	Plaisant	05/10	blé	Sec	10 936
24	orge d'hiver	2460	cambisol calcique	1	Plaisant	05/10	blé	Sec	14 316
25	orge d'hiver	2354	cambisol calcique	1	Plaisant	15/10	pois	Sec	7 966
26	orge d'hiver	1351	fluvisol fluvi-calcarique	1	Plaisant	05/10	pois	Sec	4 365
15	tournesol	601	podzoluvisol eutrique	1	précoce	10/04	pois	Sec	136 266
16	tournesol	2427	rendzine orthique	2	½ précoce	10/04	pois	Irrigué	23 362
17	tournesol	601	podzoluvisol eutrique	2	½ précoce	10/04	pois	Sec	10 132
18	tournesol	2460	cambisol calcique	2	½ précoce	10/04	blé	Sec	11 643
19	tournesol	2427	rendzine orthique	1	précoce	10/04	blé	Sec	13 267
20	tournesol	2427	rendzine orthique	1	précoce	10/04	blé	Sec	4 468
21	tournesol	2427	rendzine orthique	3	tardive	10/04	blé	Sec	1 335

En gris sont indiqués les paramètres qui n'ont pas été déterminé au cours de la construction de la courbe mais qui étaient fixés dès le départ.

Tableau 4.4 Les entrées de STICS attribuées aux cultures de la région Midi-Pyrénées par groupe type

4.3. Variabilité des courbes de réponse

Afin d'évaluer les courbes de réponse que nous avons obtenues avec les entrées de STICS attribuées aux groupes types, nous comparons tout d'abord l'allure générale des courbes selon les cultures au regard des références de la littérature. Ensuite, nous montrons la variabilité intra et interrégionale obtenue pour ces courbes de réponse.

4.3.1. Analyse de la cohérence des formes des courbes obtenues pour chaque culture

4.3.1.a. Pour le blé tendre

En ce qui concerne le blé tendre, la maîtrise de la fertilisation azotée intervient à plusieurs niveaux. La gestion de l'azote permet de répondre aux attentes de rendements élevés, les plus proches des potentiels variétaux et des exigences de teneurs en protéines élevées pour la boulangerie et la biscuiterie par exemple. Parallèlement une gestion maîtrisée des apports azotés évite les excès qui augmentent les risques de verse physiologique et de maladies (comme l'oïdium), tous deux dommageables au rendement. Au-delà de la dose totale d'azote c'est surtout la gestion des apports dans le temps qui contrôle la qualité du grain à la récolte. L'azote est avec l'eau un des facteurs limitant de la production des céréales, le blé est donc sensible aux variations des apports azotés (Gate, 1995). Cela se traduit par des courbes de réponse à l'azote à la courbure marquée, mais de plus en plus faible (en accord avec la « loi des rendements décroissants » , *cf.* 1.2.2 Justification du choix de la forme fonctionnelle), qui atteignent un plateau lorsque l'azote n'est plus le facteur limitant (Boyd *et al.*, 1976, Meynard *et al.*, 1981). La Figure 4.1 montre la courbe de réponse obtenue pour le blé tendre du groupe type 9 de Picardie, elle présente bien les caractéristiques attendues. La valeur du niveau de fertilisation correspondant au rendement de référence du RICA apparaît réaliste. Le plateau qui est simulé par le modèle STICS (points verts sur la figure) est bien représenté par la forme fonctionnelle choisie, bien qu'elle soit croissante. Cependant, la verse physiologique qui est vraisemblable pour des apports au-delà des 250 kg/ha n'est pas prise en compte par le modèle STICS, ni les maladies : il n'y a pas de chute des rendements.

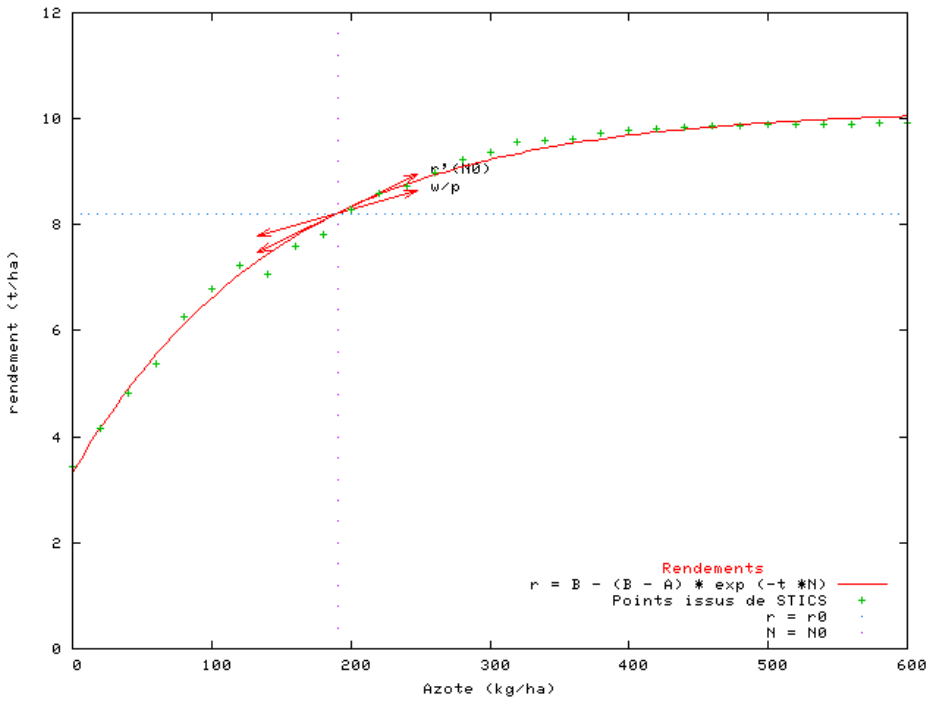


Figure 4.1 Courbe de réponse à l'azote pour le blé tendre du groupe type 9 de la Picardie

4.3.1.b. Pour le blé dur

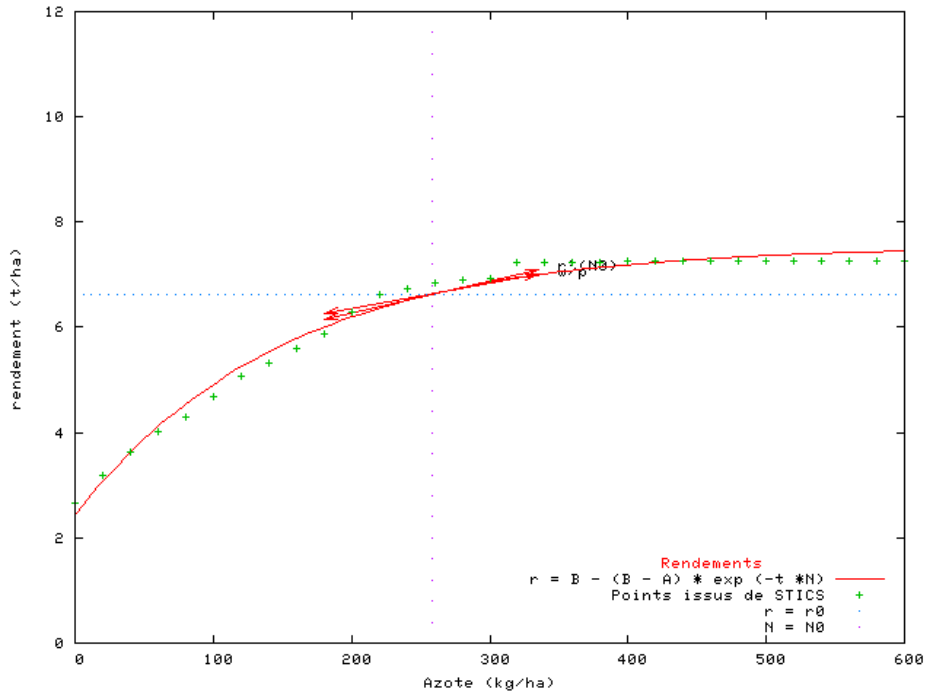


Figure 4.2 Courbe de réponse à l'azote pour le blé dur du groupe type 9 de la Picardie

Comme pour le blé tendre, la gestion de l'azote apporté au blé dur permet d'atteindre les objectifs de rendement et de qualité attendue (qualité semoulière), et d'éviter la verse et les maladies. On s'attend aux mêmes types de courbes que pour le blé tendre, c'est-à-dire avec une courbure marquée, mais plus « plates ». En effet à rendement égal, le blé dur nécessite plus d'azote que le blé tendre. C'est ce que l'on observe en comparant la Figure 4.1 et la Figure 4.2 qui représentent respectivement un exemple de courbe de réponse à l'azote pour le blé tendre et pour le blé dur pour le même groupe type (et donc dans les mêmes conditions climatiques). On estime généralement les besoins en azote pour obtenir le rendement objectif en utilisant le coefficient « b », qui, pour le blé, est de l'ordre de 3 unités/ quintal alors qu'il est de 3,5 unités/quintal pour le blé dur. Comme pour le blé tendre, le modèle ne simule pas la verse due aux excès d'azote et la perte de rendement consécutive n'apparaît pas sur la courbe de réponse, même pour des doses très élevées d'azote

4.3.1.c. Pour les orges

Comme pour les autres céréales, l'orge est une culture dont le rendement et la qualité sont très dépendants de la fertilisation azotée. Pour l'orge de brasserie, la teneur en protéine des grains, dans une limite supérieure stricte, est un objectif de production primordial que la gestion des reliquats azotés, de la dose totale à apporter et de son fractionnement permet de maîtriser (ITCF, 2002). Pour les orges fourragères, une teneur en protéine élevée est recherchée, sans risque d'excès, contrairement à la malterie. Pour tous les types d'orges, les apports trop élevés d'azote restent risqués, car l'orge est la céréale à paille la plus sensible à la verse physiologique.

La Figure 4.3 et la Figure 4.4 présentent les courbes de réponse obtenues respectivement pour de l'orge de printemps et d'hiver, pour le même climat de la région Midi-Pyrénées. Comme pour les autres céréales, on n'observe pas de simulation de la verse. L'orge de printemps présente une courbe plus plate que l'orge d'hiver,

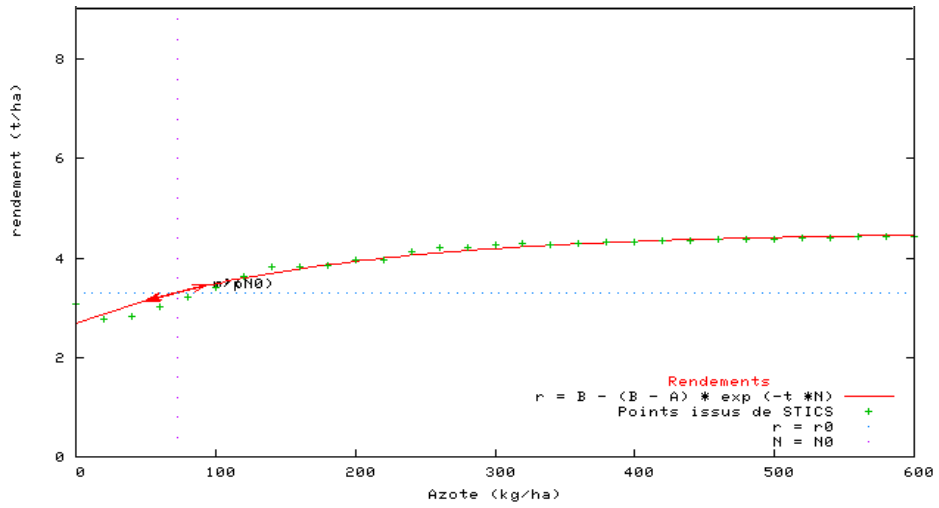


Figure 4.3 Courbe de réponse à l'azote pour l'orge de printemps du groupe type 15 de Midi-Pyrénées

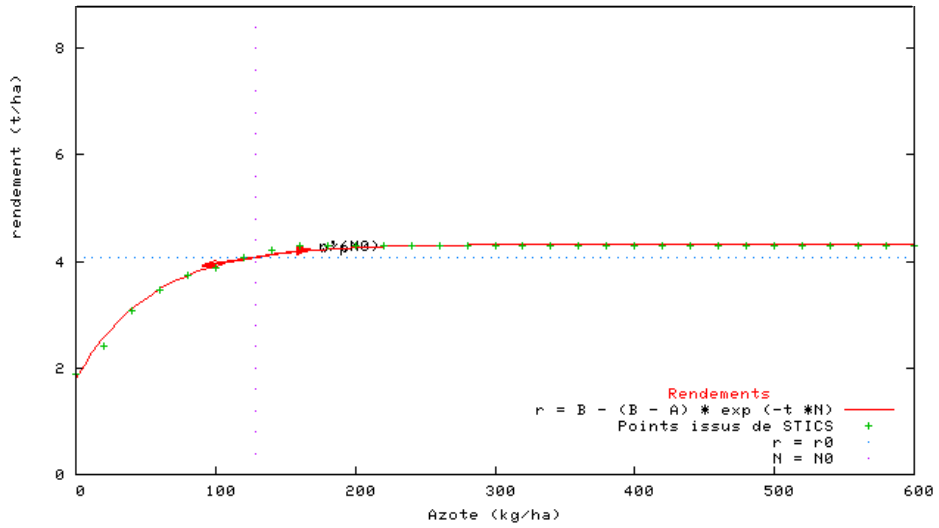


Figure 4.4 Courbe de réponse à l'azote pour l'orge d'hiver du groupe type 19 de Midi-Pyrénées

4.3.1.d. Pour le maïs

Le maïs est une des cultures dont les courbes de réponse à l'azote ont été les plus étudiées, souvent aux Etats-Unis, pour établir entre autres des recommandations de fertilisation et des formes fonctionnelles adaptées (Cerrato et Blackmer, 1990, Bullock et Bullock, 1994, Vanotti et Bundy, 1994, Llewelyn et Featherstone, 1997). Comme les autres céréales, c'est une culture pour laquelle l'azote est un facteur de production important, cependant en forte interaction avec l'eau sous les latitudes européennes. Ceci influe sur la forme de la courbe de réponse, et, pour des conditions limitantes en eau, la courbe plafonne, c'est ce que l'on observe pour la région Picardie (*cf.* exemple Figure 4.5), où le maïs n'est pas irrigué. Au contraire, en Midi-Pyrénées, la courbe de réponse ne présente pas de plateau et montre une croissance plus forte, car l'irrigation, telle que nous l'avons définie, compense tout stress hydrique (cf. Figure 4.6). Ces formes de courbes de réponse sont conformes aux effets des facteurs limitants sur les rendements (Boyd *et al.*, 1976).

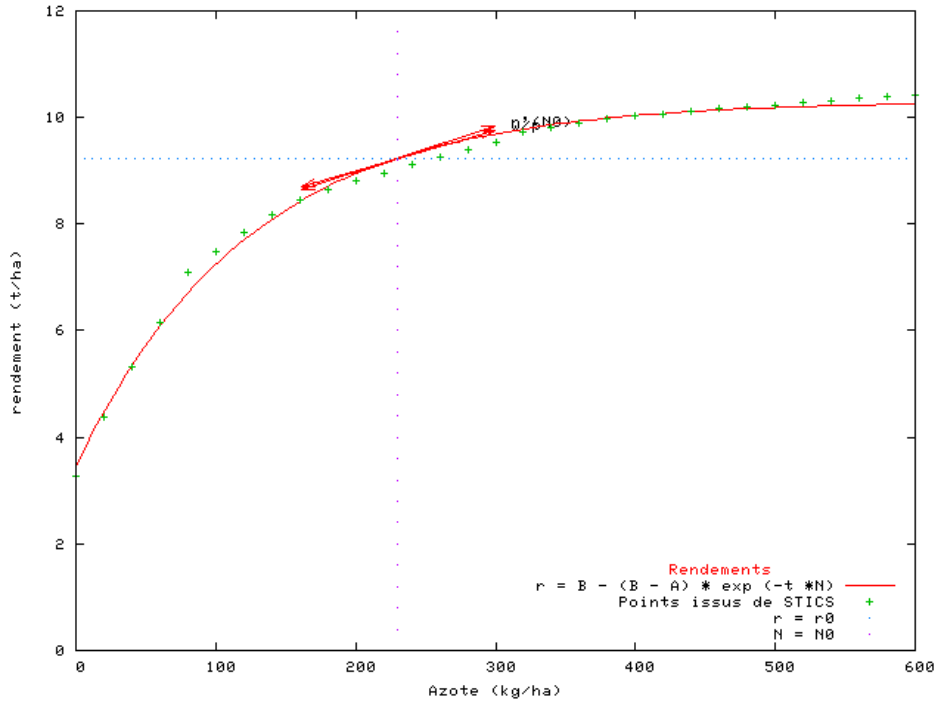


Figure 4.5 Courbe de réponse à l'azote pour le maïs grain du groupe type 8 de la Picardie

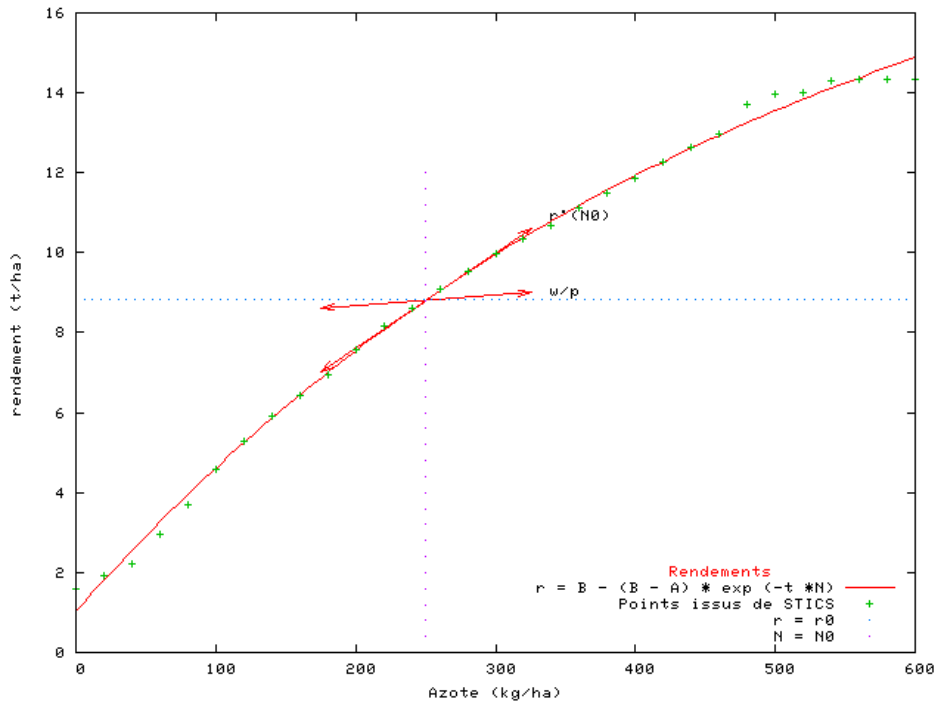


Figure 4.6 Courbe de réponse à l'azote pour le maïs grain du groupe type 17 de Midi-Pyrénées

4.3.1.e. Pour le tournesol

Le rendement du tournesol est peu sensible aux apports azotés, car la plante mobilise les ressources azotées du sol qui lui fournit une grande partie de ses besoins. Les courbes de réponse à l'azote attendues sont donc beaucoup plus plates que celles des céréales. De plus, les excès d'azote augmentent fortement les risques de verse, favorisent le développement des maladies (sclérotinia, phomopsis et botrytis) et détériorent la qualité (baisse de la teneur en huile des graines) (CETIOM, 2003b). On observe effectivement une courbe plate et un apport azoté optimal faible pour le tournesol, dont un exemple de courbe de réponse est présenté Figure 4.7.

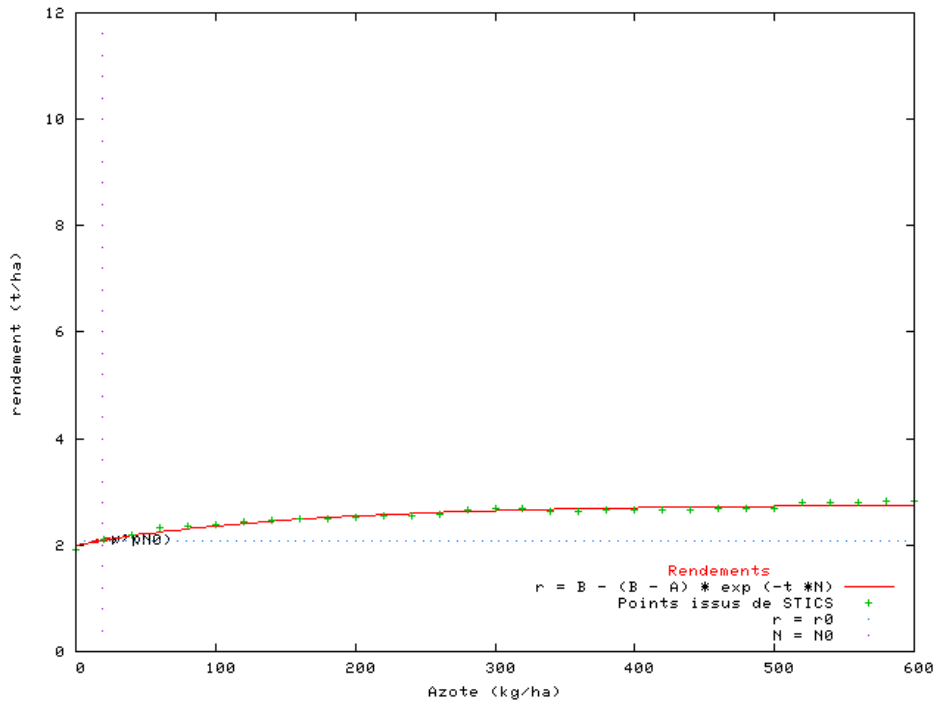


Figure 4.7 Courbe de réponse à l'azote pour le tournesol du groupe type 15 de Midi-Pyrénées

4.3.1.f. Pour la pomme de terre

La maîtrise de la fertilisation azotée pour la culture de la pomme de terre intervient dans la gestion du rendement en tubercule, leur calibre et leur qualité (teneur en sucres et types de sucres stockés). Le rendement pris en compte dans cette thèse est uniquement le rendement en tubercules, il ne souffre pas d'un excès d'azote contrairement à la qualité des tubercules et au rendement en racines de la betterave (Neeteson et Wadman, 1987). C'est ce que l'on observe sur les courbes de réponse obtenues pour la région Picardie (comme par exemple le groupe type 9 de Picardie dont la courbe est présentée Figure 4.8).

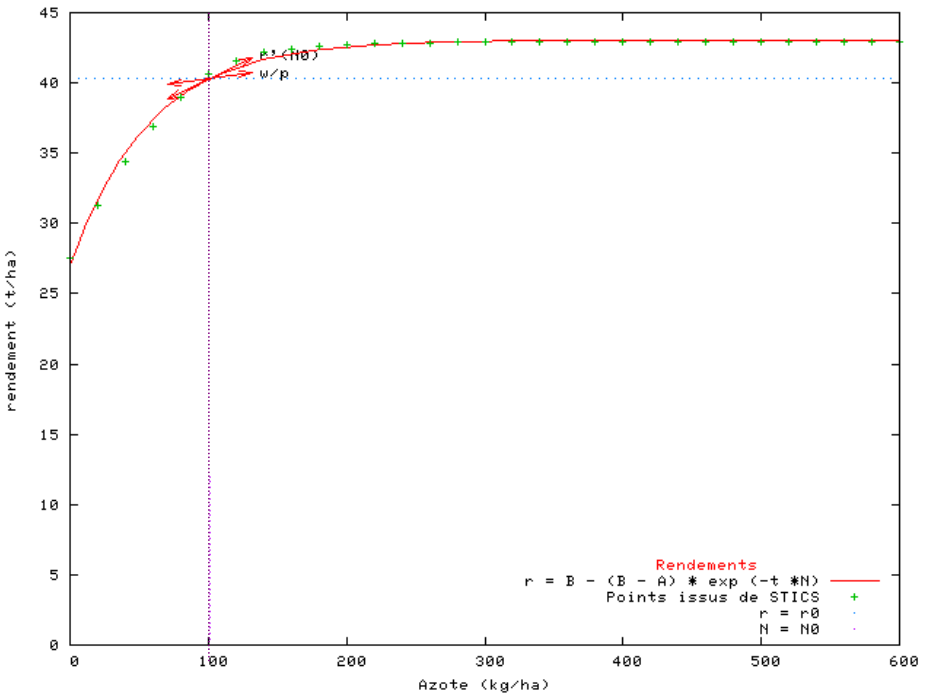


Figure 4.8 Courbe de réponse à l'azote pour la pomme de terre du groupe type 9 de Picardie

4.3.1.g. Pour la betterave

La gestion de l'azote intervient pour la betterave sur le rendement en racines, mais surtout en déterminant la qualité de la racine *i.e.* sa teneur en saccharose et l'extractabilité de ce sucre (Allison *et al.*, 1996). Nous modélisons le rendement en racine, d'après Neeteson et Wadman, 1987 et Allison et Armstrong, 1995, il dépend de l'apport azoté selon une fonction de type exponentielle modifiée (*cf.* Figure 1.12) qui a pour caractéristique de décroître au-delà d'une certaine dose (environ 150-200 kg/ ha) d'azote apporté. Cette décroissance semble apparaître dans les points simulés par STICS (*cf.* exemple Figure 4.9), mais elle n'est pas transcrite par la courbe ajustée puisque cette dernière est nécessairement croissante.

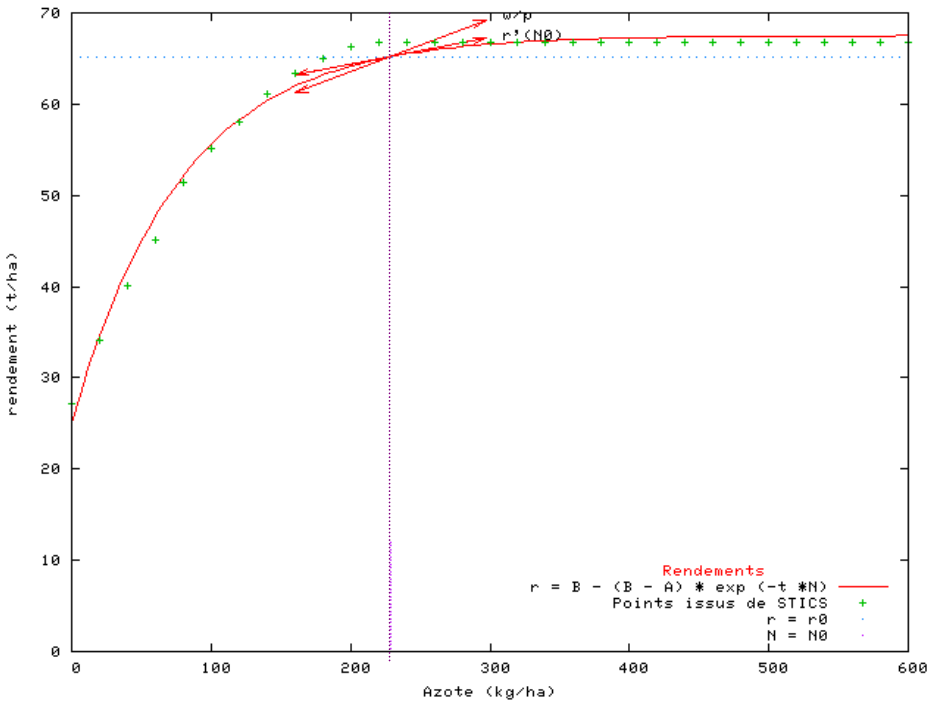


Figure 4.9 Courbe de réponse à l'azote pour la betterave sucrière du groupe type 42 d'Auvergne.

4.3.1.h. Conclusion

Les formes de courbes de réponse à l'azote obtenues pour les différentes cultures sont conformes aux attentes. La forme fonctionnelle choisie permet de représenter la diversité des réponses du rendement des cultures à l'apport azoté. Cependant, la forme croissante ne permet pas de montrer les décroissances qui devraient être observées au-delà d'un certain apport (par exemple, cas de la verse des céréales ou des antagonisme physiologiques pour la betterave). Comme nous ne prenons en compte que le rendement en terme de quantité produite, les aspects qualitatifs du rendement échappent à notre analyse. Or la qualité des productions végétales serait à considérer car :

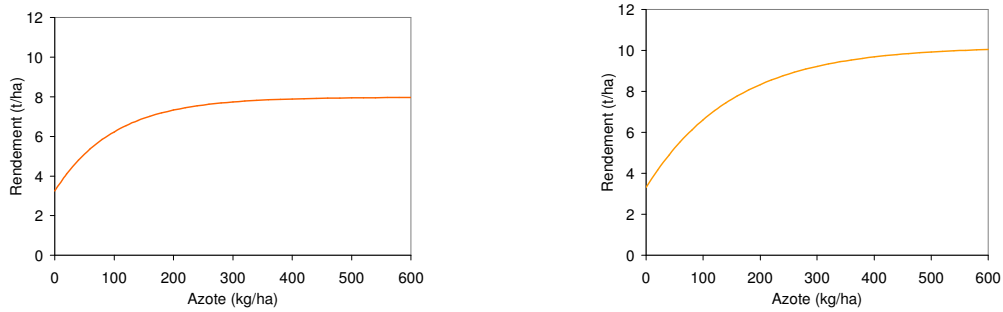
- elle est souvent en lien avec la fertilisation azotée, soit plutôt directement (taux de protéines des grains des céréales), soit indirectement (teneur en huile des graines oléagineuses ou extractabilité du sucre de la betterave),
- elle est souvent déterminante du prix payé au producteur.

Mais l'échelle de travail du modèle économique et le détail des informations disponibles sur ces questions de qualité ne permettent pas actuellement de prendre en compte ces problématiques de manière fine pour être satisfaisantes.

Cependant, la diversité des courbes de réponse construites traduit la variabilité des situations modélisées. Nous avons montré cette diversité selon les cultures, nous mettons en évidence dans les paragraphes suivants comment cette diversité transcrit également la variabilité intrarégionale, selon les groupes types et les régions.

4.3.2. Variabilité intra régionale

La variabilité intrarégionale des courbes de réponse à l'azote est, pour une culture donnée, liée à la variabilité des fermes types. Celles-ci sont initialement caractérisées par leur classe d'altitude et leurs combinaisons d'OTE (*cf.* Encadré 1.2 La typologie et les fermes-types du modèle AROPAj), nous avons attribué à chacune d'elles des caractéristiques physiques et techniques. Nous montrons comment cette variabilité des situations apparaît au travers des courbes de réponse à l'azote.

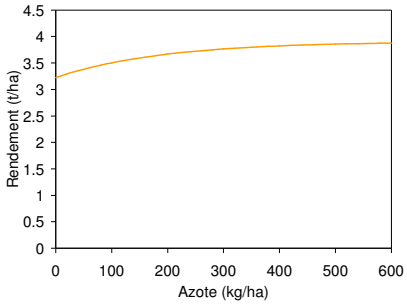


a/ groupes types 8, 10 et 11 b/ groupe type 9

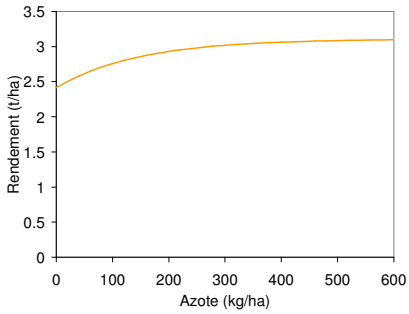
Figure 4.10 Les courbes de réponse à l'azote du blé en Picardie

En Picardie où les conditions pédoclimatiques régionales sont plutôt homogènes, les fermes types sont homogènes et peu nombreuses. Dans les courbes de réponse, on retrouve peu de variabilité, avec par exemple pour le blé, des courbes similaires pour les groupes types 8, 10 et 11, seul le groupe type 9 étant différent (*cf.* Figure 4.10). De même, tous les groupes types présentent la même courbe de réponse pour la pomme de terre (cf. Figure 4.8). Il est difficile d'isoler les effets des facteurs à l'origine de cette variabilité, car toutes les combinaisons n'apparaissent pas. On peut cependant mettre en évidence l'effet du sol pour le tournesol

(Figure 4.11) : la fourniture d'azote par ce dernier peut aboutir à un écart de 0.8 t/ha sur les rendements. La rendzine produit des rendements moins élevés et une courbe plus plate que le sol lessivé profond, ce qui est conforme aux qualités de ces deux sols.

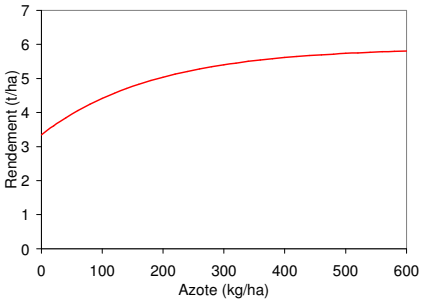


a/ groupe type 8
(sol : rendzine orthique A = 3.224, B = 3.905, t = 0.00526)

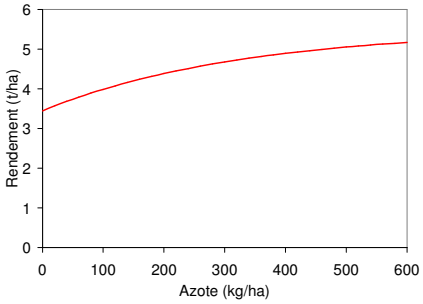


b/ groupe type 9
(sol = luvisol orthique, A = 2.416, B = 3.109, t = 0.00681)

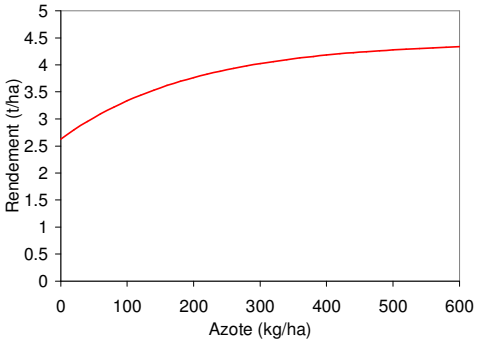
Figure 4.11 Effet du type de sol sur les courbes de réponse à l'azote pour le tournesol en Picardie



a/ groupe type15
(altitude 1, sol 601, variété 3, précédent pois)



b/ groupe type 16
(altitude 2, sol 601, variété 3, précédent pois)



c/ groupe type 25
(altitude 3, sol 1702, variété 6, précédent blé)

Figure 4.12 Quelques courbes de réponse à l'azote pour le blé en Midi-Pyrénées

En Midi-Pyrénées, la variabilité des groupes types est beaucoup plus importante, à la fois par les orientations technico-économiques plus différenciées, et les conditions pédoclimatiques qui apparaissent en terme de classe d'altitude dans la définition des groupes types. La Figure 4.12 montre un exemple de courbe de réponses obtenues pour blé tendre dans cette région, et ce, pour trois groupes types différents par leur classe d'altitude, mais aussi leur OTE. Les groupes types 15 et 16 sont des groupes types de grande culture, situés respectivement parmi les classes d'altitude 1 et 2. Le groupe type 25 est situé sur la classe d'altitude 3 et représente plutôt les éleveurs d'ovins. Les courbes a/ et b/ se différencient uniquement par le climat qui est celui de l'altitude 1 (0-300 m) pour le groupe type 15 et celui de l'altitude 2 (300-600m) pour le groupe type 16. La variation du climat se traduit par une variation de la valeur du paramètre B de la courbe de réponse, i.e. le rendement maximal pouvant être atteint : le climat un peu plus froid de l'altitude 2 engendre un rendement maximal plus faible de 5 quintaux environ, ce qui semble cohérent. Le groupe type 25 est le seul de classe d'altitude 3 en Midi-Pyrénées, la courbe de réponse à l'azote est encore différente de celles des groupes types 15 et 16, mais il est impossible d'isoler l'effet d'un facteur particulier, puisque toutes les conditions changent (altitude donc climat et sol, variété, précédent cultural).

En Midi-Pyrénées, pour le blé tendre qui est une culture présente dans tous les groupes types, on remarque une plus grande homogénéité des situations et des courbes de réponse pour les groupes types où les cultures dominent (15 à 18). De manière contrastée, les groupes types où l'élevage est présent (19 à 26) présentent des courbes de réponse beaucoup plus diverses et hétérogènes.

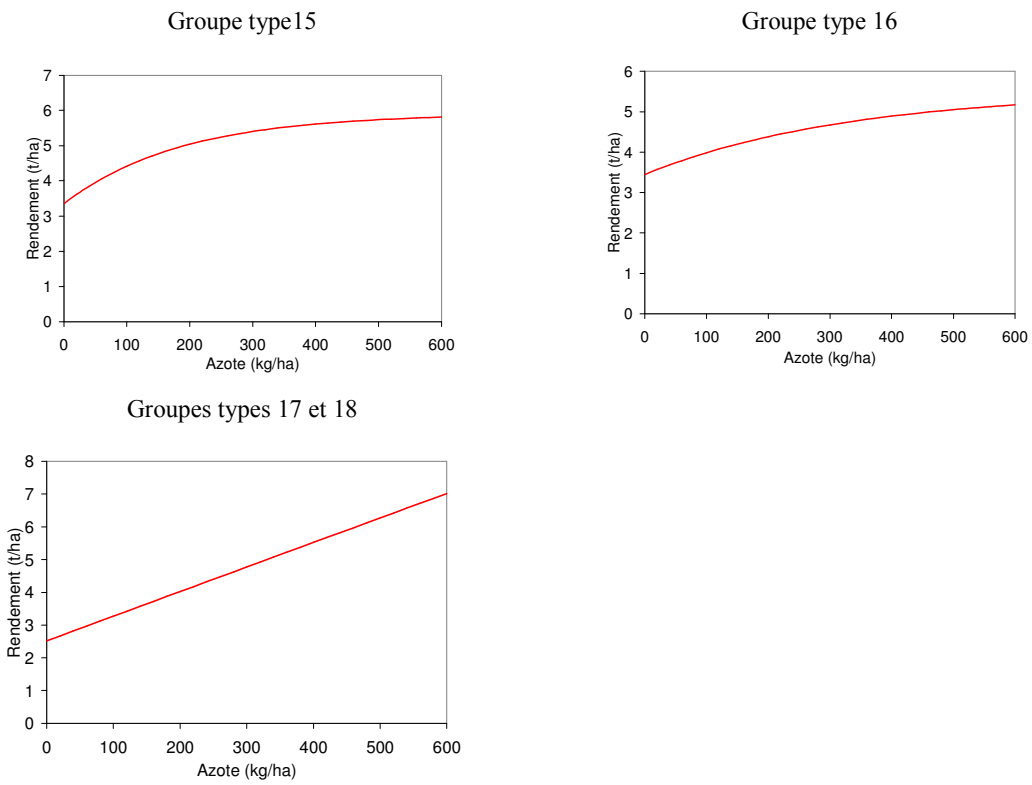
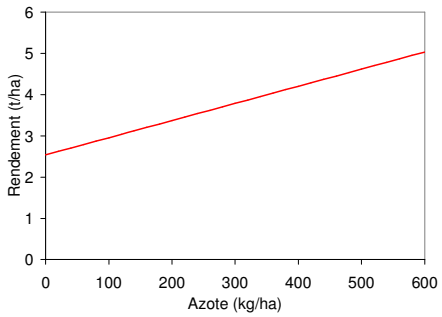
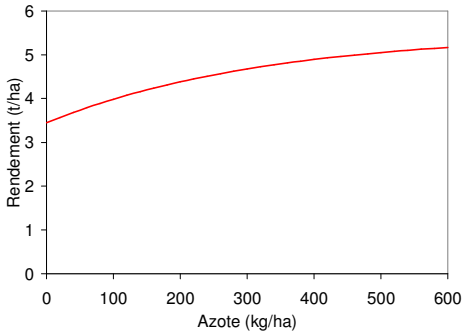


Figure 4.13 Les courbes de réponse à l'azote du blé tendre des groupes types "cultivateurs" de Midi-Pyrénées

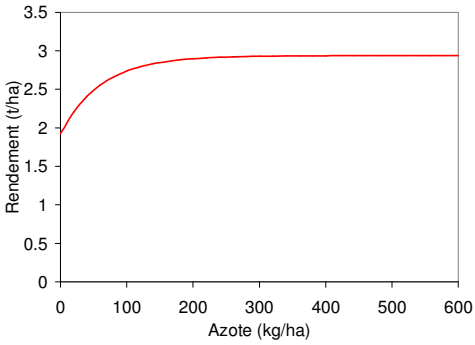
Groupe type 19



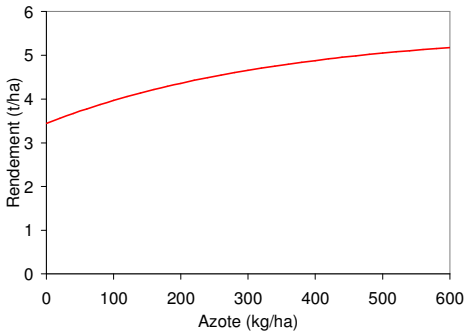
Groupes types 20 et 22



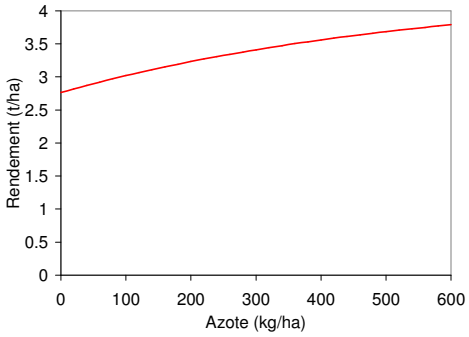
Groupe type 21



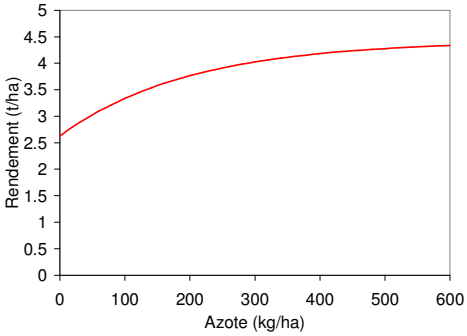
Groupe type 23



Groupe type 24



Groupe type 25



Groupe type 26

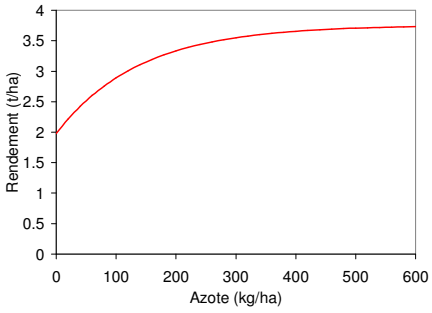
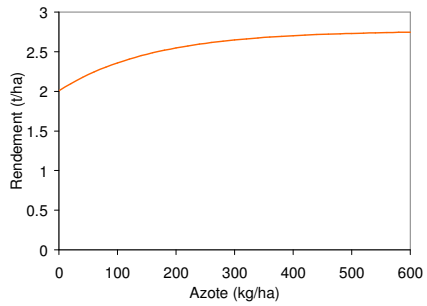
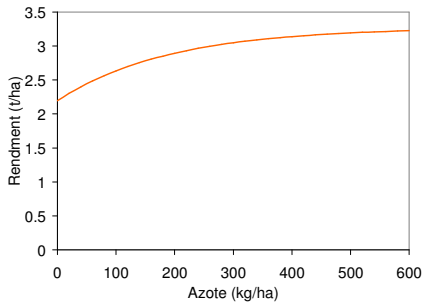


Figure 4.14 Les courbes de réponse à l'azote du blé tendre des groupes types "éleveurs" de Midi-Pyrénées

La Figure 4.15 met en évidence l'effet de la précocité pour le tournesol pour deux groupes types de Midi-Pyrénées. La variété mi-précoce entraîne une gamme de rendements plus étendue que la variété précoce et des rendements un peu plus élevés. Pour le blé (exemple des groupes types 15 et 17, Figure 4.16), la variété la moins précoce produit une courbe de réponse presque linéaire dans une gamme d'apports azotés réalistes.

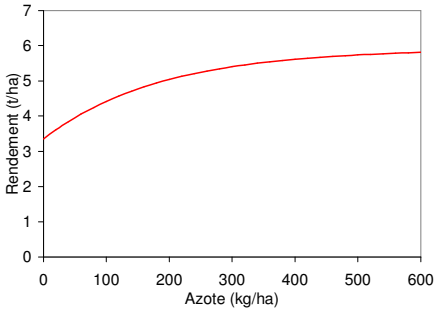


a/ groupe type 15
(variété précoce A = 2.008, B = 2.764)

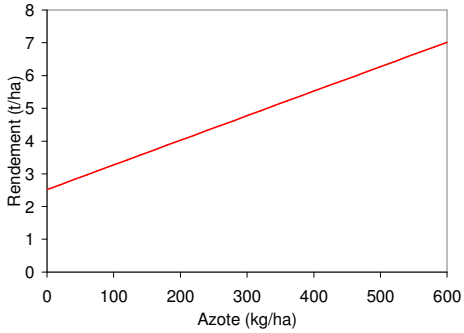


b/ groupe type 17
(variété mi-précoce A = 2.194, B = 3.27)

Figure 4.15 Effet du groupe de précocité sur les courbes de réponse à l'azote pour le tournesol en Midi-Pyrénées



a/ groupe type 15
(variété mi-précoce A = 3.349, B =5.91, t = 0.00539)



b/ groupe type 17
(variété précoce A = 2.516, B = 5.91, t = 2.4×10^{-5})

Figure 4.16 Effet du groupe de précocité sur les courbes de réponse à l'azote pour le blé tendre en Midi-Pyrénées

Il est cependant rare de pouvoir isoler les facteurs influençant la variabilité des courbes de réponse au sein d'une région. La plupart du temps, l'ensemble des effets se combinent pour produire des courbes propres à chaque culture de chaque groupe type créant ainsi une variabilité entre groupes types d'une même région et pour une même culture (*cf.* aussi

résultats de l'analyse de sensibilité). A cette variabilité intrarégionale s'ajoute la variabilité entre les régions elles-mêmes. Ainsi, pour des régions contrastées, comme le sont la Picardie et Midi-Pyrénées, des groupe types d'OTE similaires et de même classe d'altitude présentent, pour les mêmes cultures, des courbes de réponse différentes (par exemple pour le blé tendre des groupes types 8 en Picardie et 15 en Midi-Pyrénées). Les courbes de réponse intègrent en effet à la fois les caractéristiques climatiques, pédologiques et de systèmes de culture. Elles reflètent la diversité des situations régionales, et permettent d'intégrer ces caractéristiques dans le modèle économique AROPAj.

4.4. Conclusion

L'évaluation des entrées du modèle STICS attribuées aux groupes types du modèle AROPAj apparaissent cohérentes entre elles et au niveau régional. Les courbes de réponse à l'azote qui sont produites en utilisant ces entrées apparaissent également en accord avec les attentes de l'agronomie. Elles reflètent la diversité et la variabilité des situations culturales dans et entre les régions. Ainsi, ces informations techniques et physiques complémentaires des informations économiques caractéristiques de chaque ferme type peuvent être prises en compte par le modèle AROPAj. Ces courbes étant construites selon une méthode validée, comment les introduire et les utiliser « en routine » dans le modèle économique ? Que lui apportent-elles ?

Chapitre 5
Fonctionnement du modèle économique avec introduction de la courbe de réponse à l'azote

5. Fonctionnement du modèle économique avec introduction de la courbe de réponse à l'azote

Les courbes de réponse à l'azote construites à l'aide de la méthode présentée dans la première partie de cette thèse et validées par l'évaluation menée précédemment sont destinées au modèle économique AROPAj. Ce chapitre montre comment elles sont introduites dans le modèle de manière pratique, puis il détaille les effets de l'introduction de la courbe sur les résultats du modèle économique. Pour cela, deux approches sont envisagées. Tout d'abord, nous montrons comment la solution optimale varie suite à un changement de prix d'une culture produite (le blé), et ce avec et sans introduction de la courbe de réponse à l'azote. Ensuite, nous observons les effets d'un changement de prix de l'intrant, par l'intermédiaire de l'introduction d'une taxe sur les émissions de gaz à effet de serre, en prenant ou non en compte la courbe de réponse à l'azote.

5.1. Introduction pratique de la courbe dans le modèle économique

5.1.1. Définition de la courbe ajustée

Dans la version du modèle AROPAj qui était utilisée précédemment, le rendement de chaque culture (r^0) et le montant de la charge variable en engrais par culture, paramètres estimés du modèle, étaient connus et fixes. Ces deux informations déterminent un point de la courbe de réponse à l'azote : couple (rendement, quantité d'azote apportée).En effet, la quantité d'azote est déduite de la charge en engrais en faisant des hypothèses sur le prix de l'engrais et sa composition en azote. Ce point de la courbe correspond à l'optimum économique de référence initialement utilisé par AROPAj. En ce point, par hypothèse économique, la pente de la tangente doit égaler le rapport des prix (prix d'achat de l'azote sur le prix de vente de la culture).

Pour pouvoir introduire la courbe de réponse construite à l'aide de STICS dans le modèle économique AROPAj, il est nécessaire que celle-ci coïncide avec ce point et cette pente référence, ce qui n'est pas le cas de manière exacte. En effet, si l'on peut considérer que les valeurs des rendements et des charges sont de bonnes estimations, les hypothèses qui permettent d'obtenir une quantité d'azote apportée laissent supposer une estimation de moins

bonne qualité. Ceci explique le fait que cette information sur les charges en engrais n'a pas été utilisée directement au cours de la construction de la courbe de réponse, contrairement au rendement de référence, et à la valeur théorique de la pente à l'optimum économique.

On peut de plus considérer que les rendements minimum et maximum (paramètres *A* et *B* de la courbe de réponse à l'azote) ont des valeur fiables : le troisième paramètre de la courbe, *t* (« vitesse d'accroissement »), de la fonction permettra de faire coïncider la courbe construite à l'aide de STICS avec les références initiales (point et pente) du modèle AROPAj.

Considérons la fonction de réponse à l'azote $r(N) = B - (B - A) \cdot e^{-tN}$, construite à l'aide du modèle STICS, et $r_a(N)$, la fonction de réponse ajustée qui sera introduite dans AROPAj. Soit $\frac{w^0}{\nu \cdot p^0}$ le rapport de prix correspondant à la charge en engrais azoté c_0, avec w^0 le prix de l'engrais azoté, ν, la part d'azote dans l'engrais azoté et p^0 le prix de l'engrais azoté.

La fonction $r_a(N)$ est définie telle que :

$$r_a(N) = B - (B - A) \cdot e^{-t_a N}$$
$$r_a(N_a^0) = r^0$$
$$r_a'(N_a^0) = \frac{w^0}{\nu \cdot p^0}$$

Etant donné que $A \le r^0 \le B$, et $t \ge 0$, d'après les équations ci-dessus, nous déduisons la valeur du paramètre *t* ajusté, t_a :

$$t_a = \frac{w^0}{\nu \ p^0} \times \frac{1}{B - r^0}$$

La différence entre la charge référence en azote et la charge ajustée est définie par :

$$\Delta c^0 = c^0 - c_a^0 = c^0 - \frac{p^0}{\nu}(B - r^0) \times \ln\left(\frac{B - A}{B - r^0}\right)$$

La Figure 5.1 représente la courbe originale produite à l'aide de STICS, et la courbe ajustée sur les références du modèle économique pour la culture de blé tendre du groupe type 9 de la région Picardie.

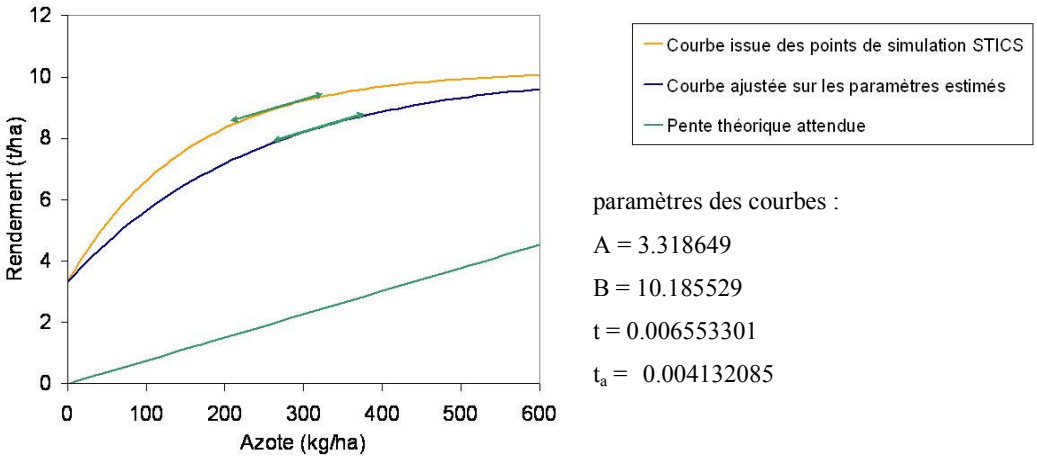


Figure 5.1 La courbe ajustée sur les points issus du modèle STICS et la courbe introduite dans le modèle économique AROPAj (exemple du blé tendre du groupe type 9 de Picardie).

5.1.2. Introduction de la courbe ajustée dans le modèle économique AROPAj

L'introduction des courbes de réponse dans le modèle économique est un processus en deux étapes, pour chaque ferme type. La première étape consiste à optimiser la marge brute de chaque culture de chaque ferme type. Comme nous l'avons détaillé dans le paragraphe 3.1.1.b, le niveau optimal de fertilisation N* et le rendement correspondant r* sont atteints lorsque le coût marginal égale le bénéfice marginal : ce qui signifie qu'à l'optimum économique, le rapport des prix (prix d'achat de l'azote sur prix de vente de la culture) égale la dérivée de la fonction rendement. Ensuite, connaissant la marge brute par hectare, nous déterminons l'assolement optimal entre les cultures possibles pour maximiser la marge brute totale de la ferme type.

L'introduction de la courbe de réponse à l'azote de chaque culture dans le modèle économique lui permet d'optimiser le niveau de fertilisation et par conséquent le rendement correspondant lors de l'optimisation de la marge brute de la culture. Ainsi, le rendement optimal n'est plus fixé à r^0, rendement estimé à partir des données du RICA, comme dans la version antérieure du modèle économique. On parle alors de « rendements endogènes » lorsque la courbe de réponse à l'azote est introduite dans le modèle économique AROPAj.

5.2. Analyse de sensibilité au niveau de la ferme type

L'effet de l'introduction des courbes de réponse à l'azote dans le modèle est mis en évidence dans un premier temps avec une analyse de sensibilité de plusieurs variables de sorties du modèle AROPAj à une variation de prix du blé. Les variables observées sont : la surface en blé, la collecte en blé, et la marge brute de l'exploitation type. Le blé est privilégié pour l'analyse car cette culture est une des productions les plus importante du secteur agricole européen (en terme de surface et de revenu) et de la Picardie, région d'étude. Deux types d'analyse sont menées.

Pour la première, seule la courbe de réponse à l'azote du blé tendre est introduite pour tous les groupes types où elle et disponible. Nous faisons varier le prix du blé (toutes choses égales par ailleurs, en particulier le prix de l'azote). Le prix de référence du blé tendre est de 90 €/t, la gamme de variation observée est de plus ou moins 10 €/t autour de cette valeur référence, par pas de 1€. La procédure d'ajustement de la courbe de réponse issue de STICS pour être introduite dans AROPAj, décrite précédemment, se base sur ce même prix de référence.

Nous présentons Figure 5.2 les résultats obtenus pour l'ensemble de la région Picardie, d'autres analyse montrant des résultats analogues ont été faites pour d'autres groupes types (Godard *et al.*, 2005). On observe peu de sensibilité aux variations de prix, malgré l'introduction de la courbe de réponse à l'azote. Ceci peut s'expliquer par le fait que la Picardie est une région très homogène et aux surfaces en céréales assez importantes pour « tamponner » une variation de prix. L'effet de l'introduction de la courbe de réponse à l'azote sur la collecte est un plus perceptible. Il est en accord avec les attentes, en produisant une courbe située au dessous de la collecte offerte avec des rendements exogènes, pour des prix inférieurs au prix de référence ; l'offre étant supérieure à celles obtenues avec les rendements exogènes pour des prix supérieurs au prix de référence. De plus, la courbe d'offre est lissée par rapport à celle obtenue sans rendements endogènes.

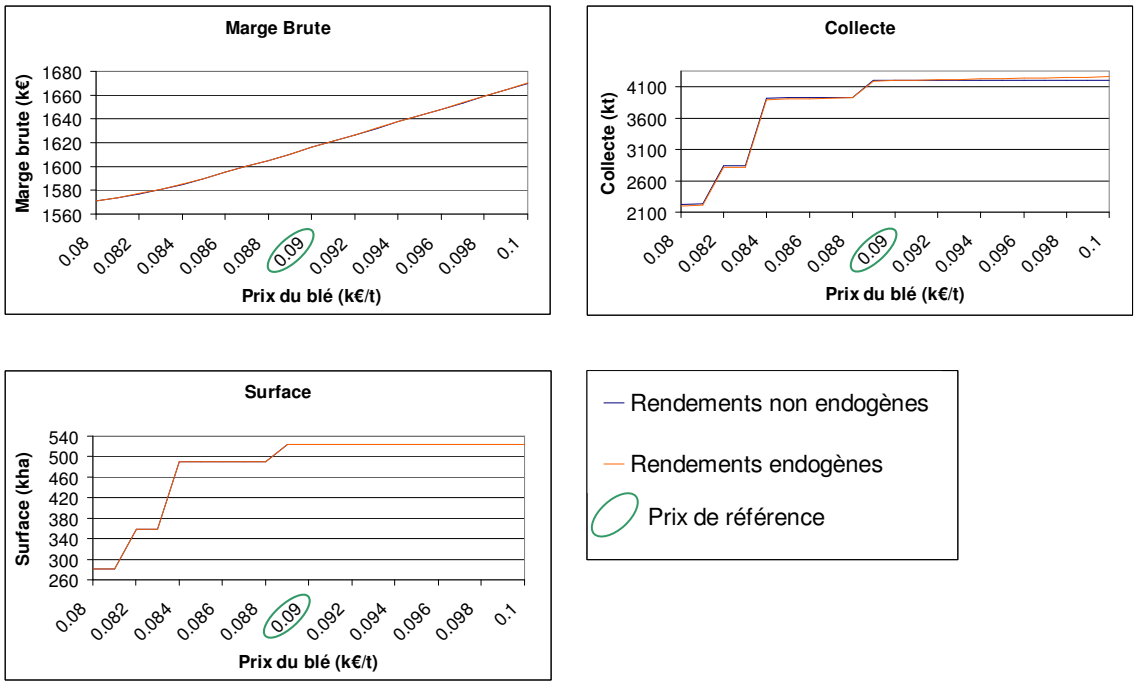


Figure 5.2 Effets d'un changement de prix du blé sur la marge brute, la surface en blé, et la collecte de blé de la Picardie pour des rendements endogènes et exogènes.

Pour la deuxième analyse, toutes les courbes de réponse à l'azote des cultures disponibles pour tous les groupes types de Picardie sont introduites dans AROPAj. Nous faisons varier le prix des cultures de la SCOP (toutes choses égales par ailleurs, en particulier le prix de l'azote et des cultures industrielles). Le prix de référence des céréales est de 90 €/t, la gamme de variation observée est de plus ou moins 10 €/t autour de cette valeur référence, par pas de 1€. Le prix de référence des oléo-protéagineux est de 180 €/t, la gamme de variation observée est de plus ou moins 20 €/t autour de cette valeur référence, par pas de 2€. La procédure d'ajustement de la courbe de réponse issue de STICS pour être introduite dans AROPAj, décrite précédemment, se base sur ces prix de référence.

La Figure 5.3 présente les résultats obtenus pour l'ensemble de la région Picardie, pour la marge brute de l'exploitation, la surface en blé et la collecte de blé. Comme attendu, la marge brute avec introduction de la courbe à l'azote est plus importante que la marge brute sans introduction de la courbe, la différence étant nulle uniquement lorsque que le prix égale le prix de référence, même si cette différence est faible (de l'ordre de 1 pour mille et apparaît peu sur la figure). Le changement de surface est faible. Enfin, comme attendu à nouveau,

l'effet de l'introduction de la courbe de réponse à l'azote sur la part vendue du blé tendre est le plus significatif. De plus, et ce en accord avec les attentes économiques, cette part de production vendue est plus « lisse » avec les rendements endogènes.

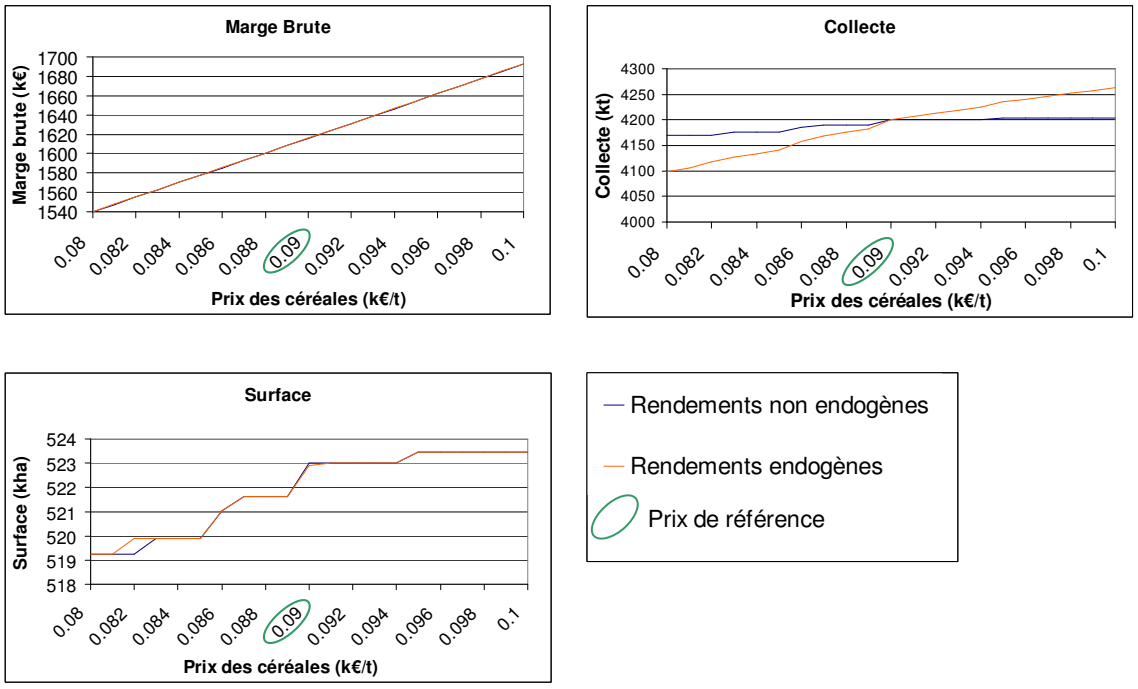


Figure 5.3 Effets des changements des prix des cultures de la SCOP sur la marge brute, la surface en blé, et la collecte de blé de la Picardie pour des rendements endogènes et exogènes.

5.3. Fonctionnement de AROPAj avec les courbes de réponse à l'azote : coût d'abattement des émissions de GES au niveau régional

5.3.1. L'introduction d'une taxe sur les émissions de GES dans le modèle AROPAj

L'effet des rendements endogènes sur le coût d'abattement des émissions de gaz à effet de serre a été analysé sur la région Picardie, pour laquelle les courbes de réponse à l'azote des cultures des différents groupes types ont été construites et introduites dans le modèle AROPAj. Le scénario de base correspond à la PAC de 1997. Le scénario testé consiste en l'introduction d'une taxe sur les émissions de GES, qui est un instrument économique de

régulation de premier rang et suppose donc que les émissions de GES sont connues, par ailleurs, le cheptel animal peut varier dans la limite de plus ou moins 15% par rapport au scénario de base. Dans l'hypothèse d'une nouvelle PAC, ou de la mise en place de politiques de régulation environnementale, telle une taxe, les prix des intrants azotés sont modifiés, et on s'attend à voir les coûts d'abattement des émissions modifiés selon que l'on prend ou non en compte les courbes de réponse à l'azote.

Les émissions de GES sont calculées de manière endogène, selon les modes de calculs préconisés par le GIEC (*cf.* De Cara *et al.*, 2004, De Cara *et al.*, 2005 pour plus de détails). Les émissions totales de GES constituent une des sorties du modèle AROPAj (i.e. un élément du vecteur x_k des activités du modèle) à laquelle correspond un élément du vecteur g_k (vecteur des prix et subventions), qui est la taxe par tonne d'équivalent CO_2 [34] émise. Dans le scénario de base, la taxe est supposée nulle.

5.3.2. Effets d'une taxe sur les émissions de GES après introduction des courbes de réponse à l'azote

Tout d'abord, on vérifie qu'avec le scénario de base, et sans taxe sur les émissions, les résultats avec et sans rendements endogènes sont identiques. Pour la Picardie, avec des rendements exogènes, une taxe de 25 €/teq-CO2 implique un abattement d'environ 160 kteq-CO2 par rapport aux émissions totales de 2000. Avec des rendements endogènes, le même niveau de taxe entraîne un abattement d'environ 320 kteq-CO2 (cf. Figure 5.4). Ceci peut s'expliquer par le fait que lorsque les rendements sont endogènes, le modèle prend en compte une gamme plus large de choix de production. En effet, non seulement les surfaces des cultures peuvent être ajustées lors du processus d'optimisation, mais aussi les dépenses en engrais qui affectent directement les rendements des cultures. Les coûts marginaux d'abattement sont par conséquent réduits.

---

[34] Tonne équivalent CO_2 : Les six GES retenus par le protocole de Kyoto n'ont pas la même puissance radiative, ni la même durée de vie dans l'atmosphère. Ces deux paramètres permettent de définir le Pouvoir de Réchauffement Global (PRG) de chacun des gaz, qui se mesure par comparaison avec celui du CO_2. Pour être comparées, les émissions des différents gaz sont ainsi pondérées par leur PRG et converties en une unité commune : **La tonne-équivalent-CO2 (teq-CO2)**.

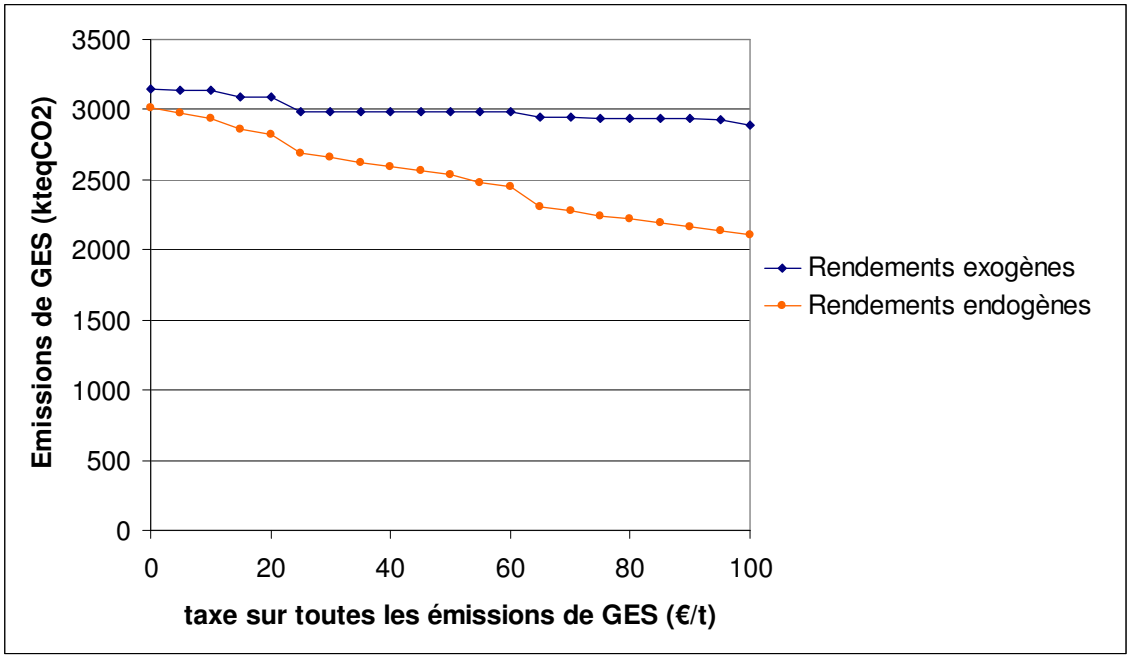


Figure 5.4 Emissions de GES pour la région Picardie, avec et sans rendements endogènes.

La Figure 5.4 présente l'évolution des émissions de GES, avec une PAC correspondant à l'agenda 2000, avec et sans rendements endogènes. L'introduction des courbes de réponse à l'azote dans le modèle économique entraîne un changement du système de prix, ce qui explique que même à taxe nulle, les émissions de GES ne sont pas égales pour des rendements endogènes ou exogènes. Lorsque la taxe est nulle, les rendements endogènes offrent la possibilité aux producteurs des fermes type de maximiser leur profit en ajustant la quantité d'azote apportée utilisée en fonction des prix (de l'agenda 2000). Ainsi les émissions de GES se trouvent réduites par rapport à une modélisation sans rendements endogènes. Avec l'augmentation de la taxe, les producteurs sont encouragés à réduire leurs activités les plus émettrices de GES (i.e. dans un premier temps, les activités de productions animales). Une limite importante à cet ajustement est la nécessité de nourrir les animaux. La réduction du cheptel animal ne peut être que de 15% au maximum, et parallèlement, les aliments achetés sont moins méthanogènes que les aliments produits sur la ferme et intraconsommés. Ainsi, à un niveau de taxe élevé, les producteurs sont incités à arrêter toute activité de production végétale, ou tout du moins, ils doivent réduire fortement leur niveau d'intrant azoté responsable d'émissions de GES. C'est ce que l'on observe Figure 5.5 : les émissions totales de GES suivent la même évolution que celles de N_2O pour les rendements exogènes ou

endogènes. La diminution des émissions sous l'effet de la taxe est due à une diminution des apports de fertilisants azotés responsables principaux des émissions de N_2O. Dans le même temps, l'évolution des émissions de méthane est sensiblement la même, quel que soit le mode de calcul des rendements par AROPAj, ce qui confirme le peu de variation du cheptel animal, qui constitue le contributeur essentiel aux émissions de CH_4.

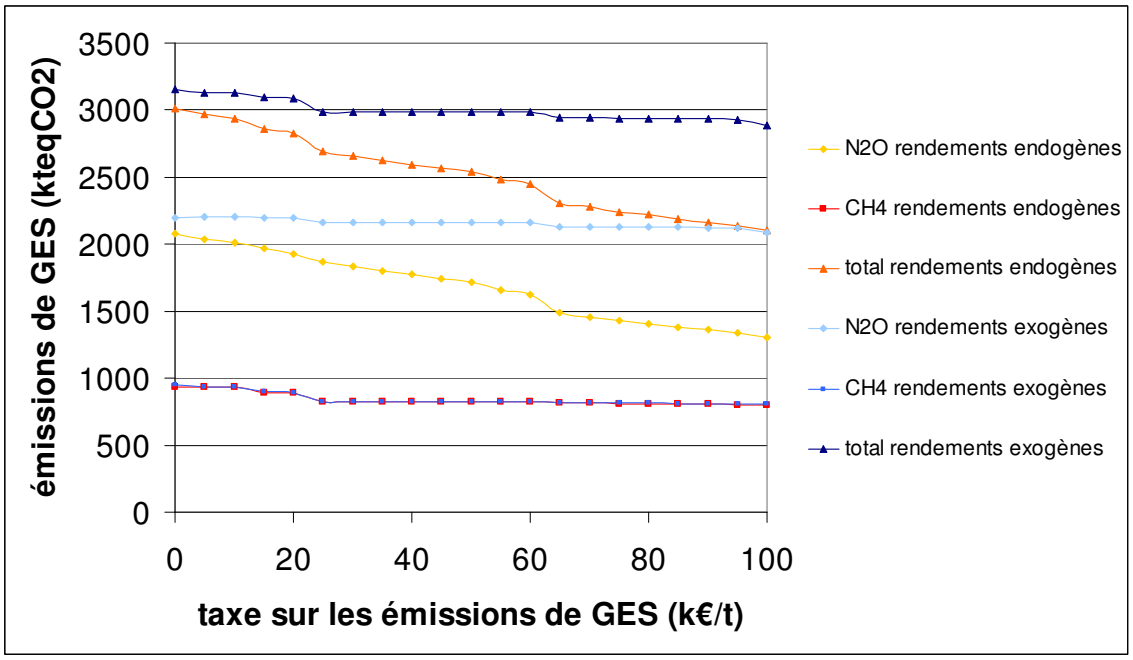


Figure 5.5 Les émissions de GES totales et par gaz pour des rendements endogènes et exogènes en Picardie.

5.4. Conclusion

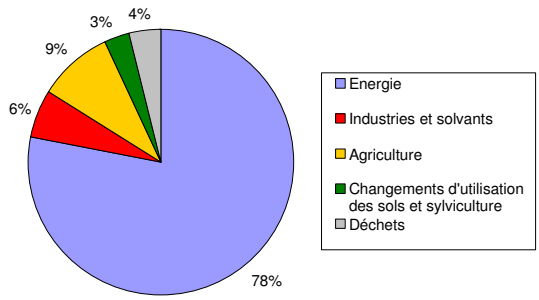
L'introduction des courbes de réponse à l'azote dans le modèle AROPAj lui permet de calculer les rendements au cours de l'optimisation de la marge brute du producteur de chaque ferme type. Les rendements ne sont plus des paramètres fixes, mais évalués avec le niveau de fertilisation azotée optimale. A partir de quelques exemples, nous avons montré que le modèle est plus sensible aux variations de prix, en particulier en ce qui concerne l'offre des productions végétales. Conformément aux attentes, les courbes d'offre sont plus « lisses » (les discontinuités sont moins abruptes). De plus, les instruments ou politiques mis en œuvre, comme les taxes, apparaissent plus efficaces. La prise en compte des courbes de réponse à

l'azote offre en effet une « marge de manœuvre » supplémentaire d'adaptation aux producteurs qui n'ajustent plus seulement leur niveau de productions végétales sur les surfaces, mais aussi sur les intrants azotés utilisés. Ainsi, le modèle se montre plus réactif aux scénarios et politiques testés, et en fournit une évaluation plus fine. Afin de pouvoir prospecter des scénarios en conditions de changement climatique, il est nécessaire de disposer de courbes de réponse à l'azote des cultures dans ces conditions.

Chapitre 6
Les courbes de réponse à l'azote en conditions de changement climatique

6. Les courbes de réponse à l'azote en conditions de changement climatique

L'agriculture est un secteur à la fois responsable d'émissions de gaz à effet de serre (GES) contribuant au changement climatique, et qui offre des puits d'absorption des gaz à effet de serre. De plus, les activités agricoles sont potentiellement directement influencées par ce changement climatique, au sens où les productions peuvent être modifiées, et l'organisation et les modes de production peuvent être affectés. L'agriculture est un des contributeurs importants parmi les secteurs émetteurs de GES (*cf.* Figure 6.1). Elle constitue en particulier la première source des émissions de N_2O (48 % des émissions de l'UE[35]) et de méthane (52 % des émissions de l'UE[35]). Les premières sont principalement issues de la fermentation entérique des ruminants et de la gestion des effluents d'élevage (ces deux postes représentant à eux seuls 95 % des émissions agricoles de méthane) ; les émissions de protoxyde d'azote proviennent en majorité de la volatilisation suite aux fertilisations minérales et organiques des sols agricoles. (Source Eurostat-UNFCC pour l'année 1998).



Source : http://europa.eu.int/comm/agriculture/envir/report/fr/clima_fr/report.htm

Figure 6.1 Répartition des émissions de GES par secteurs pour l'UE à 15.

[35] Selon les lignes directrices de l'IPCC, sont considérées comme provenant de l'agriculture les émissions spécifiques à la production agricole (émissions de CH_4 provenant de la gestion du cheptel et de la riziculture et émissions de N_2O provenant des sols agricoles), mais ne comprennent pas les émissions liées au « Changement d'utilisation des sols et sylviculture ».

Les effets du changement climatique sur l'agriculture peuvent s'envisager à différentes échelles et à plus ou moins long terme. C'est ce que nous rappellerons dans une première partie, afin d'identifier les effets les plus pertinents pouvant être pris en compte par un modèle de culture. En effet, les impacts potentiels du changement climatique sur les cultures du modèle AROPAj ne peuvent être pris en compte que via les courbes de réponse à l'azote, puisqu'elles permettent de faire le lien avec le milieu de production. Il est donc nécessaire d'étudier l'évolution des courbes de réponse à l'azote que nous avons construites dans un contexte de changement climatique. Pour cela, nous étudions tout d'abord comment les changements climatiques peuvent être pris en compte par un modèle de culture, et par STICS en particulier. Puis, nous détaillons le choix des séries climatiques futures et comment elles sont utilisées en entrées du modèle STICS. Enfin, nous analyserons les résultats obtenus pour les courbes de réponse à l'azote de quelques cultures et fermes types.

6.1. Les impacts potentiels du changement climatique sur l'agriculture

Le climat étant un facteur primordial de la production végétale, celle-ci se trouve directement dépendante de ses variations et de ses changements. Après avoir identifié les principaux changements, nous nous intéressons aux impacts potentiels, depuis les effets sur l'écophysiologie jusqu'à ceux sur les systèmes et régions de production. Puis nous montrerons les adaptations potentielles à différentes échelles.

6.1.1. Les changements climatiques pouvant influencer les productions et les activités agricoles

Le changement climatique avéré (entre autres par les experts du GIEC, Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat, site internet : http://www.ipcc.ch/) se caractérise principalement par :

- une augmentation de la température moyenne à la surface du globe,
- une augmentation de la teneur en CO_2 de l'atmosphère,
- une augmentation de la variabilité intra annuelle du climat (précipitations et évènements pluvieux, écarts de températures, …), et

- une augmentation des fréquences des évènements extrêmes (précipitations, fortes chaleurs ou forts gels, vents, orages violents…).

La température constituant en quelque sorte « l'horloge » du développement de la plante, le CO_2 étant la source de carbone des végétaux supérieurs et l'eau étant nécessaire à leur métabolisme, et ces facteurs pouvant interagir, la production végétale peut s'en trouver fortement affectée.

6.1.2. Les impacts des changements climatiques à plusieurs échelles

6.1.2.a. Les impacts à court terme - écophysiologie

i) Effets primaires de l'augmentation de la teneur en CO_2 atmosphérique

En présence d'une augmentation de la concentration atmosphérique en CO_2, la photosynthèse nette des plantes est elle aussi accrue : les résultats montrent une augmentation de l'ordre de 30 % pour les plantes en C3 et de 15 % pour les plantes en C4 pour un doublement de la concentration actuelle de la teneur en CO_2 (Brisson, 2004). Parallèlement, on observe une augmentation de la résistance stomatique (pour des raisons encore mal connues) qui limite la transpiration, ce qui engendre une plus grande efficience de l'eau (quantité de matière sèche accumulée par litre d'eau transpirée), en particulier pour les plantes en C4. Enfin, l'allocation du carbone semble se faire préférentiellement vers les racines (qui sont alors des puits de carbone souterrains constituant davantage des réserves carbonées qu'une expansion pour la plante).

ii) Effets de l'augmentation de la température

La température moyenne augmentant, la vitesse de développement en phase de croissance également, mais cette vitesse diminue en phase de repos hivernal pour les cultures d'hiver (vernalisation). Des risques d'échaudage peuvent subvenir au printemps lorsque les céréales d'hiver sont en place (faible remplissage des grains corrélé avec des températures maximales de l'air supérieure à 25 °C : Gate, 1995). La fertilité des épis diminue au dessus de 35 °C pour le riz, des résultats similaires ont été publiés pour le blé, le soja (Soussana, 2001). Selon la fenêtre thermique, la photosynthèse peut être accentuée ou limitée en conditions de

concentration en CO_2 atmosphérique plus élevée qu'actuellement, et sans tenir compte des interactions entre les facteurs, il est difficile d'évaluer leurs effets réels.

6.1.2.b. Les Impacts à court terme – interactions…

L'étude conjointe des différents facteurs, recommandées par le GIEC, permet de mieux appréhender l'impact final du changement climatique.

i) …entre facteurs physiques (Température, eau, [CO_2] atmosphérique)

Si l'on considère seulement l'accroissement de la résistance stomatique induit par l'augmentation de la concentration atmosphérique en CO_2, la transpiration diminue. Or cette diminution est compensée par l'augmentation de la surface foliaire (suite à la stimulation de la croissance) qui elle accroît la transpiration (Bazzaz et Sombroek, 1997, Brisson, 2004). Parallèlement, l'accroissement de la photosynthèse en présence d'une plus importante concentration en CO_2 atmosphérique reste limitée si la température est supérieure à l'optimum thermique (Brisson, 2004). Par ailleurs, la présence d'une contrainte hydrique (déficit en eau du sol), accentue l'augmentation de l'efficience de l'eau induite par l'augmentation de la teneur en CO_2 atmosphérique (Soussana, 2001).

ii) …avec les facteurs nutritifs et physiques du sol

D'après Soussana (2001), l'allocation accrue des produits de la photosynthèse vers les racines stimule également les puits de carbone souterrains associés aux racines (mycorhizes, bactéries symbiotiques fixatrice d'azote, micro-organismes de la rhizosphère), ce qui modifie le fonctionnement biologique du sol. En particulier, la disponibilité en azote pour le peuplement végétal est moindre, suite, entre autres, à une immobilisation accrue de l'azote minéral. Cette carence en azote favorise donc les légumineuses, et entraîne une compensation de l'apport azoté par des apports supplémentaires en engrais. La vitesse de décomposition des matières organiques reste incertaine sous nos latitudes. En effet, si elle est accélérée par l'augmentation

de la température du sol, elle nécessite une certaine teneur en eau du sol, qui a justement tendance à diminuer en conditions de températures plus élevées (Soussana, 2001). Enfin, l'érosion hydrique des sols est directement proportionnelle aux précipitations, alors que l'érosion éolienne augmente fortement au dessus d'une vitesse seuil du vent. Ces dégradations tendent à accentuer les stress hydrique et minéral des cultures, ce qui constitue une pression supplémentaire sur les régions déjà déficitaires (Bazzaz et Sombroek, 1997, Soussana, 2001).

iii) …avec les facteurs biotiques

Parallèlement aux dégradations du milieu physique, les facteurs biotiques interagissent également avec les changements des températures et des précipitations. En particulier, les pathogènes et les nuisibles peuvent endommager les cultures et réduire fortement les rendements espérés à la hausse (Rosenzweig et Hillel, 1998). Les maladies fongiques et bactériennes (comme par exemple, le mildiou, les rouilles) voient leur développement favorisé par des températures douces, des conditions d'humidité et de rayonnement favorables créant la rosée. Les adventices bénéficient, comme les cultures, des effets positifs de l'augmentation de la teneur en CO_2 atmosphérique. Or parmi les cultures alimentaires du monde, plus de 80 % sont des plantes en C3, qui si elles bénéficient plus de « l'effet fertilisant » du CO_2 pour leurs rendements que les C4, sont aussi plus sensibles au déficit hydrique. Et parallèlement, quatorze espèces d'adventices parmi les dix-huit les plus agressives sont des plantes en C4, mieux adaptées à des températures chaudes (Soussana, 2001). Les nuisibles et en particulier les insectes phytophages apparaissent favorisés par une réduction de leur mortalité hivernale en climat tempéré. Ils pourraient se montrer plus agressifs, en consommant des quantités plus importantes de végétaux suite à une baisse de la qualité des feuilles ingérées (*cf.* § 6.1.2.c.ii)) qui seraient moins riches en protéines.

Les impacts à court terme sont très dépendants des interactions des facteurs entre eux et peuvent ainsi avoir des répercutions diverses. A l'échelle de la plante, prendre en compte et intégrer les divers processus se révèlent parfois déjà complexe et l'expérimentation est parfois difficile lorsque l'on veut étudier les effets isolés des facteurs qui interagissent ou peuvent être antagonistes. Lorsque l'on s'intéresse à des échelles plus grandes et au plus long terme, les modèles de culture se montrent utiles. En effet, ils permettent une approche à l'échelle du cycle cultural et plus largement du système de culture, et l'étude des interactions entre

facteurs. Cependant, certains facteurs, tels les facteurs biotiques restent mal intégrés, et l'incertitude demeure sur l'horizon des scénarios de changement climatique proposés, ce qui maintient la difficulté d'une évaluation exhaustive des impacts sur les productions végétales.

6.1.2.c. Les Impacts : intégration des processus à plus long terme

i) À l'échelle du cycle cultural : influence sur le développement

A l'échelle du cycle cultural tout entier, l'augmentation de la température provoque un raccourcissement du cycle cultural des plantes annuelles (comme la plupart des grandes cultures). Cependant, ce sont surtout les phases de montaison et de remplissage qui sont concernées, alors que la phase végétative se trouve allongée (par manque de températures basses nécessaires à la vernalisation) (*cf.* Figure 6.2). Le déplacement des phases thermosensibles (montaison et remplissage des grains) augmente les risques d'accident dus au gel ou à des températures trop élevées.

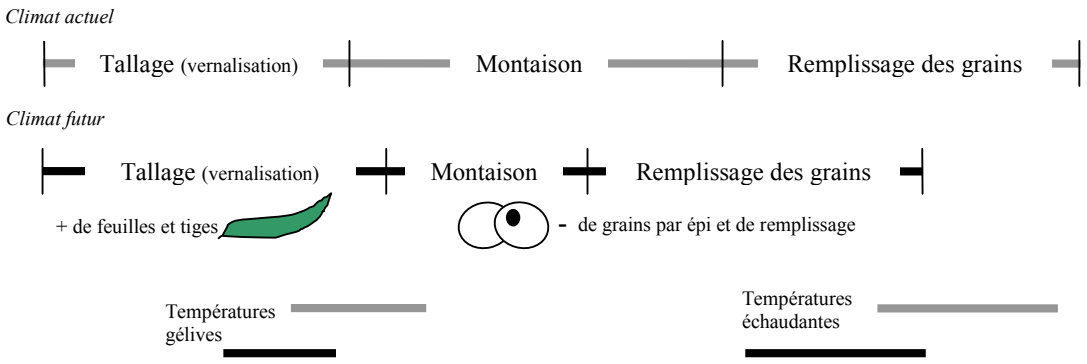


Figure 6.2 Effets du changement climatique sur le cycle de développement d'une céréale d'hiver (d'après Brisson, 2004).

En ce qui concerne les prairies, la saison de croissance a tendance à s'allonger, ce qui permet une durée de mise à l'herbe plus longue pour les troupeaux, et donc une augmentation du chargement animal. Ceci peut en parallèle augmenter la production de méthane (Soussana, 2001). Les autres pérennes connaissent aussi un changement de leur cycle de développement

suite à l'augmentation de la température. Les fruitiers qui sont soumis à des hivers trop doux ne peuvent bénéficier de levées de dormance suffisantes, de plus, l'avancée de la phénologie au printemps peut augmenter le risque de gel et de mauvaise fécondation des bourgeons floraux (Seguin *et al.*, 2004). La vigne subit de même une avancée de sa phénologie qui décale la floraison et surtout la maturation des fruits de plus en plus tôt (Seguin *et al.*, 2004).

ii) À l'échelle du cycle cultural : modification des rendements en qualité et quantité

Si l'augmentation de la teneur en CO_2 de l'atmosphère active la photosynthèse, elle peut être compensée comme nous l'avons vu par les interactions avec la température et le raccourcissement des cycles culturaux. De plus si la production primaire augmente, cela ne se traduit pas nécessairement par une augmentation du rendement. Concernant les grandes cultures, on s'attend à des effets contrastés selon les sites et les cultures, mais globalement modérés (plus ou moins 10 à 20 %). Pour les prairies, on s'attend à une augmentation de 20 % de la production de biomasse dans le Massif Central (Soussana, 2001).

Outre la quantité, les rendements peuvent également être affectés en terme de qualité, en particulier, la teneur en azote des productions. La forme de l'étroite liaison qui existe entre la teneur en carbone et en azote d'une plante (principe de la courbe de dilution de l'azote, Lemaire et Gastal, 1997, *cf.* § 1.1.2.b.vi) Figure 1.9) implique donc, pour une fertilisation azotée identique à l'actuelle, une diminution de la teneur en azote de la plante et donc de la teneur en protéines des grains. De même, la baisse du rapport protéine/énergie des fourrages entraîne une moindre disponibilité en protéines microbiennes pour les ruminants, ce qui induit également une production accrue de méthane par les micro-organismes du rumen. Cet effet serait modulé selon la nature de la prairie pâturée, car les élevages extensifs aux prairies peu riches en protéines auraient ainsi tendance à être plus méthanogènes, alors que les élevages intensifs valorisant des prairies riches en protéines verraient leur production de méthane augmenter modérément (Soussana, 2001). Enfin, les fourrages auront tendance à être plus riches en lignine ce qui diminue leur digestibilité.

iii) À l'échelle du cycle cultural : effets sur l'environnement pédoclimatique

L'environnement pédoclimatique de la culture se trouve également modifié par le changement climatique global. La demande en eau de la culture est actuellement estimée par des calculs d'ETP. Cependant, dans son expression actuelle, celle-ci ne prend pas en compte le fait que la résistance stomatique augmente (suite à une augmentation de la teneur en CO2 atmosphérique) via les coefficients culturaux. Parallèlement, les précipitations ont tendance à être plus importantes au Nord de la France et de l'Europe en hiver et plus faibles en été. Comme nous l'avons déjà souligné, La demande en azote des cultures aura tendance à augmenter (§ 6.1.2.c.ii)), mais l'offre du sol a une évolution qui est a priori plus complexe, compte tenu des interactions entre température et humidité du sol (§ 6.1.2.b.ii)) pour la minéralisation de la matière organique. Il est difficile de comparer l'évolution de la vitesse de décomposition dans les sols européens à celle observée dans les sols tropicaux, car outre les conditions thermiques et hydriques, la microfaune et la microflore n'y sont pas du tout les mêmes (Soussana, 2001). En conséquences, des ajustements de fertilisation et d'irrigation seront nécessaires dans certains cas, ce qui n'est pas sans effet. En particulier, une fertilisation accrue augmente les émissions de N_2O, et les risques de lixiviation des nitrates.

iv) À l'échelle du système de cultures

L'intégration de l'ensemble des processus que nous venons d'évoquer à l'échelle des systèmes de culture peut avoir des répercutions sur l'organisation du travail et les choix techniques. L'exemple de la succession culturale blé-maïs présentée Figure 6.3 montre que plusieurs moments clés sont potentiellement affectés. La pluviométrie, plus variable qu'actuellement, peut réduire les jours disponibles pour les travaux du sol, d'implantation de la culture ou de récolte, eux-mêmes dépendants des choix de variétés et de dates de semis. En cours de culture, les dates et doses de fertilisation peuvent aussi être remises en cause, ainsi que les apports d'eau (surtout pour le maïs). La gestion de l'eau et de l'azote pendant l'interculture, dont la durée tend à être plus courte suite à l'allongement des cycles, peut aussi être modifiée, et les pratiques actuelles amenées à évoluer. Par exemple, les cultures intermédiaires pièges à nitrates (CIPAN), peuvent se développer au Nord où les pluies hivernales sont importantes, ou limitées au Sud pour économiser l'eau. Les changements

climatiques auront aussi des répercutions directes sur la gestion des maladies et des adventices et appellent des méthodes adaptées à ces nouvelles conditions de pression biotique.

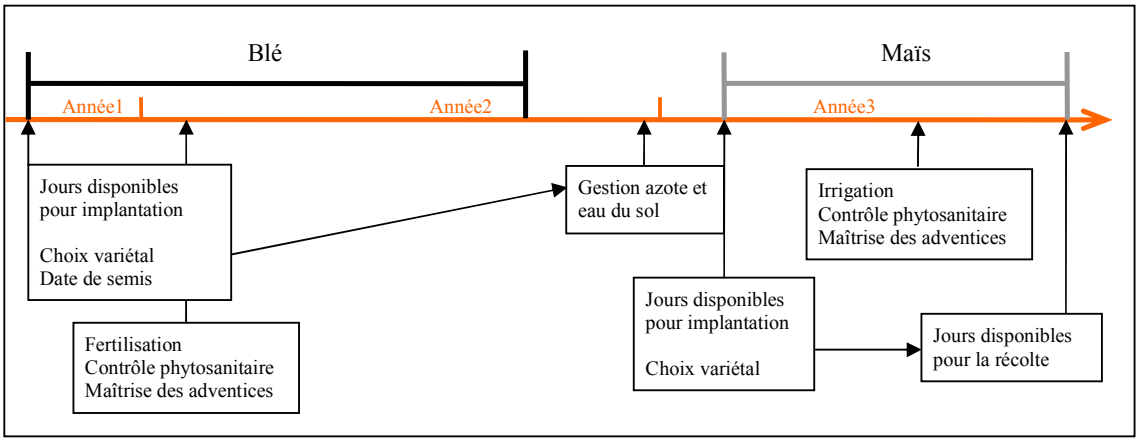


Figure 6.3 Les opérations culturales susceptibles d'être modifiées par le changement climatique dans une succession blé-maïs (d'après Brisson, 2004).

v) À l'échelle des régions de production

Plus largement, à l'échelle des régions de production, on peut s'attendre à un déplacement des zones bioclimatiques. Ceci concerne les aires de production, surtout les systèmes de culture des régions marginales : par exemple, l'aire de production des céréales en Finlande devrait s'étendre de 100 à 150 km vers le pôle pour 1°C d'augmentation de température (Fellous, 2003), ou bien, en montagne (le maïs gagnerait 300 m en altitude dans les Hautes-Alpes, d'après Juin *et al.*, 2004). Les aires d'influence des nuisibles et des parasitismes peuvent elles aussi s'étendre ou se modifier : par migration (par exemple, chenille processionnaire du pin), par adaptation à des conditions nouvelles (par exemple, le phomopsis du tournesol), ou en émergeant (exemple de l'aleurode *Bemisia tabacci*). Ce « déplacement » des aires de production n'est pas sans poser un certain nombre de questions, en particulier, vis-à-vis des AOC (Appellations d'Origine Controlée) qui sont liées à une aire géographique et ne peuvent donc pas se « délocaliser » (Seguin *et al.*, 2004).

Les filières aval de l'agroalimentaire peuvent également ressentir cette modification de la localisation des aires de production, comme par exemple les industries de transformation légumière dont les unités se situent à proximité des bassins de production. La transformation

des produits étant aussi fortement dépendant de leur qualité, son changement peut aussi entraîner des modifications des procédés aval.

Les filières en amont de la production végétale, telles que les industries des phytosanitaires et fertilisants, peuvent également subir les effets indirects du changement climatique en devant répondre à une demande qui semble croissante et différente de la demande actuelle.

Les paysages se trouveront fortement modifiés par les modifications des localisations des cultures et plus largement de toutes les espèces végétales ainsi que des populations de nuisibles. Plus largement, l'environnement subira des pressions fortes, en étant soumis à des risques plus importants d'érosion, de pollution par les produits lessivés (phytosanitaires et nitrates) ou par les GES émis (méthane et N_2O) (Fellous, 2003).

D'un point de vue économique, l'organisation des marchés peut se trouver déstabilisée suite aux variations d'offre de produits et de demande d'intrants que l'on vient d'aborder. En particulier, les marchés locaux organisés en fonction des niveaux de productions d'aires géographiques spécifiques (Fellous, 2003).

Toutes ces modifications n'étant cependant pas brutales, des adaptations sont possibles, et sont d'ailleurs pour certaines déjà mises en places. Elles se situent à plusieurs niveaux et nécessitent plus ou moins de moyens.

6.1.3. Les adaptations possibles

6.1.3.a. Les changements techniques

Les changements techniques font partie des adaptations qui sont déjà en partie mises en place. En effet, certains consistent en des réadaptations d'itinéraires techniques déjà existants et ne réclament pas de changement majeur de mode de conduite des cultures. Par exemple, cela peut être une modification des dates de semis, des apports azotés, de l'irrigation. L'évolution des dates de semis est déjà observable (par exemple celle du maïs, voir Figure 6.4).

D'autres adaptations impliquent des acteurs et mobilisent des compétences au-delà du producteur. En particulier, certaines impliquent des investissements lourds en terme de recherche/développement et financiers. C'est le cas de la mise au point de nouvelles variétés

adaptées à des conditions thermiques, hydriques et de pressions biologiques nouvelles, de la mise au point de nouveaux herbicides et pesticides plus efficaces. Cela concerne aussi la recherche de la mise au point de pratiques culturales innovantes (en matière de conservation des sols, d'irrigation, de conduites culturales de manière générale…).

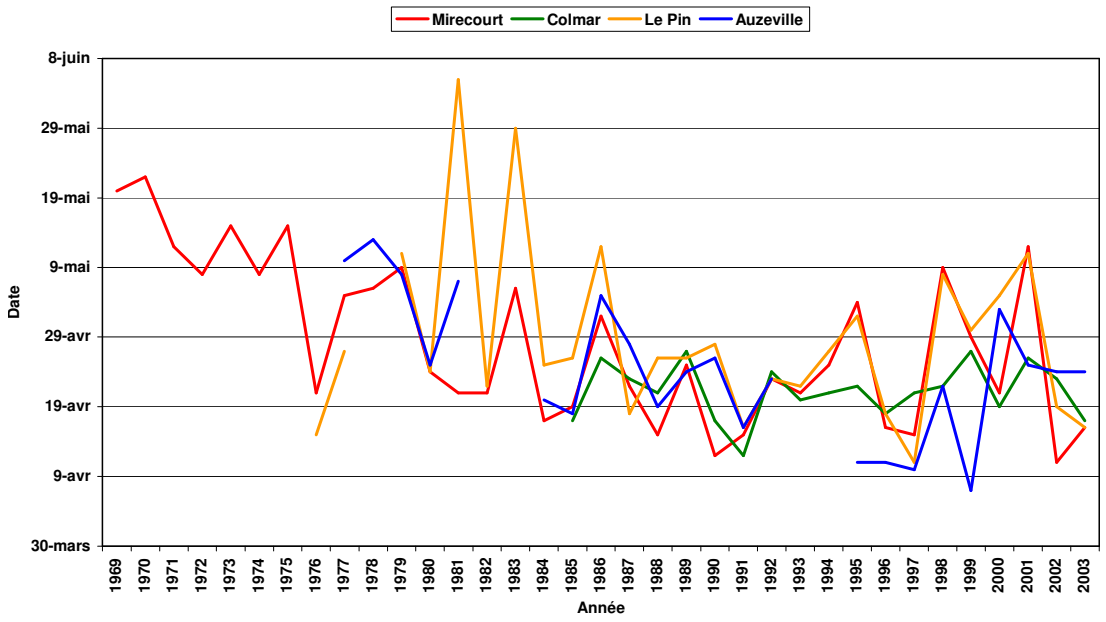


Figure 6.4 Evolution des dates de début de semis du maïs dans quatre unités expérimentales de l'INRA

6.1.3.b. Anticipations économiques et politiques

D'un point de vue privé, les souscriptions d'assurances font partie des formes d'anticipation possibles, cependant, la question de l'évaluation de la variabilité réelle des impacts reste posée et rend difficile le calcul des primes. D'un point de vue public, des mesures incitatives telles que les taxes, sur des apports trop élevés d'azote ou sur les émissions de GES, peuvent être mises en places (*cf.* § 5.3 introduction d'une taxe sur les émissions), ou bien des primes pour l'application de certains modes de conduite de cultures. Les aides compensatoires peuvent également compléter les mesures incitatives en indemnisant par exemple les pertes de rendement ou de revenu des agriculteurs.

Les interactions et rétroactions physiques, techniques, et économiques qui s'exercent sur l'agriculture suite au changement climatique sont variées et complexes. Afin de les prendre en compte, au moins en partie, et afin de mieux pouvoir évaluer ensuite les dommages, les modèles peuvent nous aider à intégrer les différents aspects de la question. En particulier, les modèles STICS et AROPAj liés par les courbes de réponse à l'azote présentent l'intérêt de pouvoir intégrer à la fois les aspects biologiques, techniques et économiques de la production agricole. Nous nous intéressons d'abord à la prise en compte des changements climatiques au sein du modèle STICS afin d'étudier leurs répercutions sur les courbes de rendement à l'azote construites pour chaque culture de chaque ferme type.

6.1.4. La prise en compte des changements climatiques par le modèle STICS

Les modèles décrivant les processus de la production végétale ont été les plus utilisés pour les études sur le changement climatique, car ils sont également les plus à même de prendre en compte les effets dynamiques de l'augmentation de la concentration atmosphérique en CO_2 (Tubiello et Ewert, 2003). Ces modèles sont des modèles génériques (*cf.* § 1.1.2.a.i)) qui ont aussi été utilisés dans l'aide à la décision ou d'autres études agri-environnementales (comme les modèles DSSAT, EPIC, SUCROS-WOFOST, STICS). Les cultures les plus étudiées en conditions de changements climatiques sont les céréales (maïs, blé et riz) loin devant toutes les autres. Le modèle générique STICS a été utilisé entre autres pour l'étude des impacts du changement climatique sur les zones de productions fourragères dans les Hautes Alpes (Juin *et al.*, 2004), sur les changements possibles de la phénologie des pommiers et pêchers en vallée du Rhône (Domergue, 2001), sur la qualité du blé dur (Lebonvallet, 2002).

Les modèles de cultures qui intègrent les changements climatiques le font principalement par le biais de l'augmentation de la teneur en CO_2 de l'atmosphère, et de l'augmentation de la température et des variations de précipitations qui font partie de leurs entrées.

L'effet de l'augmentation de la teneur en CO_2 atmosphérique sur la photosynthèse et l'assimilation du carbone se fait habituellement dans les modèles en modifiant l'efficience de conversion du rayonnement intercepté (Radiation Use Efficiency, RUE) (Tubiello et Ewert, 2003). C'est à peu près ce qui se passe dans STICS où l'efficience de conversion est affectée par une augmentation de la teneur en CO_2 selon une approche proposée par Stockle *et al.*, 1992a, identique à celle utilisée par le modèle EPIC. L'effet CO_2 sur l'efficience de conversion (FCO2) est une relation exponentielle dont le paramètre est calculé de sorte que la courbe passe par le point (600, ALPHACO2) (*cf.* Figure 6.5 et équation 6.1).

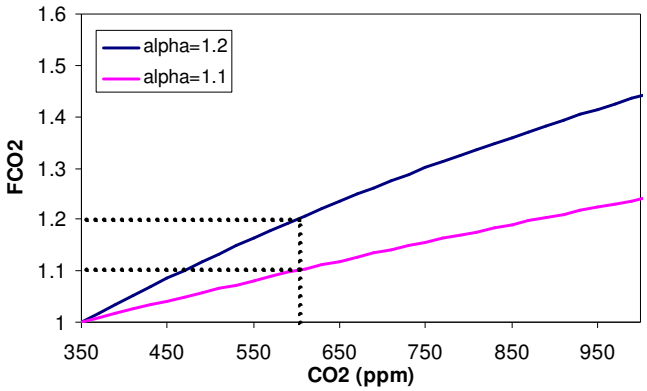


Figure 6.5 L'effet CO_2 sur l'efficience de conversion en fonction de la teneur en CO_2 dans STICS (d'après Brisson et Mary, 2002).

$$FCO2 = 2 - \exp[-KCO2(CO2 - 350)] \text{ et } KCO2 = \frac{-\ln(2 - ALPHACO2)}{600 - 350} \qquad \text{Equation 6.1}$$

Où *ALPHACO2* est un paramètre à valeur dépendant de la culture
et *CO2* : teneur en CO_2 atmosphérique.

STICS simule également l'effet de l'augmentation de la teneur en CO_2 sur l'augmentation de la résistance stomatique qui limite les pertes d'eau par la plante. Le modèle intègre les observation de Idso, 1991 qui a montré que l'effet CO2 sur l'efficience de conversion est proportionnel à l'effet CO2 sur la conductance stomatique, dans un rapport de 2,5 pour un ajout de 300 ppm à la concentration nominale. STICS combine à cette approche un formalisme proposé par Stockle *et al.*, 1992a, indépendant de l'espèce :

$$\textit{effet CO2 sur la conductance stomatique} = 1.4 - 0.4 \times \frac{[CO_2]}{330}$$

Ainsi, le modèle peut à la fois tenir compte de l'espèce et simuler un effet continu de la teneur en CO_2 sur la résistance stomatique (Equation 6.2).

$$FCO2S = \frac{1}{1 + 0.77\left(1 - \frac{FCO2}{2.5}\right)\left(1 - \frac{CO2}{330}\right)} \qquad \text{Equation 6.2}$$

Avec
FCO2S : effet CO_2 sur la résistance stomatique
FCO2 : effet CO_2 sur l'efficience de conversion
CO2 : teneur en CO_2 atmosphérique

Par ailleurs, dans STICS, l'augmentation de température intervient sur le « moteur » du développement, le bilan hydrique et le niveau de stress hydrique et azoté via la disponibilité des nutriments du sol (minéralisation de l'azote).

La disponibilité en eau joue en accentuant les effets du CO_2 si elle est faible et inversement. A l'opposé, lorsque la culture est moins bien fertilisée en azote, elle tend à moins répondre à l'augmentation de $[CO_2]$. Le modèle STICS prend en compte ces effets indirectement, via les effets sur le développement et/ou la croissance du peuplement végétal. Enfin, les autres effets du changement climatique tels que la compétition ou le développement d'adventices, de nuisibles, de maladies, ou bien encore les effets conjoints avec les polluants atmosphériques (ozone, …) sont encore mal intégrés dans les modèles de culture et dans STICS en particulier.

L'utilisation de la modélisation par STICS permet de faire la synthèse de nombreux effets du changement climatique, même si elle n'est pas parfaite et n'intègre pas encore tous les facteurs. Elle permet une estimation du potentiel de production en conditions climatiques modifiées, qui intègre les facteurs influant sur le sol et la plante de manière directe et indirecte. Comment utiliser alors le modèle STICS en conditions de changement climatique ? Pour notre étude, quelles données climatiques utiliser et quelles hypothèses faire pour construire des courbes de réponse à l'azote dans ces conditions ?

6.2. Méthodologie de la prise en compte du changement climatique par les courbes de réponse

Les émissions de gaz à effet de serre qui induisent les changements climatiques sont intégrées au sein de scénarios élaborés par le GIEC et publiés dans les « Special Reports on Emission Scenarios (SRES) ». Ces scénarios prennent en compte différentes hypothèses sur l'évolution de la population mondiale, le développement économique et le développement des technologies énergétiques, et enfin, la protection de l'environnement. L'évolution des changements climatiques amorcés dépend en effet de ces différents facteurs qui influencent les émissions de GES. Les scénarios fournissent une base commune aux études et aux discussions sur le changement climatique encadrées par une certaine normalisation. Nous détaillons dans ce paragraphe quel scénario de changement climatique nous avons sélectionné, et quel modèle climatique nous avons utilisé. Nous montrons ensuite comment nous avons validé les données du modèle avant de les utiliser avec le modèle STICS pour construire des courbes de réponse en conditions de changement climatique.

6.2.1. Elaboration des données climatiques

6.2.1.a. Choix du scénario de changement climatique

Les scénarios SRES du GIEC sont présentés dans le Tableau 6.1. Les hypothèses sur lesquelles ils reposent se décomposent selon les 4 axes (dont 3 sont présentés Figure 6.6) : l'évolution de la population mondiale, la protection de l'environnement, le développement économique, et celui des technologies énergétiques. Le scénario B2 a été retenu pour notre travail, car il s'agit d'un scénario « moyen » : le développement économique est modéré ainsi que la croissance de la population mondiale. La protection de l'environnement est prise en compte à un niveau régional. D'un point de vue purement climatique, les variations prévues sont aussi modérées par rapport aux autres scénarios. La teneur en CO_2 atmosphérique prévue est d'environ 620 ppm à horizon 2100 (contre 600 ppm pour le scénario B1, le plus optimiste pour le CO_2, et presque 900 ppm pour le scénario A1Fl, le plus pessimiste pour le CO_2). L'augmentation de température prévue est elle de 2.5 °C à ce même horizon (contre 1.8 °C pour le scénario B1, le plus optimiste vis-à-vis de la température, et presque 4.5 °C pour le scénario A1F1, le plus pessimiste vis-à-vis de la température).

<table>
<tr><th>Hypothèses</th><th colspan="3">Scénarios
« technologies énergétiques »</th><th>Scénario
hétérogène</th><th>Scénario
régional</th><th>Scénario
convergent</th></tr>
<tr><td>Evolution de la population mondiale</td><td colspan="3">Culmine en 2050 pour décliner ensuite</td><td>Accroissement continu</td><td>Accroissement faible mais continu</td><td>Culmine en 2050 pour décliner ensuite</td></tr>
<tr><td>Situation économique mondiale</td><td colspan="3">Croissance très rapide réduction des différences régionales dans le revenu par habitant</td><td>Croissance très fragmentée, développement régional</td><td>Niveaux intermédiaires de développement économique, viabilité économique</td><td>Vers une économie fondée sur la prestation de services</td></tr>
<tr><td>Protection de l’environnement</td><td colspan="3">Solutions essentiellement technologiques</td><td>Disparité des solutions</td><td>Solutions axées sur le régional</td><td>Solutions mondiales</td></tr>
<tr><td rowspan="3">Evolution et diffusion des nouvelles technologies</td><td colspan="3">Evolution très rapide forte pénétration des nouvelles technologies énergétiques</td><td rowspan="3">Evolution très lente et très fragmentée selon les régions du globe</td><td rowspan="3">Evolution lente et disparités des technologies selon les régions du globe</td><td rowspan="3">Evolution et diffusion rapide des technologies propres et de l’efficacité énergétique</td></tr>
<tr><td>Tout fossile</td><td>Mixte</td><td>Non fossile</td></tr>
<tr><td>Exploitation des énergies fossiles</td><td>Efficacité énergétique + exploitation de toutes les énergies</td><td>Exploitation des énergies non fossiles</td></tr>
<tr><td>Type de scénario</td><td>A1Fl</td><td>A1B</td><td>A1T</td><td>A2</td><td>B2</td><td>B1</td></tr>
</table>

Tableau 6.1 Les scénarios de changement climatique du GIEC et les hypothèses sous-jacentes.

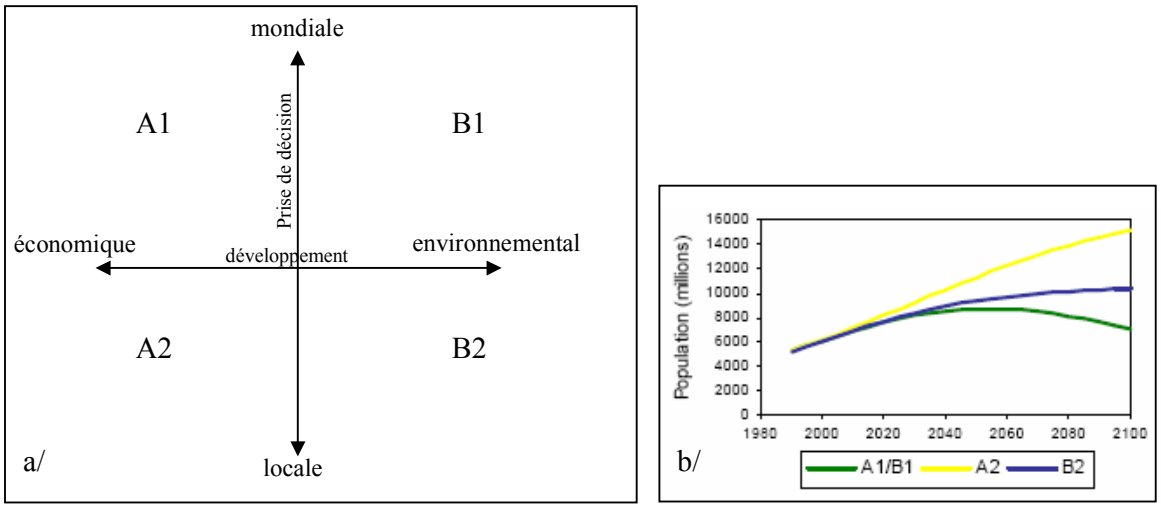


Figure 6.6 Les scénarios « SRES » de changement climatique du GIEC selon les types de développement et l'échelle de prise de décision (a/) et le développement de la population mondiale (b/).

Le scénario de changement climatique étant déterminé, nous avons ensuite choisi un modèle climatique qui le prenne en compte et qui puisse générer les entrées climatiques nécessaires au modèle STICS.

6.2.1.b. Le modèle générant les variables climatiques futures

Les simulations du climat futur sont en général issues de modèles couplés, de résolutions variables (atmosphérique, océanique, banquise) qui permettent de faire les forçages radiatifs et de température de l'océan requis. Par ailleurs, le GIEC préconise de développer des modèles régionaux de climat, afin de mieux simuler les changements climatiques à une échelle locale (par opposition à l'échelle mondiale). Ceci permet en effet de réaliser des études telles celles que nous menons sur l'impact des changements climatiques sur l'Europe, ou pour des étendues géographiques moindres. Mais augmenter la résolution des modèles globaux atmosphériques et océaniques couplés se révèle trop coûteux en temps de calcul (Gibelin et Déqué, 2001). Actuellement en France, le laboratoire du Centre National de Recherches Météorologiques (CNRM) offre un modèle régionalisé de résolution spatiale importante (50×50 km) : Arpège-Climat (Gibelin et Déqué, 2001). Un modèle à forte résolution, limité à la zone d'intérêt (l'Europe), similaire à celui utilisé pour les prévisions météorologiques, interagit avec un modèle (mondial) de circulation générale pour fournir les données climatiques à une résolution intéressante pour notre travail. Cette résolution permet d'utiliser directement les sorties du modèle climatique en tant qu'entrées d'un modèle de culture.

Le modèle Arpège-Climat est adapté à notre zone d'étude (l'Europe). Comme nous ne disposons que des données pour la France, nous avons donc restreint notre étude à cette aire géographique. Si ce modèle offre une résolution spatiale intéressante et suffisamment forte pour utiliser les données climatiques directement en entrée de STICS, une étude préalable est cependant nécessaire, afin de s'assurer de la fiabilité du scénario (Brisson *et al.*, 2005).

6.2.1.c. Evaluation de la fiabilité des données climatiques générées par le modèle Arpège-Climat

Après avoir décrit les données fournies par le modèle Arpège, nous vérifions leur fiabilité, et lorsqu'elle n'est pas satisfaisante, nous proposons une méthode pour l'améliorer.

i) Les données du modèle Arpège-climat

Le modèle Arpège-Climat simule deux séries de trente années de données climatiques journalières : une série « actuelle » ou plutôt « passée » (de 1960 à 1989), et une série « future » (de 2070 à 2099). Cette dernière intègre une évolution de la teneur en CO_2 atmosphérique correspondant au scénario B2 (640 ppm à horizon 2070-2100). Les variables climatiques journalières produites sont :

- La température maximale,
- La température minimale,
- L'humidité relative de l'air,
- La vitesse du vent à 10 m, et
- Le rayonnement global.

La localisation des points de simulation du modèle Arpège est représentée Figure 6.7. Si la résolution du modèle Arpège Climat permet une utilisation directe des données par un modèle de culture, plusieurs études régionales ont montré l'existence de biais pour la pluviométrie (Diaz, 2004, Brisson *et al.*, 2005). Une étude préalable à l'utilisation des données climatiques futures est donc nécessaire pour évaluer la fiabilité des données du modèle sur l'ensemble du territoire français.

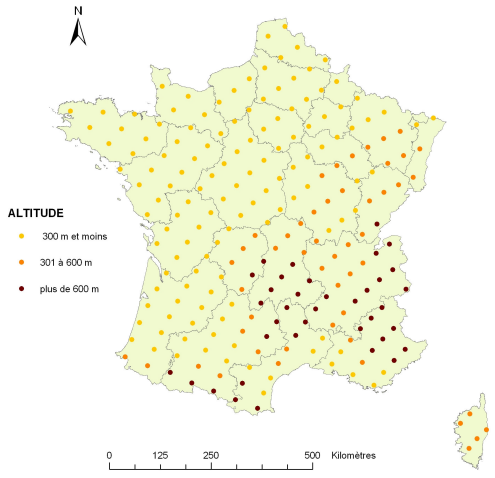


Figure 6.7 Localisation des points du modèle Arpège-Climat et leur classe d'altitude

ii) Evaluation de la fiabilité des données climatiques

Pour évaluer la fiabilité des données climatiques du modèle, nous avons utilisé des enregistrements météo passés des stations du réseau Agroclim INRA. Ces sept stations, Avignon, Toulouse, Dijon, Mirecourt, Versailles, Lusignan et Rennes, sont réparties sur le territoire français (*cf.* Figure 6.8). Pour comparer les données météo de ces stations aux données des séries climatiques provenant du modèle Arpège, nous avons considéré le point de simulation Arpège le plus proche de chaque station (*cf* Figure 6.8). Les enregistrements météo ne couvrent pas toutes la période simulée par Arpège. Selon les stations, nous disposons de 15 à 20 années d'enregistrement antérieurs à 1990 (*cf.* Tableau 6.2). Nous avons considéré cette période car après 1990, la dernière décennie du XX^{ème} siècle apparaît comme la plus chaude jamais enregistrée par les relevés météo : on considère que le régime climatique n'est alors plus le même qu'au XX^{ème} siècle (GIEC Groupe de travail I, 2001).

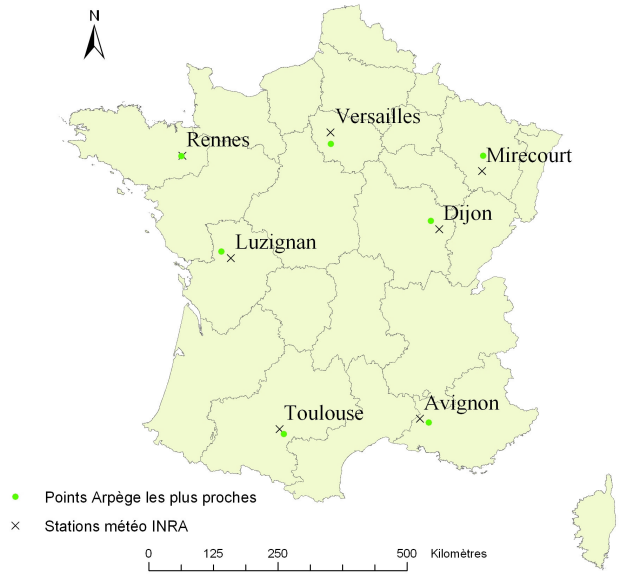


Figure 6.8 Localisation des stations météo INRA et des points du modèle Arpège les plus proches.

Station météo	Nombre d'années disponibles	Année la plus ancienne	Année la plus récente	Variables météo disponibles
Avignon	20	1970	1989	Tmin, Tmax, P, Rg, ETP, V, Hr
Toulouse	19	1971	1989	Tmin, Tmax, P, ETP, V, Hr
Dijon	20	1970	1989	Tmin, Tmax, P, Hr
Mirecourt	17	1973	1989	Tmin, Tmax, P, ETP, V
Lusignan	19	1971	1989	Tmin, Tmax, P, ETP, V, Hr
Rennes	15	1975	1989	Tmin, Tmax, P
Versailles	19	1971	1989	Tmin, Tmax, P, Rg, ETP, V

(Tmin = température minimale, Tmax = température maximale, P = précipitations, Rg = rayonnement, ETP = évapotranspiration Penman, V = vitesse du vent, Hr = humidité relative del'air).

Tableau 6.2 Les données météo disponibles pour évaluer la fiabilité du modèle Arpège sur le territoire français

Nous comparons ensuite trois types de séries climatiques pour chacune des sept stations : la série passée simulée par Arpège (notée P), la série passée observée issue des enregistrements météo (notée O) et la série future simulée par Arpège (notée F). Pour cela, nous avons confronté, pour ces trois séries climatiques :

- La moyenne annuelle des températures minimales et maximales,
- le cumul annuel des précipitations,
- le nombre d'évènements pluvieux par mois et par année, et
- la distribution des évènements pluvieux dans l'année.

Si le modèle climatique est fiable, les séries O et P doivent être similaires. La différence observée entre les séries P et F sera alors attribuée au changement climatique et non à une erreur du modèle climatique Arpège.

Nous effectuons une analyse de variance suivie d'un test de Duncan d'égalité des moyennes, avec un niveau de significativité à 95 %, pour comparer deux à deux les moyennes des températures moyennes annuelles (minimales et maximales) et les cumuls annuels de précipitations, des trois séries climatiques. Les séries de chacune des sept stations climatiques sont analysées indépendamment.

On observe un groupe de moyenne pour les données passées et un pour les données futures, et ce pour les températures minimale et maximale (voir Figure 6.9). Les données de température

du modèle Arpège peuvent donc être considérées comme fiables, ce qui est en accord avec les études précédentes (Lebonvallet, 2002, Diaz, 2004, Brisson *et al.*, 2005). Par contre, les cumuls de pluviométrie apparaissent peu fiables (voir Figure 6.10). En effet, soit aucune différence n'est observée entre toutes les séries O, P et F (cas de Lusignan, Versailles et Rennes), soit deux groupes apparaissent significativement différents, mais ils distinguent la série observée des séries du modèle (cas de Avignon, Mirecourt et Dijon), ou bien distinguent la série passée simulée des autres séries (cas de Toulouse). Les distributions des cumuls pluviométriques annuels confirment les différences observées. Si pour Versailles, Toulouse et Rennes, on observe des distributions semblables, pour les stations de Mirecourt et Dijon, le modèle Arpège surestime la pluviométrie, alors qu'il la sous-estime nettement pour la station d'Avignon (cf. Annexe 9 A). Par ailleurs, le nombre de jours pluvieux annuels est systématiquement surévalué, quelle que soit la station.

Les auteurs du modèle climatique (Gibelin et Déqué, 2001) montrent que ce biais dans l'estimation des précipitations peut s'expliquer par la faible résolution de la grille qui prend difficilement en compte les phénomènes convectifs. Il est nécessaire de corriger ce biais afin de disposer de données fiables pour les simulations réalisées avec le modèle de culture.

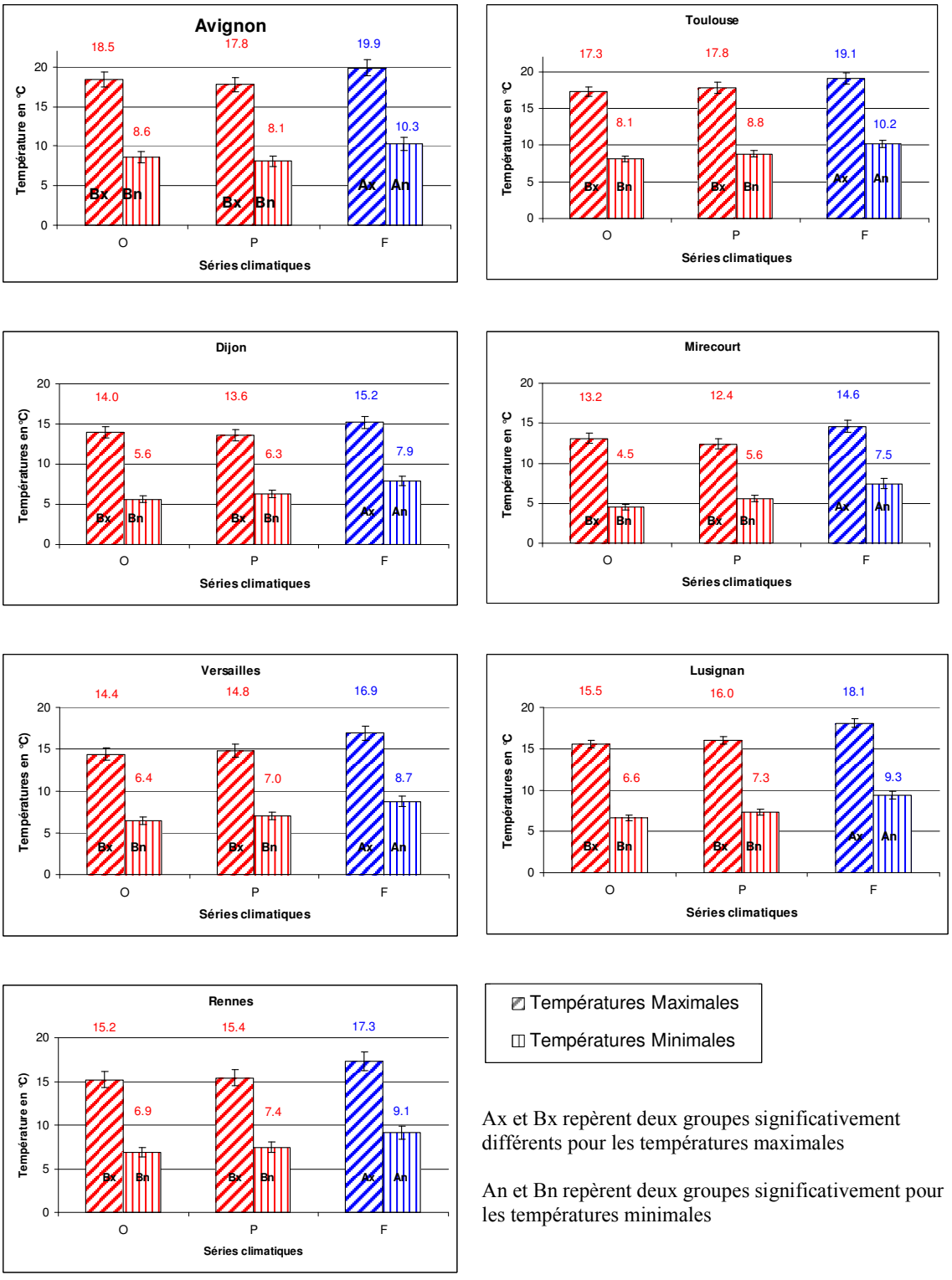
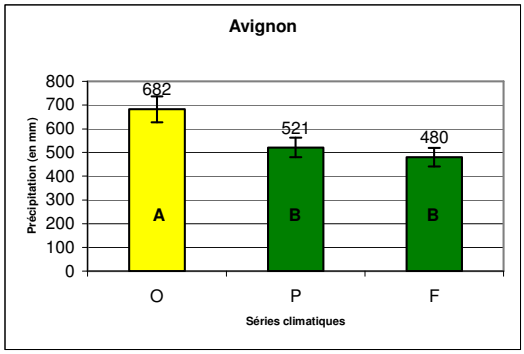
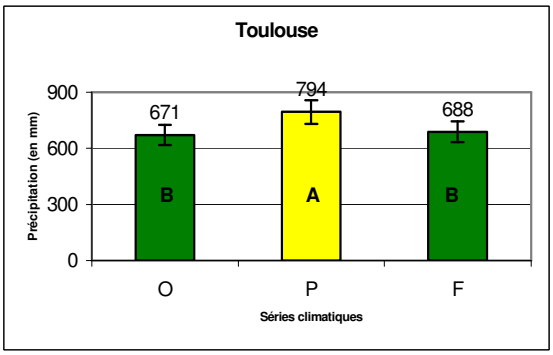
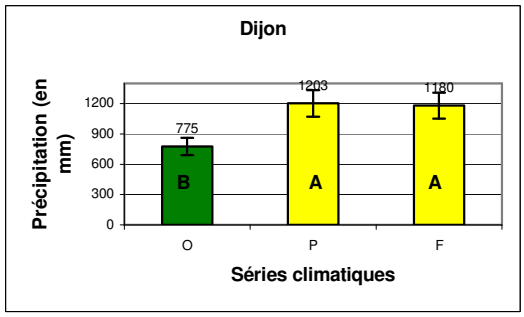
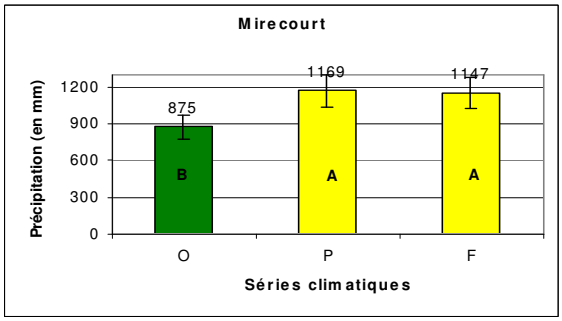


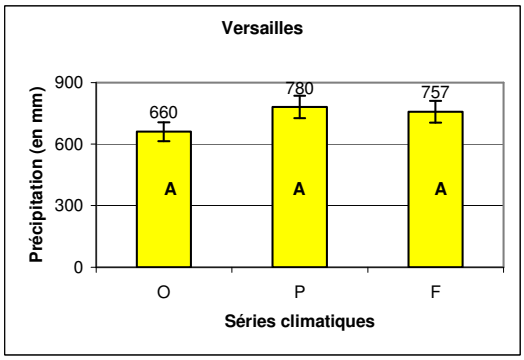
Figure 6.9 Comparaisons des températures moyennes annuelles pour les séries observée (O), passée simulée (P) et future simulée (F)

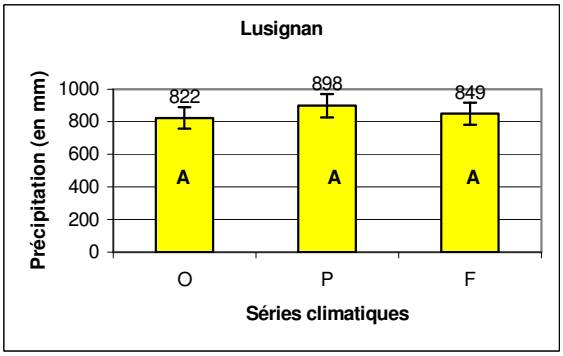


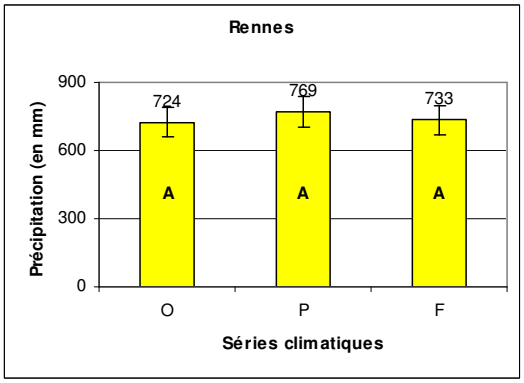












A et B repèrent deux groupes significativement différents pour les cumuls annuels de précipitations

Figure 6.10 Comparaison des cumuls pluviométriques annuels pour les séries observée (O), passée simulée (P) et future simulée (F).

6.2.1.d. Elaboration de données utilisables pour les simulations à l'échelle des fermes types du modèle AROPAj

Dans ce paragraphe, nous présentons la méthode utilisée pour améliorer la fiabilité des données de pluviométrie. Après avoir montré sa validation, nous montrons comment nous l'avons utilisée pour l'ensemble du territoire français.

i) La méthode de correction des données de pluviométrie du modèle Arpège

Les données de pluviométrie issues du modèle Arpège Climat ne sont pas fiables, comme nous l'avons mis en évidence. Afin de disposer de données utilisables par le modèle de culture STICS, il est nécessaire d'effectuer un prétraitement. Cette méthode de correction doit pouvoir :

- s'appliquer à l'ensemble des données climatiques du territoire français,
- corriger à la fois les surestimations et les sous-estimations des pluviométries mises en évidence, et enfin,
- tenir compte du fait que les écarts entre les distributions des cumuls de pluies annuelles des séries simulées et observées ne sont pas identiques pour toutes les stations.

Pour cela, nous avons corrigé la pluviométrie par un biais au pas de temps mensuel, comme Lebonvallet, 2002, les corrections appliquées sont présentées dans le Tableau 6.3, elles correspondent aux différences de moyennes mensuelles de précipitations entre les séries climatiques passées simulée et observée.

Mois / Stations	Avignon	Toulouse	Dijon	Mirecourt	Versailles	Lusignan	Rennes
Janvier	19	-12	-74	-60	-27	-27	-33
Février	23	-3	-59	-54	-20	-22	-27
Mars	22	-4	-48	-38	-16	-16	-14
Avril	8	-15	-40	-31	-21	-11	-29
Mai	-3	-7	-15	-25	-11	14	4
Juin	-7	-8	-17	3	-16	-4	-1
Juillet	4	4	-35	-27	0	-2	8
Août	30	16	-9	0	11	19	8
Septembre	19	-7	-7	-1	11	8	6
Octobre	29	-9	-36	-19	5	6	17
Novembre	-12	-23	-38	-20	-12	-12	-4
Décembre	2	-22	-80	-59	-31	-54	-23

Tableau 6.3 Correction des biais de pluviométrie mensuelle (en mm) issus des différences entre moyennes mensuelles observées et simulées par Arpège-Climat.

Pour corriger les données de pluviométrie, nous répartissons le biais total mensuel entre les jours pluvieux de chaque mois de manière uniforme. En effet, compte tenu du nombre trop important de jours pluvieux dans la série passée simulée, il est difficile de « créer » des jours de pluie d'une part. D'autre part, il n'est pas possible de « retirer » de la pluie à un jour non pluvieux. Nous appliquons donc une correction journalière moyenne commune aux jours pluvieux de chaque mois de chaque station, les valeurs de pluviométrie négatives après correction étant ramenées à zéro. Ceci permet de diminuer le nombre de jours pluvieux dans l'année, ce qui contribue à rapprocher les séries observées et simulées.

ii) Validation de la méthode de correction et des données corrigées de pluviométrie

Afin de valider les corrections faites sur les données de pluviométrie, nous utilisons à la fois les statistiques et le modèle de culture STICS. Comme nous utilisons au final les données climatiques futures corrigées en entrée de ce modèle, nous pouvons ainsi mettre en évidence la cohérence des données climatiques passées simulées corrigées avec les données observées d'une part, et les effets du changement climatique des séries futures corrigées d'autre part.

Nous effectuons tout d'abord des tests de Student sur l'égalité des moyennes des cumuls mensuels de pluviométrie des séries observées et passées simulées corrigées. Ils montrent, pour chaque station étudiée, que les pluviométries moyennes mensuelles des séries climatiques passée simulée corrigée et passée observée appartiennent au même groupe de moyenne et qu'elles sont significativement semblables (*cf.* figures Annexe 9 B.).

Les données climatiques observées (O), passées simulées (P) et passées simulées corrigées (PC) sont utilisées en entrée du modèle STICS, pour simuler une culture de blé tendre d'hiver. Nous étudions le développement de la culture et l'état de la culture à la récolte. La Figure 6.11 présente les résultats obtenus pour le développement du blé d'hiver sur les sept stations étudiées. Quelle que soit la station considérée, l'évolution du développement de la culture simulé avec la série PC est toujours plus proche de celle modélisée avec la série O que de celle obtenue avec la série P. La courbe obtenue avec la série PC se situe toujours entre celle obtenue avec la série P et celle obtenue avec la série O, voire se superpose à cette dernière (cas des stations de Avignon, Toulouse et Mirecourt). Par ailleurs, les courbes obtenues avec la série climatique future corrigées (FC) montrent toujours un cycle de développement plus rapide, le décalage entre les courbes se faisant dès les premiers stades (entre le semis et la levée) et s'accentuant surtout entre la levée et le stade épi 1 cm.

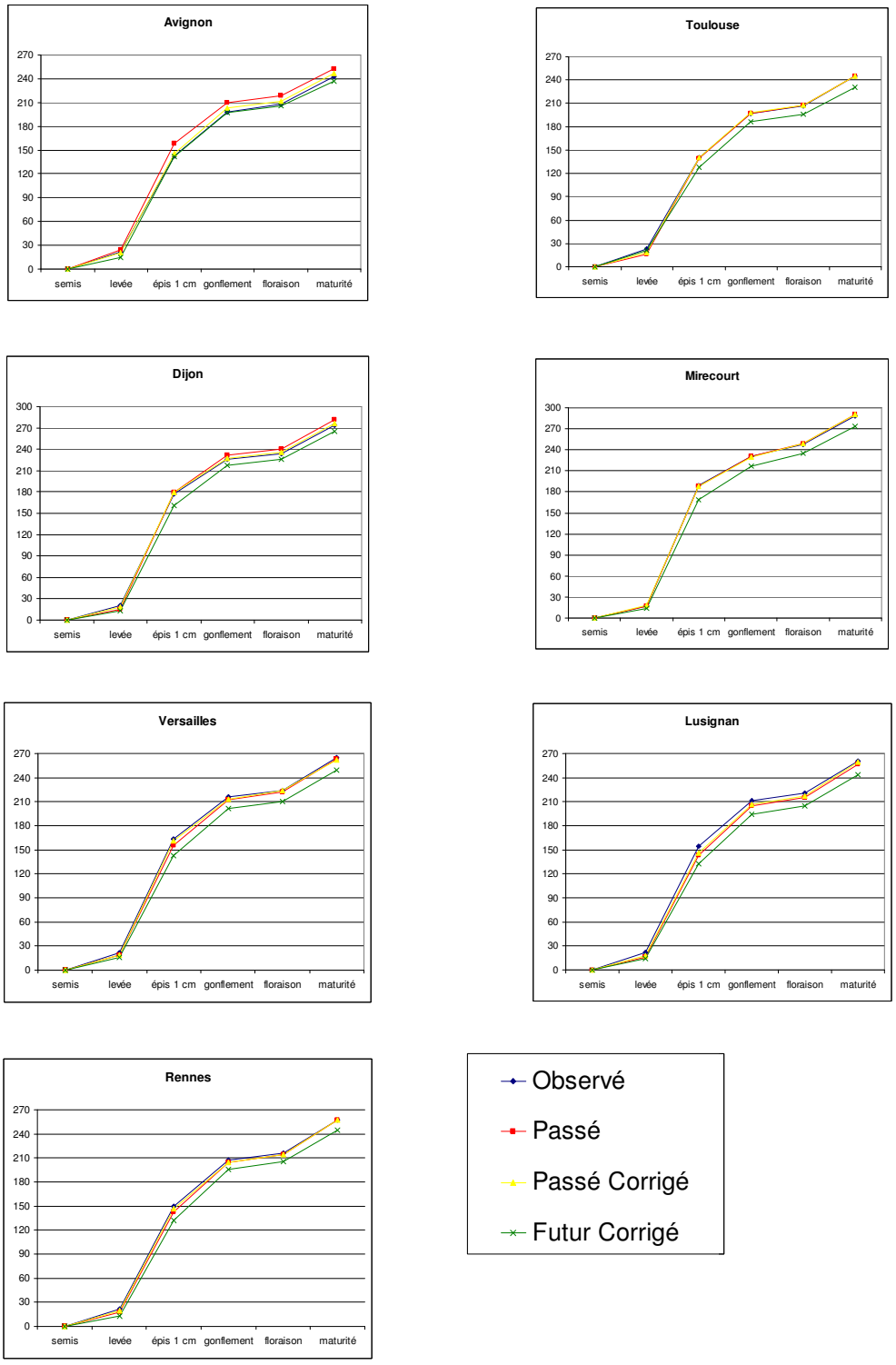


Figure 6.11 Développement d'une culture de blé tendre d'hiver (jours juliens depuis le semis en fonction des principaux stades de développement) pour les séries climatiques de chaque station

Les rendements et teneurs moyennes en protéines des grains à la récolte obtenus pour chaque station avec les différentes séries climatiques confirment l'intérêt des corrections appliquées aux séries climatiques issues du modèle Arpège. Les rendements et teneurs en protéines modélisés avec les séries O, P et PC sont significativement semblables (au sens du test de Duncan), les valeurs obtenues différents significativement de celles estimées avec la série F (cf. figures en Annexe 9 C.). On observe les mêmes résultats pour la biomasse aérienne et la teneur en azote totale de la plante à la récolte.

Ces différentes validations confirment que les corrections appliquées à la pluviométrie estimée par le modèle Arpège pour les sept stations météo rendent ces données de pluviométrie fiables.

iii) Correction des données de pluviométrie pour l'ensemble du territoire français

La méthode de correction de la pluviométrie étant validée pour les sept stations météo, il est nécessaire de pouvoir de l'appliquer à l'ensemble du territoire français, afin de disposer de données climatiques futures utilisables pour les simulations du modèle STICS à l'échelle des fermes types du modèle AROPAj.

Pour spatialiser les corrections à appliquer aux sorties de pluviométrie du modèle climatique, nous définissons des « zones d'influence » de chaque station météo. Tous les points du modèle Arpège voient leur pluviométrie corrigée selon le biais défini pour la station météo INRA la plus proche (la Figure 6.12 présente les zones d'application des corrections sur le territoire français).

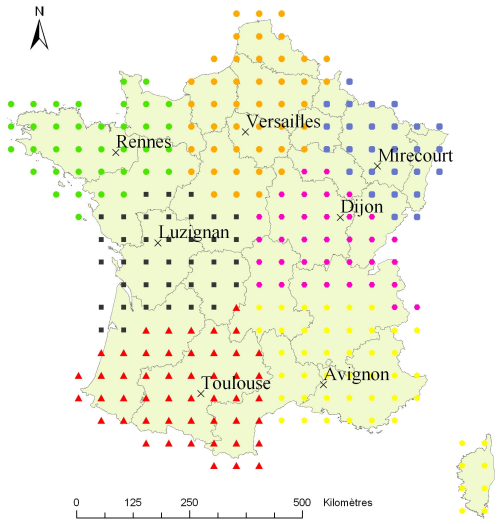


Figure 6.12 Les zones de correction des données de pluviométrie selon les stations météo INRA en France.

Pour les simulations avec STICS, le climat est attribué aux fermes types selon leur appartenance à une classe d'altitude (*cf.* § 2.1.1), et pour l'année 1997 de référence, les données climatiques sont disponibles sur une grille de maille 50×50 km. La grille du modèle Arpège ne se superpose pas à cette grille issue de la base du projet MARS : les données d'Arpège sont disponibles pour un point. Afin de faciliter la méthode et d'obtenir un climat sur une grille similaire à celle du climat de 1997, nous avons procédé en deux temps. Tout d'abord nous attribuons à chaque maille climatique de 1997 le point de simulation Arpège le plus proche, et faisons l'hypothèse que les variables climatiques de ce point sont valables pour l'ensemble de la maille. Ensuite, nous constituons, comme pour les années 1995 à 1997, un climat moyen par classe d'altitude et par région. Chaque ferme type se voit attribuer le climat correspondant à sa classe d'altitude moyenne (de la même manière que pour les données climatiques de 1995 à 1997). Ainsi, les groupes types disposent de conditions climatiques futures qui peuvent être utilisées en entrée du modèle STICS afin de simuler le rendement des cultures en réponse à l'azote, en conditions climatiques futures.

6.3. Les simulations réalisées avec STICS en conditions de changement climatique

Les simulations réalisées avec le modèle STICS utilisent les données d'entrées déterminées pour chaque culture et groupe type à la fin du processus de construction des courbes de réponse à l'azote. Les itinéraires techniques, les sols sont donc les mêmes que ceux de l'année 1997, seul le climat est modifié. Pour être en accord avec les hypothèses du scénario SRES B2, la teneur en CO_2 est forcée à 640 ppm. Pour chacune des 30 années futures à horizon 2100 (2070 à 2099), on fait varier la quantité d'azote apportée à la culture, et on ajuste sur les points (azote apporté, rendement) une courbe de type exponentiel, en procédant comme pour l'année 1997 (*cf.* 3.2.1).

Afin de couvrir une variété de situation culturale importante tout en limitant le nombre de simulations, nous avons sélectionné deux cultures et plusieurs fermes types dans deux régions contrastées. Ainsi, nous avons choisi de travailler sur les régions Picardie et Midi-Pyrénées qui offrent des situations pédoclimatiques et techniques variées. De plus, les exploitations types de Midi-Pyrénées sont présentes sur toutes les classes d'altitude. Les rendements des cultures de blé tendre et de maïs, communes aux régions Picardie et Midi-Pyrénées, ont été modélisés pour plusieurs raisons. L'étude de ces deux plantes « modèles » permettra de confronter les réactions physiologiques (photosynthèse et efficience de l'eau) de cultures C3 et C4 aux effets indirects de l'augmentation de la teneur en CO_2 et aux effets de la modification de la température de l'air. Nous pourrons aussi comparer l'influence des effets climatiques indirects sur une culture d'hiver et une culture de printemps, en particulier sur la durée des cycles et les besoins en eau. Enfin, les courbes de réponse à l'azote de ces cultures ayant été étudiées dans des conditions climatiques de 1997, nous disposons de références permettant les comparaisons avec les courbes de réponse à l'azote en conditions de changement climatique.

6.4. Analyse des résultats obtenus sur les cultures et régions tests

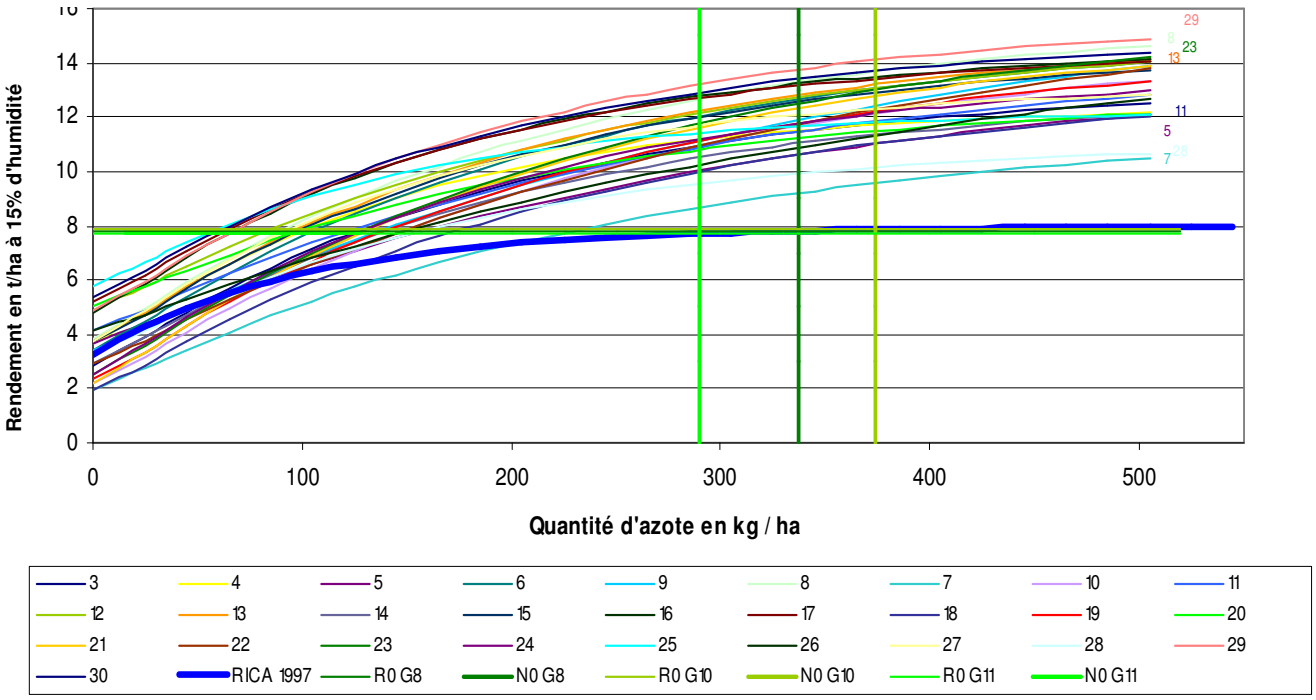
Les trente années de climat futur forment une série où la succession n'a pas de sens, c'est une distribution aléatoire, nous notons donc les années 2070 à 2099 1 à 30 pour simplifier les notations.

6.4.1. Evolution des courbes de réponse à l'azote pour le blé tendre et le maïs en Picardie

La Figure 6.13 et la Figure 6.14 présentent les courbes de réponse à l'azote obtenues pour le blé tendre en Picardie pour les années 3 à 30. En effet, seules 28 années de récolte peuvent être simulées puisque le blé est simulé sur deux années civiles et une année supplémentaire est nécessaire pour simuler son précédent cultural. De même, dans le cas du maïs (Figure 6.15 et Figure 6.16), il est nécessaire de disposer de trois années climatiques successives pour pouvoir simuler le précédent blé.

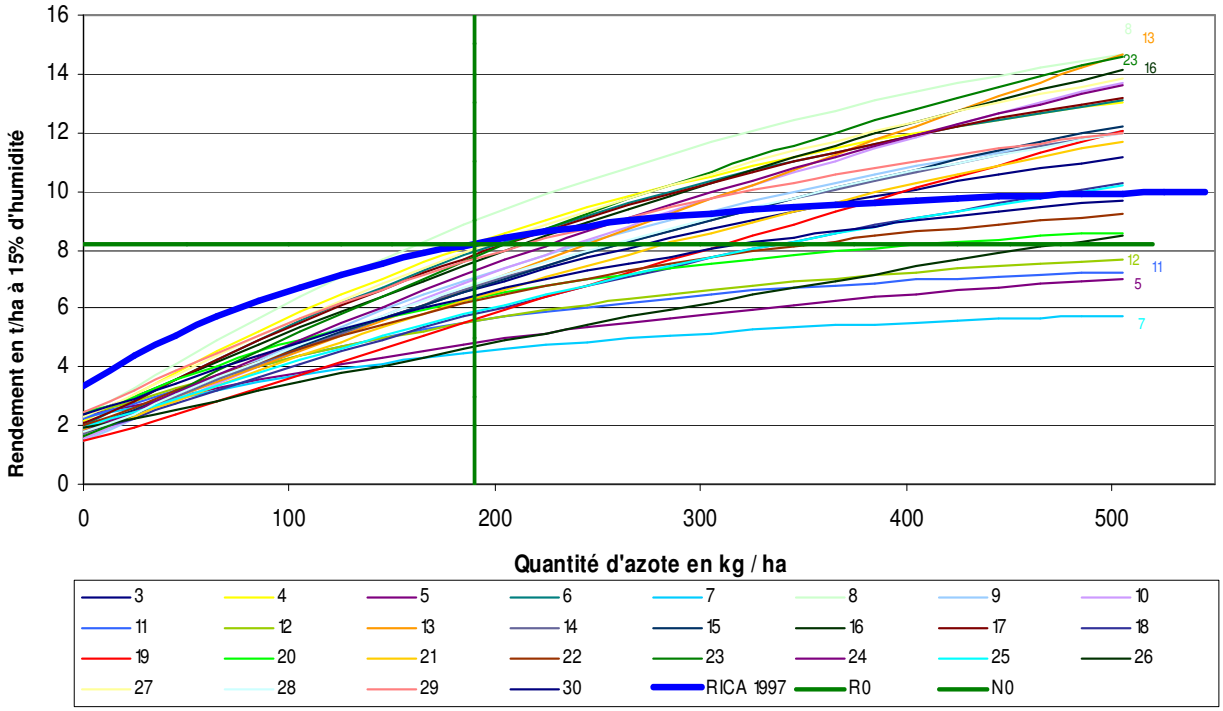
6.4.1.a. Répartition des courbes de réponse

Pour la culture de blé tendre des groupes types 8, 10 et 11 (Figure 6.13), les courbes de réponse sont regroupées au dessus de la courbe obtenue pour l'année 1997. Les taux de croissance sont très similaires entre toutes les courbes « futures », l'écart observé entre les courbes qui enveloppent la gamme est quasi-constant et égal à 4 t/ha environ. Pour le groupe type 9 (Figure 6.14), les courbes présentent au contraire des taux de croissance variables : l'écart observé entre les rendements minimal et maximal est d'environ 1t/ha à apport azoté nul, il s'accroît jusqu'à 6 t /ha environ pour des doses plus élevées (300 unités d'azote/ha). La courbe de réponse à l'azote de 1997 se situe au dessus des courbes en conditions climatiques futures, et rejoint le faisceau pour des apports d'azote élevés.



RICA 1997 : courbe de réponse à l'azote de l'année 1997, R0 : rendement référence de 1997, N0 : dose d'azote correspondant à R0.

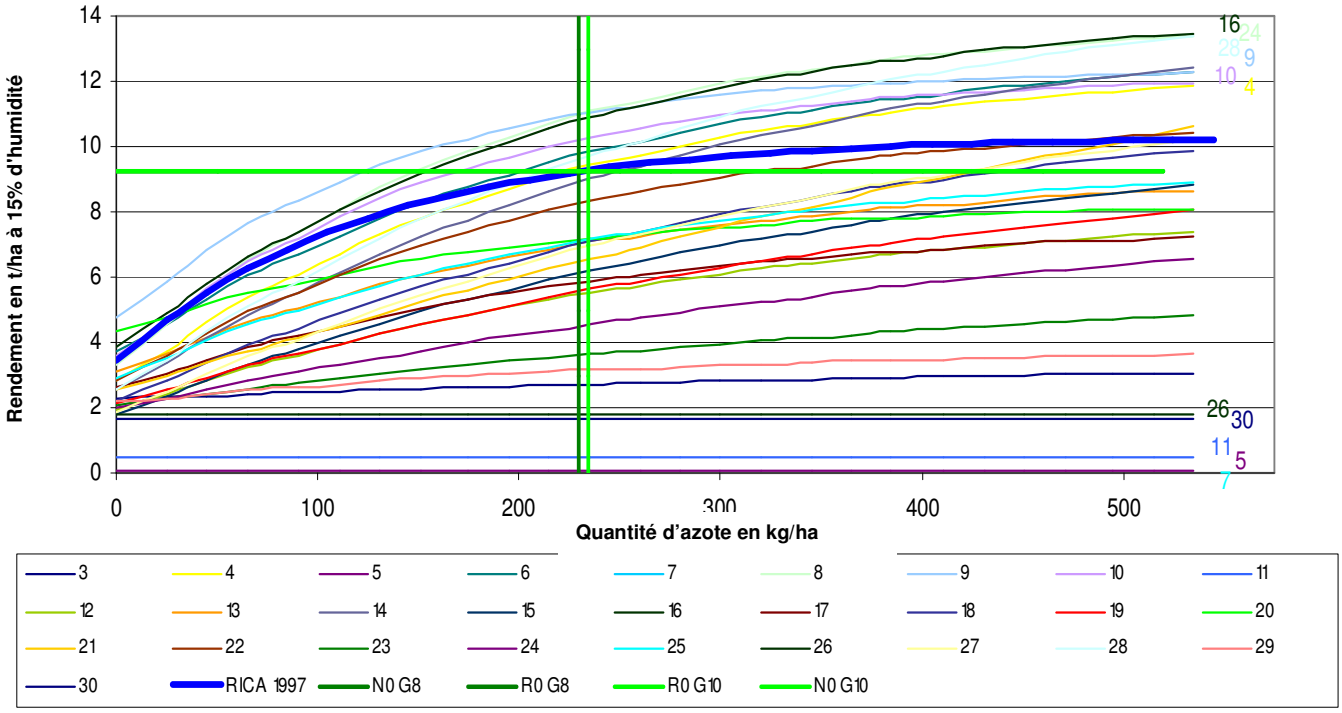
Figure 6.13 Courbes de réponse à l'azote du blé tendre en Picardie pour les groupes types 8, 10 et 11 (notés G8, G10 et G11) en conditions climatiques futures



RICA 1997 : courbe de réponse à l'azote de l'année 1997, R0 : rendement référence de 1997, N0 : dose d'azote correspondant à R0.

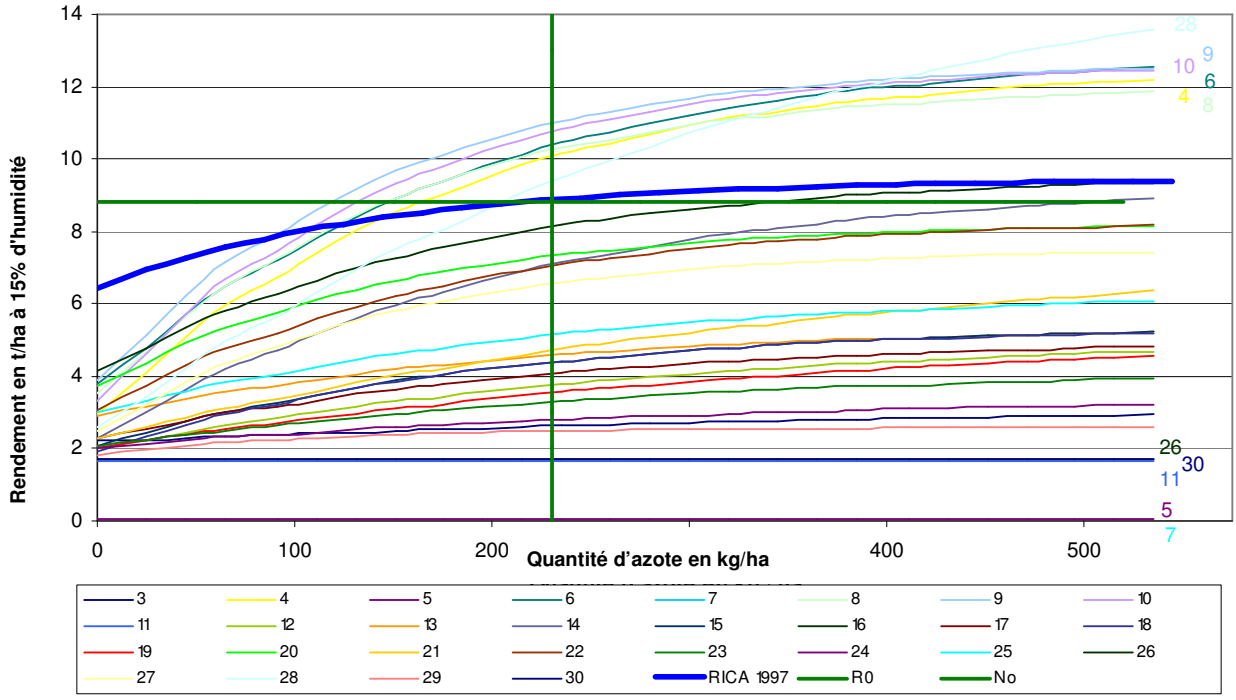
Figure 6.14 Courbes de réponse à l'azote du blé tendre en Picardie pour le groupe type 9 (noté G9) en conditions climatiques futures

En ce qui concerne le maïs (Figure 6.15 et Figure 6.16), quel que soit le groupe type considéré, les courbes de réponse à l'azote en conditions climatiques futures sont très proches les unes des autres pour de faible doses d'azote (inférieures à 50 U/ha), puis s'écartent pour des doses plus élevées. La courbe de réponse à l'azote de l'année 1997 se situe, pour les cas de groupes types de la Picardie dans le tiers supérieur du faisceau des courbes obtenues en conditions climatiques futures.



RICA 1997 : courbe de réponse à l'azote de l'année 1997, R0 : rendement référence de 1997, N0 : dose d'azote correspondant à R0.

Figure 6.15 Courbes de réponse à l'azote du maïs grain en Picardie pour les groupes types 8 et 10 (notés G8 et G10) en conditions climatiques futures



RICA 1997 : courbe de réponse à l'azote de l'année 1997, R0 : rendement référence de 1997, N0 : dose d'azote correspondant à R0.

Figure 6.16 Courbes de réponse à l'azote du maïs grain en Picardie pour le groupe type 9 (noté G9) en conditions climatiques futures

6.4.1.b. Identification des années climatiques favorables et défavorables aux cultures étudiées

Pour la culture de blé, parmi les quatre années les plus favorables à la production, trois sont communes aux deux ensembles de fermes types : années 8, 13 et 23. L'étude climatique détaillée de ces années montre qu'elles sont plus pluvieuses (moyenne annuelle de 240 mm plus élevée que la moyenne annuelle sur l'ensemble des trente années). De plus, un cumul mensuel pour les mois de mai, juin et juillet supérieur de 24 mm au cumul moyen est très favorable à un bon remplissage des grains et permet de limiter les risques d'échaudage physiologique. Les températures minimales et maximales se situent dans la moyenne. Parmi les années les moins favorables nous retrouvons pour les deux ensembles de fermes types les années 5, 7 et 11. Ce sont des années plus sèches que la moyenne des trente années futures (120 mm de moins en moyenne sur l'année) avec un déficit moyen mensuel pour les moins de mai, juin et juillet de 26 mm. Les températures apparaissent en moyenne plus chaudes de 1.1°C sur l'année.

Les années propices à la culture de maïs (4, 8, 9, 10 et 28) sont, pour les deux ensembles de fermes types plus pluvieuses que la moyenne annuelle des trente années (+150 mm). Concernant la période de formation et de remplissage des grains (juin, juillet et août), les pluies mensuelles sont en moyenne supérieures de 22 mm et les températures sont inférieures de 1.9°C par rapport à la moyenne des trente années. Les années les moins favorables (5, 7, 11, 26 et 30) apparaissent comme des années plutôt sèches avec une diminution moyenne de 118 mm de la pluviométrie annuelle. Ces années se caractérisent par de faibles pluviométries pour les mois de juin à août (-22 mm en moyenne par mois) et par de fortes chaleurs (+2.1°C).

6.4.1.c. Effet des doses d'azote correspondant aux rendements de 1997

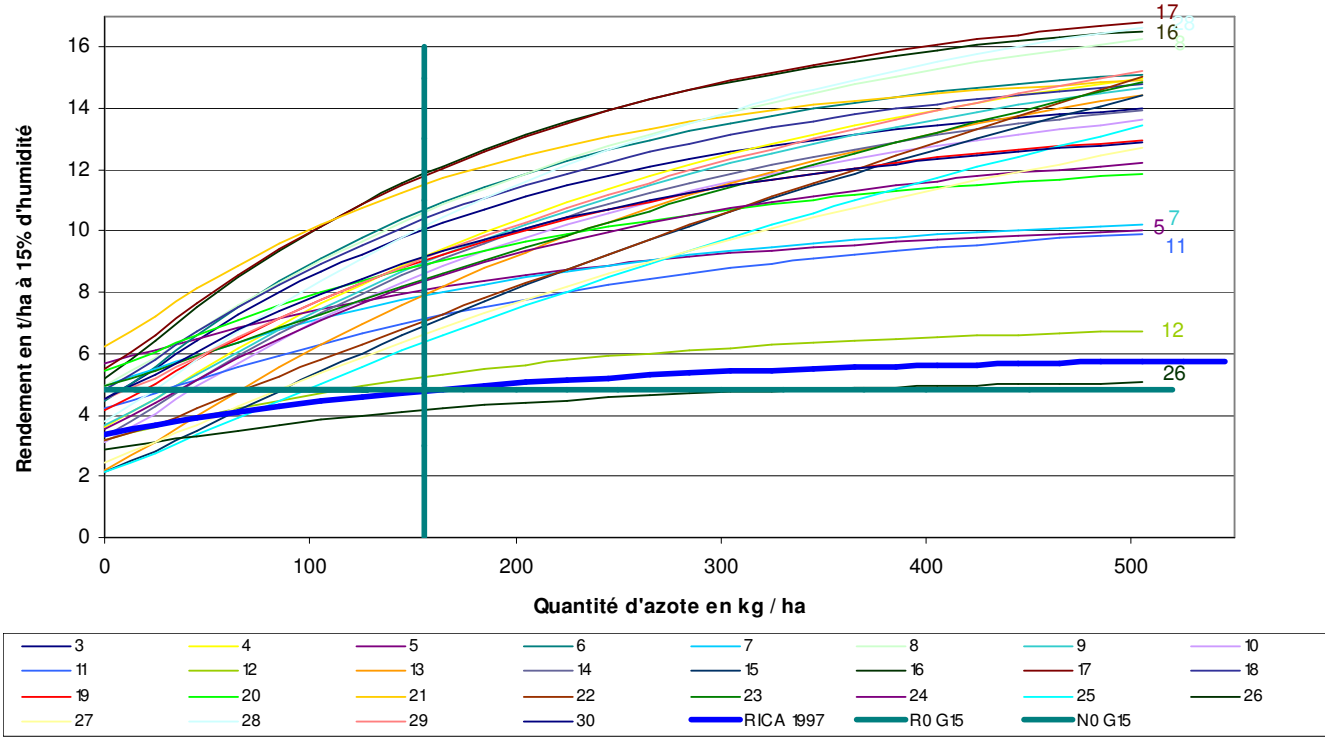
Les doses d'azote correspondantes aux rendements de référence du RICA de 1997 pour la culture de blé des groupes types 8, 10 et 11 sont respectivement de 337, 374 et 290 kg d'azote par ha. Ces valeurs, apparaissent peu réalistes d'un point de vue agronomique pour des rendements moyens de référence de 7.8 t/ha (*cf*. Figure 6.13). Ce phénomène peut s'expliquer par le fait que la courbe de réponse à l'azote de 1997, passée la dose de 250U/ha, atteint son plateau et la variation de rendement par rapport à l'augmentation de la dose d'azote reste très faible. Pour chacune de ces doses d'azote, en conditions climatiques futures, on observe un gain moyen de 3.4 t/ha par rapport à celui de référence de 1997, avec un rendement moyen de 11.2 t/ha.

Pour le groupe type 9, la production de blé présente en 1997 une dose d'azote correspondant au rendement de référence de 190U/ha plus réaliste et cohérente avec un rendement de référence de 8.1 t/ha (cf. Figure 6.14). A cette dose d'azote, le rendement moyen pour les années futures est moins élevé qu'en 1997, il atteint 6.6 t/ha soit une perte de rendement de 1.5 t/ha.

Concernant la production de maïs les résultats sont semblables pour l'ensemble des groupes types picards. La dose moyenne d'azote correspondant aux rendements de référence de 1997 est de 230U/ha pour des rendements références variants de 8.8 à 9.3 t/ha (Figure 6.15 et Figure 6.16). A cette dose d'azote, le rendement moyen futur pour les groupes types 8 et 10 atteint 6.6 t/ha soit une baisse de 2.6 t/ha. Pour le groupe type 9, le rendement futur est de 5.7 t/ha en moyenne soit une perte de 3.1 t/ha par rapport à 1997.

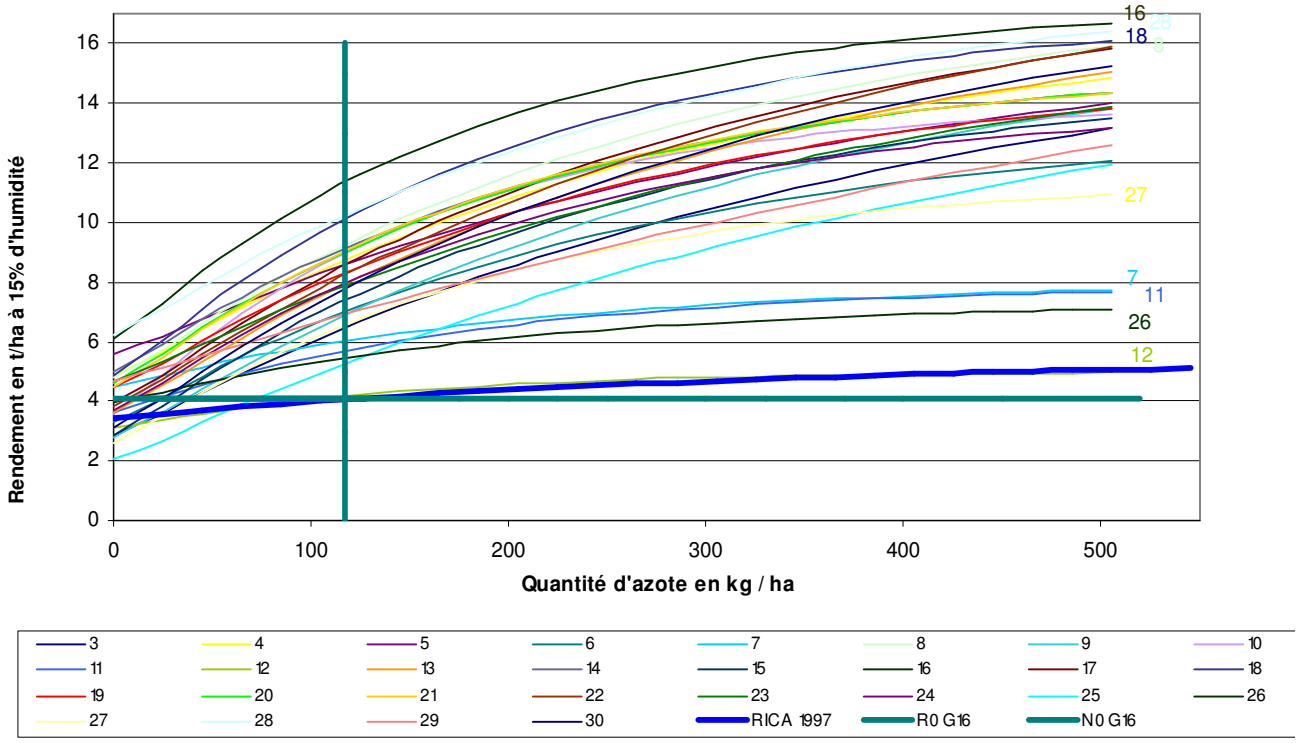
6.4.2. Evolution des courbes de réponse à l'azote pour le blé tendre et le maïs en Midi-Pyrénées

La Figure 6.17, la Figure 6.18 et la Figure 6.19 représentent les courbes de réponse à l'azote des cultures de blé des groupes types 15, 16 et 25 de la région Midi-Pyrénées pour les années 3 à 30. Pour cette région, les courbes de réponse à l'azote du maïs sont présentées Figure 6.20. Cette culture est irriguée dans cette région pour les groupes types 15 et 16.



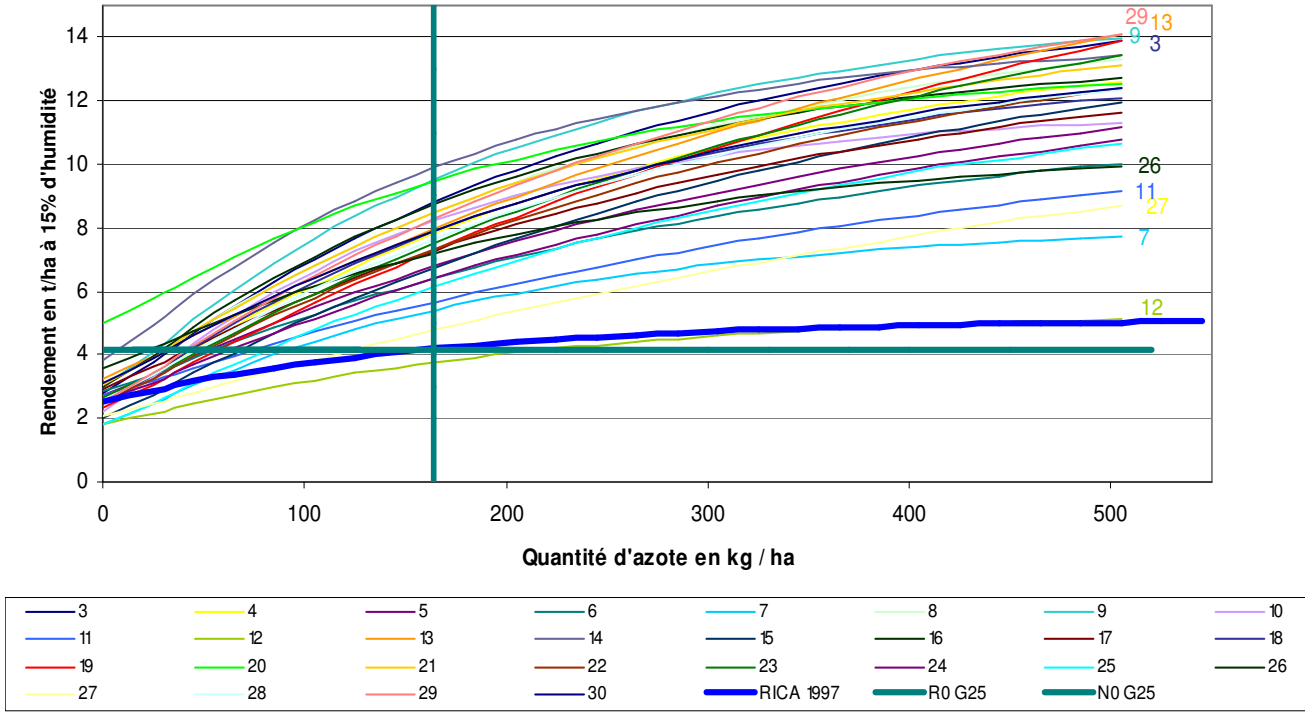
RICA 1997 : courbe de réponse à l'azote de l'année 1997, R0 : rendement référence de 1997, N0 : dose d'azote correspondant à R0.

Figure 6.17 Courbes de réponse à l'azote du blé tendre en Midi-Pyrénées pour le groupe type 15 (noté G15) en conditions climatiques futures



RICA 1997 : courbe de réponse à l'azote de l'année 1997, R0 : rendement référence de 1997, N0 : dose d'azote correspondant à R0

Figure 6.18 Courbes de réponse à l'azote du blé tendre en Midi-Pyrénées pour le groupe type 16 (noté G16) en conditions climatiques futures

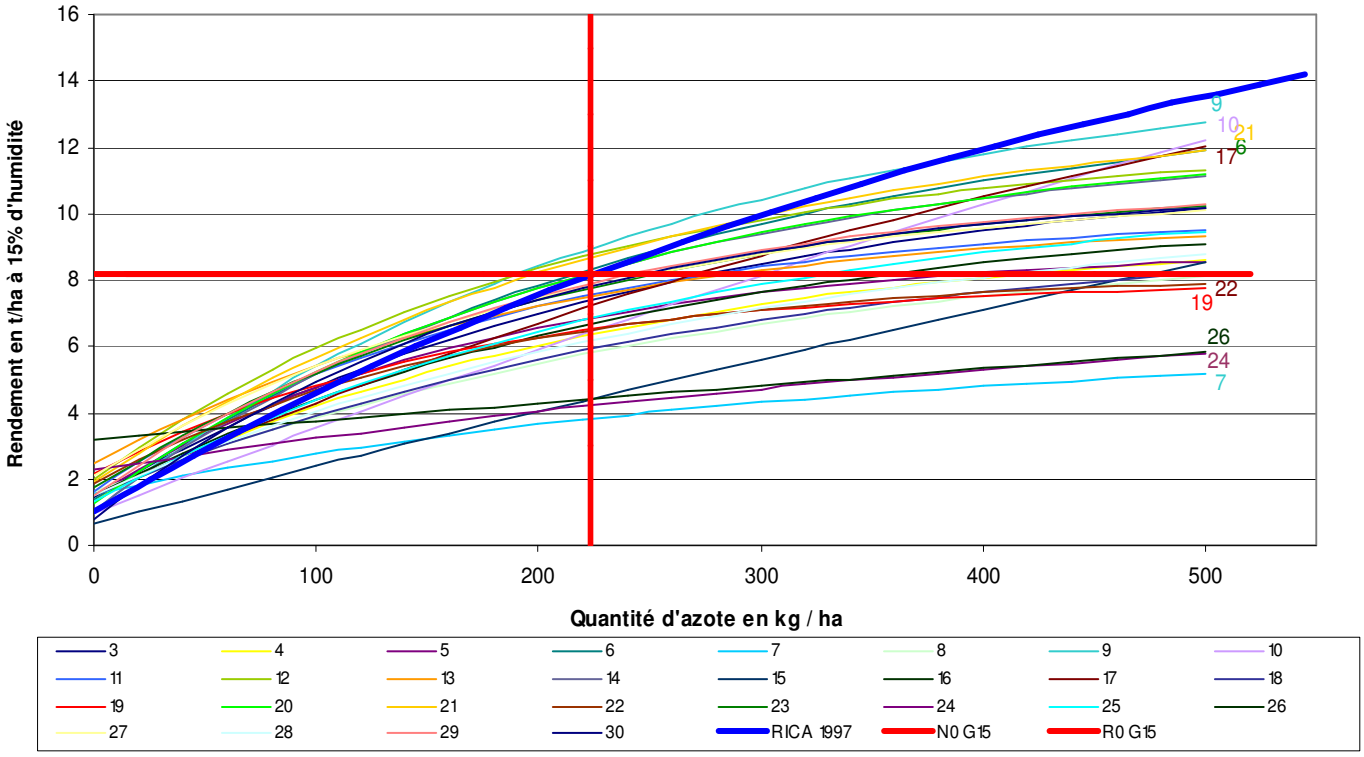


RICA 1997 : courbe de réponse à l'azote de l'année 1997, R0 : rendement référence de 1997, N0 : dose d'azote correspondant à R0

Figure 6.19 Courbes de réponse à l'azote du blé tendre en Midi-Pyrénées pour le groupe type 25 (noté G25) en conditions climatiques futures

6.4.2.a. Répartition des courbes de réponse

Pour la culture de blé, la répartition des courbes de réponse à l'azote en conditions climatiques futures par rapport à la courbe de l'année 1997 apparaît similaire pour chacun des trois groupes types. L'ensemble des courbes « futures » se situe globalement bien au-dessus de la courbe de 1997. Mises à part quelques années (12, 26, 7, 5 et 11), les courbes sont bien regroupées avec un écart maximal de 4 t/ha entre les rendements atteints à une dose donnée.



RICA 1997 : courbe de réponse à l'azote de l'année 1997, R0 : rendement référence de 1997, N0 : dose d'azote correspondant à R0

Figure 6.20 Courbes de réponse à l'azote du maïs grain en Midi-Pyrénées pour le groupe type 15 (noté G15) en conditions climatiques futures

Concernant la culture de maïs, les courbes sont très proches pour de faibles doses d'azote (inférieures à 50U/ha) et s'écartent pour des apports azotés plus importants. L'écart entre les courbes « enveloppes » atteint 7.7 t/ha pour des apports élevés. La courbe de référence de 1997 qui, pour de faibles doses, se situe en dessous des courbes « futures », coupe celles-ci et rejoint la courbe enveloppe supérieure.

6.4.2.b. Identification des années climatiques favorables et défavorables aux cultures étudiées

Pour la culture de blé des trois fermes types étudiées, nous retrouvons parmi les cinq années les plus défavorables à la production quatre années communes : 7, 11, 12 et 26. Ces années sont, respectivement pour les groupes types 15, 16 et 25, moins pluvieuses de 120, 180 et 190 mm et plus chaude de 0.5, 0.7 et 0.6 °C que la moyenne annuelle des trente années. L'étude climatique détaillée de ces années révèle que la pluviométrie mensuelle des mois d'avril, de mai et de juin (période de remplissage des grains où tout déficit en eau limite le poids des grains et le rendement) est plus faible de 28 mm en moyenne par rapport aux cumuls mensuels des 30 années futures. Parmi les années favorables à la production de blé, nous retrouvons deux séries d'années selon la classe d'altitude des groupes types. Rappelons que, d'un point de vue climatique, la classe d'altitude différencie les séries attribuées à chacun des trois groupes types étudiés. D'un côté, les groupes types 15 et 16, de basse altitude (jusqu'à 600m), présentent trois années communes parmi les quatre années les plus propices (années 8, 16 et 28). De l'autre côté, les années favorables au blé pour le groupe type 25, de montagne (altitude supérieure à 600 m), sont les années 3, 9, 13 et 29. Les années 8, 16 et 28 sont annuellement plus pluvieuses de 80 mm et moins chaudes de 0.6°C que la moyenne des années 1 à 30. Le cumul mensuel pour les mois de avril à juin se montre en moyenne supérieur de 34 mm à celui des trente années futures. Pour les années 3, 9, 13, 29 et 29 les cumuls moyens mensuels des mois de avril à juin se situent dans la moyenne des trente années. Nous remarquons cependant des températures annuelles plus chaudes d'environ 0.5°C pour ces cinq années.

Pour la culture de maïs, les années défavorables 7, 19, 22, 24 et 26 sont annuellement plus chaude de 0.6 °C que la moyenne annuelle des trente années futures. Les mois de mai à juillet présentent une augmentation moyenne de 1.4°C. Les années favorables : 6, 9, 10, 17 et 21, montrent une diminution de 0.9 °C de la température annuelle et de 1.2°C pour les mois de mai à juillet par rapport à la moyenne des trente années. L'étude détaillée des précipitations n'apporte pas d'éléments importants puisque la culture de maïs est irriguée en Midi-Pyrénées pour les groupes types étudiés ici.

6.4.2.c. Effet des doses d'azote correspondant aux rendements de 1997

Les doses d'azote correspondant aux rendements du RICA de l'année 1997, pour la culture de blé, sont respectivement égales à 156, 117 et 164 kg/ha pour les groupes 15, 16 et 25 (Figure 6.17, Figure 6.18 et Figure 6.19). Les rendements moyens futurs qui correspondent à ces apports sont respectivement de 8.5, 7.9 et 7.1 t/ha pour les groupes 15, 16 et 25. Ceci correspond à un gain moyen de rendement pour ces trois groupes de 3.5 t/ha en conditions climatiques futures.

Pour le maïs la dose correspondant au rendement de 1997 est de 223 kg/ha. Pour ce niveau d'apport, le rendement futur moyen atteint 6.8 t/ha soit une perte de 1.3 t/ha par rapport à la référence du RICA de 1997.

6.4.3. Interprétations agronomiques des résultats obtenus et comparaison interrégionale

6.4.3.a. Conséquences des changements climatiques sur la réponse à l'azote du blé et du maïs en Picardie

i) Bilan et mise en évidence des différences entres groupes types par culture

Pour la culture de blé, les résultats obtenus sont totalement différents selon les groupes types de Picardie. Le climat étant identique pour tous les groupes types de cette région, seuls les facteurs agronomiques peuvent expliquer ces différences. Par rapport au groupe type 8, les courbes de réponse à l'azote du groupe type 9 atteignent des rendements moins élevés et montrent une plus grande variabilité : 48.4% de variabilité par rapport au rendement maximum à la dose d'azote correspondant au rendement de 1997, au lieu de 37.6%. Le sol du groupe type 9 est moins profond (de moins 40 cm), plus calcaire et plus caillouteux que celui du groupe type 8 ce qui entraîne une réserve en eau utile (RU) plus faible. De ce fait la plante supporte moins bien le stress hydrique des mois de mai à juillet (période de remplissage des grains) imposé par un climat futur, plus chaud et plus sec. Par ailleurs, la variété semée dans le groupe type 9 est plus tardive que celle du groupe type 8. Ceci a pour conséquence de décaler la période de remplissage des grains vers des jours encore plus chauds et secs. Dans

ces conditions, la culture de blé du groupe 9 est bien plus sensible au stress hydrique et à l'échaudage physiologique.

La grande variabilité dans les courbes de réponse à l'azote du maïs en Picardie s'explique essentiellement par l'importante variabilité climatique. En effet, bien que les variétés, les sols et les précédents soient tous différents entre les deux groupes, nous observons la même variabilité (100%) par rapport à la valeur du rendement maximal atteint pour un apport d'azote correspondant au rendement de référence. Le maïs est une culture d'été qui a d'importants besoins en eau durant les mois de juin à août. Dans ces conditions, et en rappelant que cette culture n'est pas irriguée en Picardie, la culture du maïs est soumise directement aux aléas climatiques. L'analyse des années favorables à la culture du maïs a révélé que seules les années plus pluvieuses et moins chaudes que la moyenne permettent d'obtenir des rendements supérieurs à ceux de 1997. Dans ces nouvelles conditions climatiques, la culture de maïs devient donc très risquée en Picardie, car seulement un tiers à un quart des années atteint le rendement de 1997.

ii) Conclusions

Les changements climatiques entraînent de plus fortes températures (augmentation de 2.2 °C des minimales et de 0.8 °C des maximales) et de plus faibles pluviométries principalement pour les mois de mai à août (diminution mensuelle moyenne de 21 mm) par rapport aux conditions climatiques de 1997. Dans ces conditions, et afin d'obtenir un niveau de rendement si ce n'est supérieur, au moins égal à celui de 1997, il est nécessaire de modifier les pratiques culturales. L'utilisation de variétés plus précoces en blé tendre d'hiver permet de limiter les risques d'échaudage physiologique durant la phase de remplissage des grains. Pour les cultures d'été comme le maïs, l'irrigation devient alors indispensable en Picardie afin de limiter les impacts des aléas climatiques (principalement sécheresse) pendant la période estivale.

6.4.3.b. Conséquences des changements climatiques sur la réponse à l'azote du blé et du maïs en Midi-Pyrénées

i) Bilan et mise en évidence des différences entres groupes types par culture

Pour la culture de blé, les gains de rendements sont importants pour les trois groupes types en conditions futures. Cette augmentation s'explique dans un premier temps par l'effet de la « fertilisation carbonée » du CO_2 mais il ne faut pas oublier que les facteurs climatiques (températures et précipitations) et techniques jouent aussi un rôle essentiel. Pour le groupe type 15, l'implantation d'une variété semi-précoce dans un sol profond (120 cm et réserve en eau importante), après une culture de légumineuse, permet, malgré la diminution de la pluviométrie et l'augmentation des températures, de ne pas limiter l'effet de la fertilisation carbonée. Le groupe type 16, montre la plus forte augmentation de rendement parmi les trois groupes types étudiés en Midi-Pyrénées. Par rapport au climat du groupe type 15, nous observons une plus faible diminution de la pluviométrie des mois pendant lesquels a lieu le remplissage des grains (mai à juillet). De plus, la diminution des températures maximales et l'augmentation des minimales par rapport aux conditions climatiques de 1997 permet de limiter, d'une part les risques de gel et d'autre part les risques d'échaudage physiologique, pour ce groupe type de classe d'altitude moyenne (300 à 600m). Ces éléments, combinés au même type de sol, à la même variété et au même précédent cultural que ceux de la ferme type 15 permettent d'obtenir des gains de rendements supérieurs. Enfin, le groupe type 25, de classe d'altitude 3 (au-delà de 600 m), voit ces risques de gels et d'échaudage physiologique diminués pour les mêmes raisons que le groupe type 16. Malgré l'augmentation des pluviométries pour les mois de mai, juin et juillet, le fait d'avoir un sol moins profond et une culture précédente non légumineuse ne permet pas d'atteindre la même augmentation de rendement que pour le groupe type 16.

Pour la culture de maïs, la perte de rendement de 16% à la dose d'azote correspondant au rendement de 1997, ne peut s'expliquer que par la hausse des températures par rapport au climat de 1997. En effet, cette culture est irriguée, ce qui signifie qu'elle subit aucun stress hydrique, puisque l'irrigation est déclenchée dès que les conditions de stress hydrique apparaissent (voir 2.2.4 L'irrigation) et elle le compense totalement. Dans ces conditions, la variété implantée, bien que très précoce et ayant de forts besoins en températures, ne semble pas être adaptée à des températures encore plus chaudes et ce principalement pendant les mois

de mai à juillet (+ 1.7 °C sur les moyennes mensuelles par rapport aux données de 1997). La variabilité des rendements est de 57% par rapport au rendement maximal atteint avec l'apport azoté correspondant au rendement référence de 1997.

ii) Conclusions

La culture de blé en région Midi-Pyrénées semble avoir un gain de productivité potentiel important. Le climat de moyenne et de haute montagne semble être très bien adapté pour la production de blé dans des conditions climatiques futures. En effet, d'une part la modification des températures permet de limiter à la fois les risques de gel et d'échaudage physiologique et d'autre part la plus faible diminution de la pluviométrie permet de maintenir le statut hydrique de la plante à un niveau optimal.

Pour le maïs, bien qu'il s'agisse d'une plante très bien adaptée aux climats chauds et humides, la variété implantée, malgré sa grande précocité, ne semble plus être adaptée aux nouvelles conditions climatiques. Le choix et la sélection de variété encore plus précoce, dans des conditions hydriques non limitantes, serait donc indispensable si l'on veut pouvoir maintenir un rendement proche de celui de 1997.

6.4.3.c. Discussion et interprétation des différences interrégionales

Dans un contexte climatique futur, le blé n'a pas nécessairement tendance à voir augmenter ses rendements partout. La Picardie où les rendements en blé sont actuellement parmi les plus élevés en France, ne montre pas les plus importantes augmentations de production et ceci pour plusieurs raisons.

Tout d'abord, à concentration en CO_2 égale, les deux régions étudiées se différencient par plusieurs critères climatiques importants. D'une part, la diminution de pluviométrie pour la région Picardie est plus forte que pour la région Midi-Pyrénées où, parfois même, celle-ci peut augmenter. D'autre part, l'augmentation des températures minimales et maximales relativement à 1997 est beaucoup plus forte en Picardie qu'en Midi-Pyrénées où, selon l'altitude, celles-ci peuvent même diminuer. Par ailleurs, les variétés implantées en Picardie en

1997, grâce à un contexte agro-climatique très favorable, exprimaient déjà quasiment leur potentiel génétique maximal contrairement aux variétés implantées en Midi-Pyrénées.

Concernant la culture de maïs, les rendements diminuent globalement par rapport à ceux de 1997, quelle que soit la région. La diminution et la variabilité des rendements sont plus fortes en Picardie qu'en Midi-Pyrénées. Cette différence s'explique par le fait qu'en Picardie, la culture de maïs n'est pas irriguée. Par ailleurs, l'augmentation des températures modifie complètement la carte de distribution des sommes de températures au niveau du territoire. En effet, si nous considérons une augmentation moyenne des températures de 1.5°C, pour une culture de maïs dont le cycle de développement est de environ 195 jours, l'augmentation des sommes de températures est alors de 290°C. Une telle augmentation correspond à un déplacement de quatre catégories vers les groupes de précocité les plus tardifs. La précocité des variétés qui était bien adaptée à chaque zone de production en 1997 (Figure 2.3 Les groupes de précocité du maïs par région RICA.), ne l'est plus sous des conditions climatiques futures plus chaudes. L'adaptation future des variétés aux zones de production engendrera une remontée de la précocité vers le nord. Pour les régions de production, actuellement les plus au sud, se posera alors le problème de sélectionner de nouvelles variétés encore plus précoces si l'on veut maintenir une production très exigeante en eau, dans ces zones géographiques.

L'analyse agronomique des résultats a montré que l'interaction entre les facteurs de production déterminants du rendement, en particulier l'eau et l'azote, en conditions climatiques futures, devient plus importante que l'azote seul. La prise en compte du seul changement climatique a permis d'identifier l'effet du climat sur les rendements par rapport à l'année de référence, 1997. Nous ne prenons pas en compte, faute de données disponibles et fiables, l'évolution des modifications des pratiques culturales qui déterminent les zones de cultures, les variétés, les dates de semis entre autres, mais aussi les maladies, les parasites et les adventices.

6.4.4. Optimums économiques en conditions de climat futur

Dans la perspective de l'utilisation des courbes de réponse à l'azote en conditions de changement climatique au sein du modèle économique AROPAj, nous avons dans un premier temps cherché les optimums économiques avec les prix de 1997 (prix de l'engrais et prix de vente de la culture). Nous avons déterminé, pour chaque courbe de réponse à l'azote un

optimum économique "futur" de coordonnées (R1, N1). Cet optimum correspond au point de la courbe où la dérivée est égale au rapport du prix de l'engrais sur celui de la culture (cf. 3.1.1.b).

6.4.4.a. Résultats pour la région Picardie

La Figure 6.21 et la Figure 6.22 représentent les résultats obtenus pour les cultures de blé et de maïs. Sur chaque figure, les losanges, les triangles et les croix représentent respectivement les optimums économiques futurs, leur moyenne et les références de 1997 (i.e. rendement issu du RICA et quantité d'azote apportée correspondante).

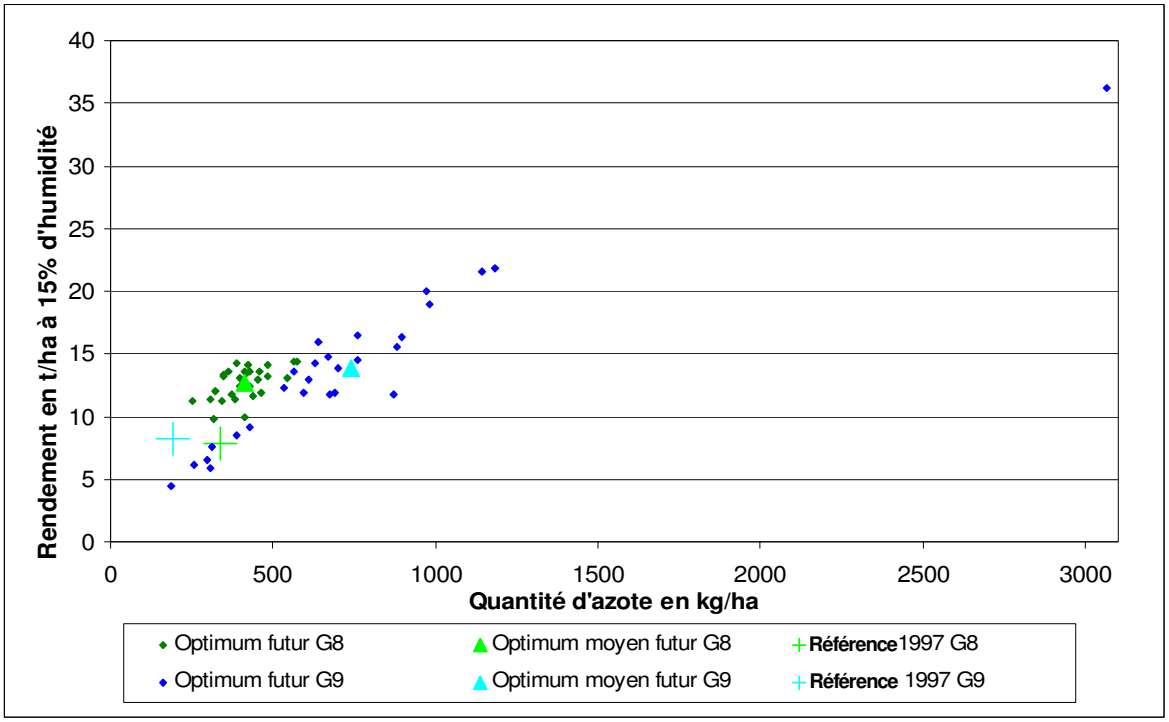


Figure 6.21 Optimums économiques de fertilisation futurs pour le blé des groupes types 8 et 9 de Picardie

Pour l'ensemble des groupes type, le blé tendre montre, dans les conditions climatiques futures des optimums plus élevés que la référence de l'année 1997, à la fois pour les rendements et les quantités d'intrant azoté nécessaires pour les atteindre. Le gain de production est de 5.6 t/ha pour le groupe 9 et de 4.8 t/ha pour le groupe type 8. Cependant, concernant les quantités d'azote optimales, celles-ci sont très élevées avec une valeur

moyenne de 575 U/ha. La variabilité des rendements (de 4.5 à 21.8 t/ha) et des doses d'azote (185 à 3066 kg/ha) optimums pour le groupe type 9 est très importante. Cette variabilité est beaucoup plus faible pour le groupe type 8.

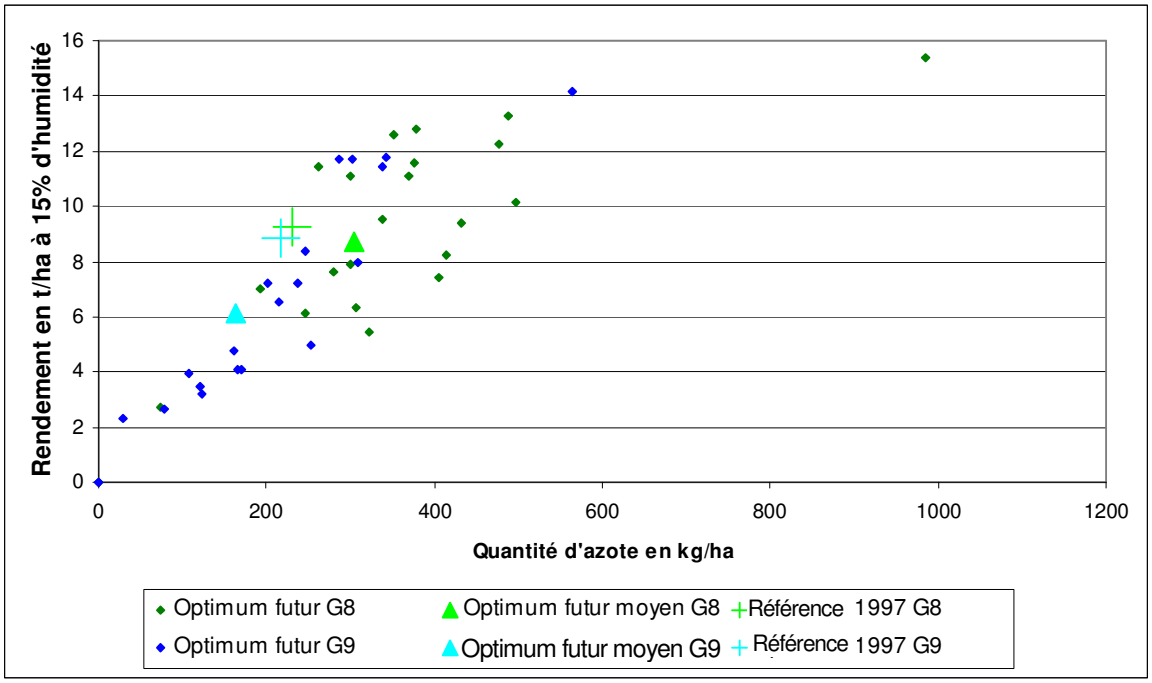


Figure 6.22 Optimums économiques de fertilisation futurs pour le maïs des groupes types 8 et 9 de Picardie

Pour la culture de maïs, le niveau de rendement optimal est quasi-similaire pour le groupe type 8 à la référence de 1997 ; pour le groupe type 9 on observe une diminution du rendement moyen de 2.7 t/ha par rapport à la référence de 1997. Les doses d'azote optimales restent élevées par rapport aux rendements optimaux (305 U/ha pour le groupe type 8 et 164 U/ha pour le groupe type 9). La variabilité des rendements (de 0 à 15 t/ha) et des doses d'azote (-745 à 992 kg/ha) optimums est très importante.

6.4.4.b. Résultats pour la région Midi-Pyrénées

La Figure 6.23 représente les futurs optimums économiques d'une culture de blé tendre pour les groupes type 15, 16 et 25. Les rendements augmentent respectivement de 10.2, 9.2 et 8.6 t/ha pour les groupes type 15, 16 et 25 par rapport à la référence de 1997. Les doses d'azote optimales sont respectivement égales à 575, 470 et 653 kg/ha.

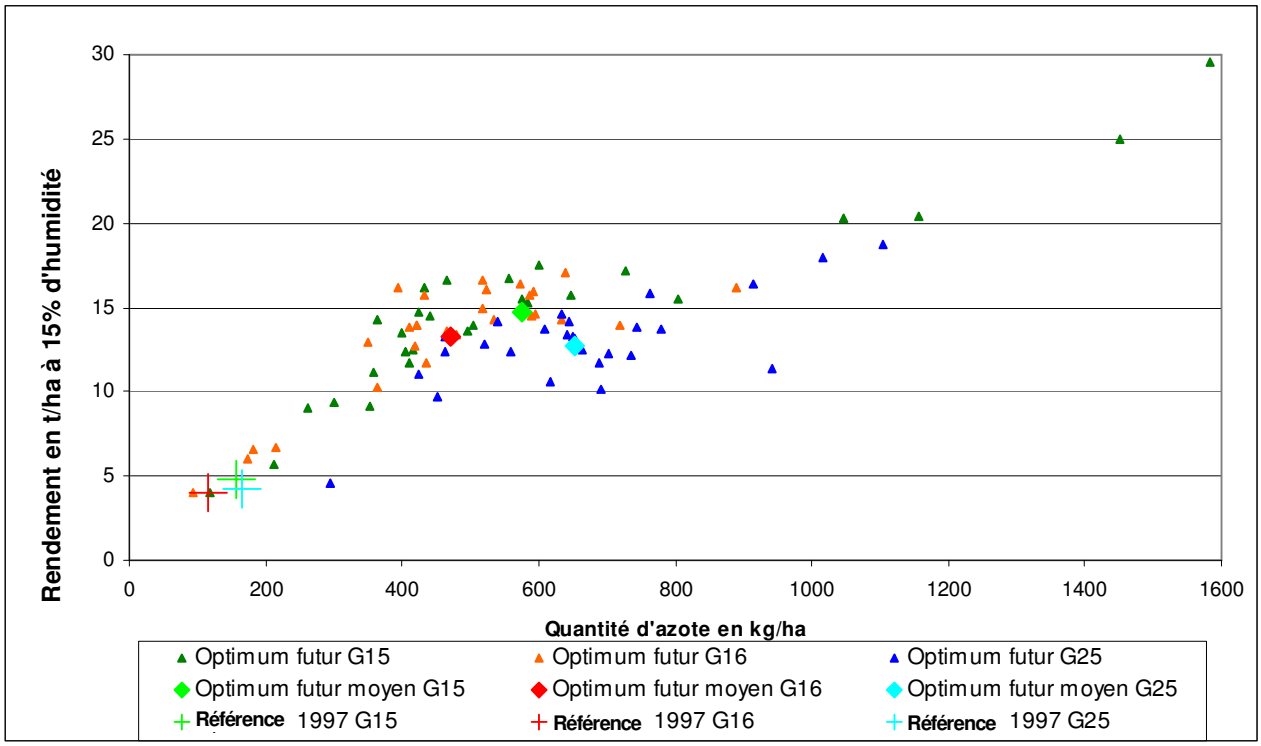


Figure 6.23 Optimums économiques de fertilisation futurs pour le blé tendre des groupes types 15, 16 et 25 de Midi-Pyrénées

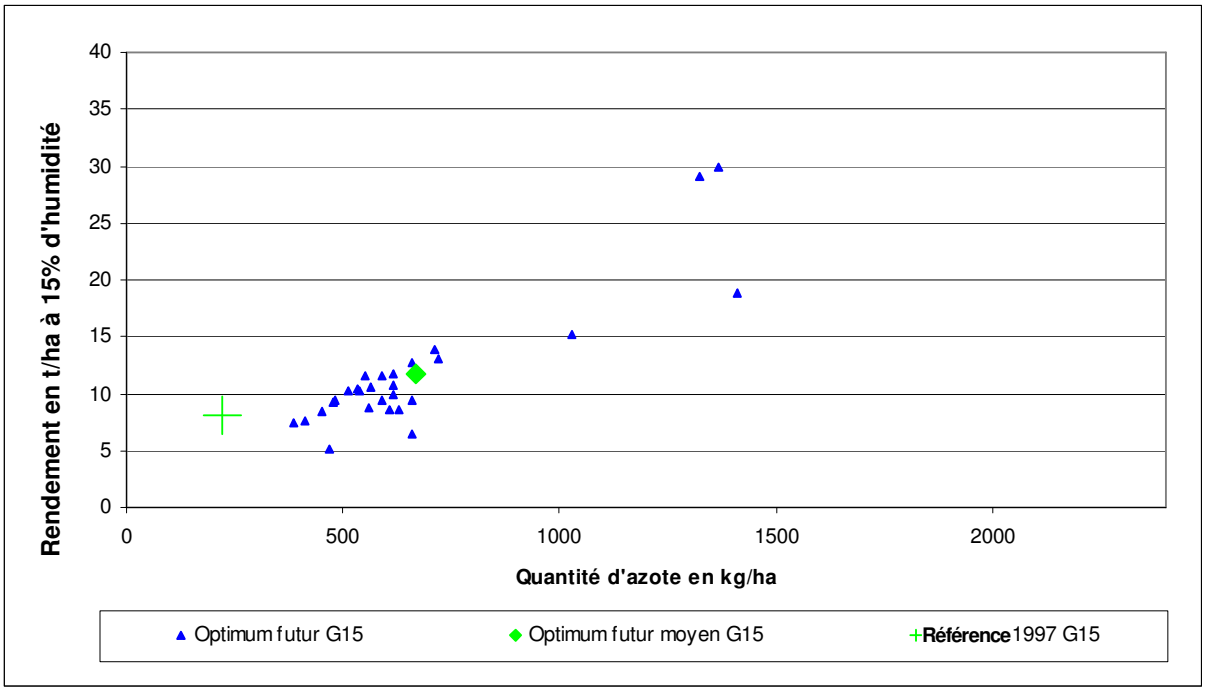


Figure 6.24 Optimums économiques de fertilisation futurs pour le maïs du groupe type 15 de Midi-Pyrénées

Pour la culture de maïs du groupe type 15 (Figure 6.24), le nouvel optimum économique moyen est estimé à une dose d'azote de 669 kg/ha et un rendement de 11.7 t/ha soit un gain de rendement de 3.6 t/ha par rapport à la référence de 1997.

6.4.4.c. Interprétations économiques et discussion

Les résultats obtenus nous permettent de situer les optimums économiques de chaque production dans un contexte climatique futur. Cependant, pour les deux régions et pour les deux types de culture nous obtenons des résultats qui, d'un point de vue agronomique et environnemental, ne sont pas acceptables. Tout d'abord, les doses d'azote optimales proposées sont bien supérieures aux quantités nécessaires pour atteindre le niveau de production optimal correspondant. Ensuite, des gains de rendement de plus de 10 t/ha dans certains cas sont peu réalistes.

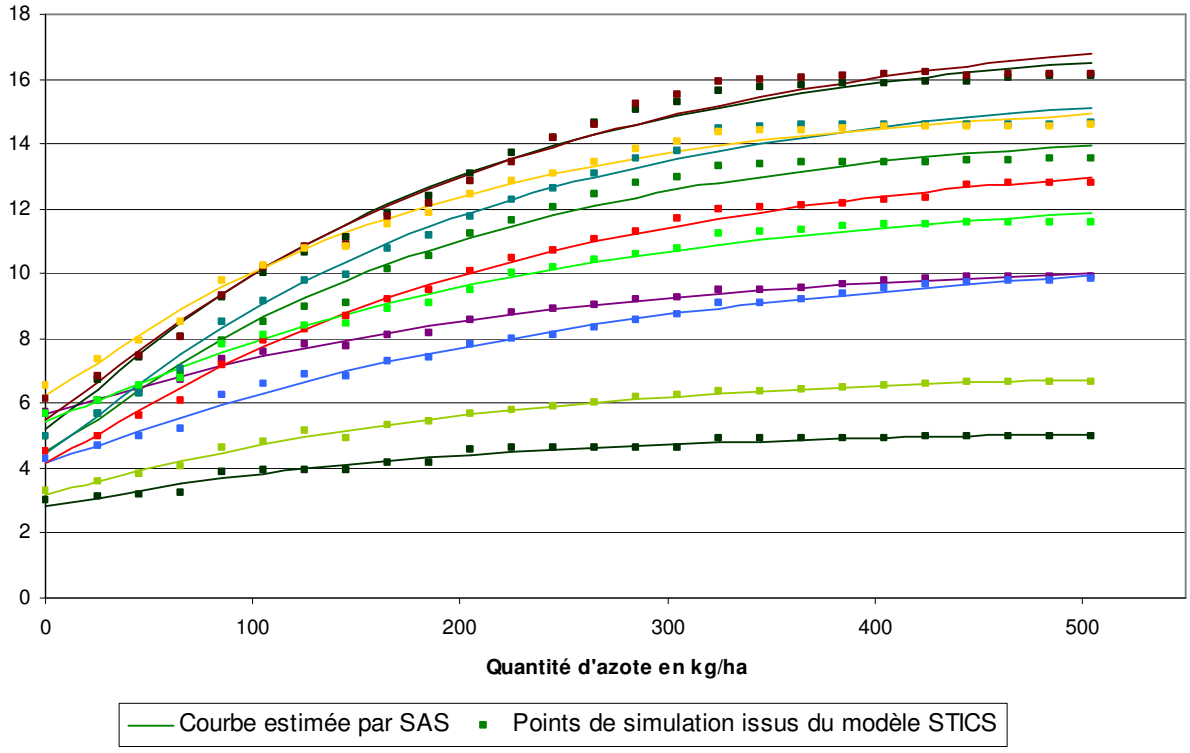


Figure 6.25 Points issus des simulations et courbes ajustées (exemple du blé tendre du groupe type 15 de Midi-Pyrénées)

Les écarts entres les points de simulation issus du modèle STICS et les courbes ajustées peuvent expliquer en partie ces résultats peu réalistes. La Figure 6.25 montre l'exemple des points et courbes de la culture de blé du groupe type 15. Pour des doses d'azotes inférieures à

300 U/ha ou des rendements inférieurs à 13 t/ha les écarts entre les points issus des simulations et la courbe sont faibles. Cependant, au delà de ces valeurs, les écarts sont plus variables et ont tendance à se creuser. Le plateau de la réponse à l'azote mise en évidence par le modèle agronomique n'est pas pris en compte par la courbe ajustée. Ceci explique en partie le fait que les quantités d'intrant estimées soient si élevées. Pour compenser cette erreur, nous pouvons augmenter le nombre de points simulés, afin d'apporter un poids supplémentaire aux observations qui correspondent à la saturation du rendement pour des quantités fortes d'azote apportées. Pour être rigoureux, il serait nécessaire d'adopter la même démarche avec l'ajustement des points de la courbe de réponse de l'année 1997, afin d'avoir une base de comparaison commune aux courbes des années futures et à celle de 1997. Une autre possibilité serait de modifier la forme fonctionnelle, afin de mieux prendre en compte le plateau des pseudo-données issues de STICS, en adoptant, par exemple une forme exponentielle modifiée et en ajoutant un terme à la forme actuelle (cf. Figure 1.12 Les formes fonctionnelles de courbe de réponse les plus courantes.et Tableau 1.4 Caractéristiques des formes de courbes de réponse les plus courantes). Il serait alors nécessaire d'adopter cette forme fonctionnelle pour l'année 1997 pour pouvoir comparer les courbes de réponse entre elles.

D'autre part, les prix de la culture et de l'engrais pris en compte pour le calcul de ces nouveaux optimums économiques sont les mêmes que pour l'année 1997, ce qui ne permet pas réellement une estimation des optimums en conditions économiques futures. Comme nous l'avons déjà souligné, seul l'effet dû au changement climatique est observé, et non pas celui de l'évolution des prix. Dans ces conditions, nous ne pouvons identifier qu'une tendance de l'évolution des optimums économiques.

6.5. Conclusion

Le modèle ARPEGE-Climat de Météo-France a permis d'obtenir, pour le territoire français et après correction, des données climatiques fiables et validées pour la période 2070 à 2099. La forte résolution géographique de ce modèle (maille de 50 × 50 km), nous a offert la possibilité d'attribuer directement ces données climatiques journalières aux exploitations types du modèle AROPAj. L'utilisation de ces données en entrée du modèle STICS a permis d'obtenir la réponse aux apports d'azote des cultures de blé tendre d'hiver et de maïs grain pour des

fermes types des régions Picardie et Midi-Pyrénées. Les courbes de réponse ajustées sur les points issus de ces simulations nous ont donné accès aux premières estimations des rendements et quantités d'azotes optimales en conditions climatiques futures. Ces estimations seraient plus cohérentes avec des valeurs réalistes si les courbes représentaient mieux le plateau mis en évidence par les simulations. De plus, les simulations mettent en évidence une très grande variabilité de la réponse à l'azote du rendement des cultures en conditions futures. Ceci signifie une incertitude encore plus importante qu'actuellement pour le producteur. Cette incertitude paraît difficile à introduire dans le modèle économique AROPAj. En effet, il n'est pas possible d'intégrer les vingt-huit courbes de réponse à l'azote en conditions climatiques futures dans le modèle économique. Une courbe « moyenne » n'est pas satisfaisante car elle ne traduit pas cette variabilité. Une possibilité serait de prendre en compte une courbe « moyenne » et les courbes enveloppes extrêmes du faisceau obtenu.

Selon le type de culture étudié les résultats sont très différents et l'effet « fertilisant » du CO_2 n'est bénéfique que si à la fois les besoins en eau de la culture sont satisfaits et les précocités variétales adaptées. Ainsi, si actuellement le premier facteur limitant des productions végétales, il se peut que ce ne soit plus le cas sous des conditions climatiques futures. Les précipitations se faisant plus rares et les températures plus chaudes, la ressource en eau pourrait devenir le premier facteur limitant des cultures, comme c'est actuellement le cas en Europe du sud.

Conclusion et perspectives

Conclusions et perspectives

Le point de départ de cette thèse était d'améliorer les caractéristiques techniques associées aux activités de productions végétales du modèle économique AROPAj. En mettant au point une méthode de construction des courbes de réponse à l'azote du rendement des grandes cultures européennes, nous avons couplé deux modèles de nature et de vocation initiale très différentes : le modèle économique d'offre agricole AROPAj et le modèle de culture STICS. Ce faisant, plusieurs objectifs d'ordre méthodologique ont été atteints

Tout d'abord, nous avons construit des courbes de réponse à l'azote issu de l'engrais azoté en utilisant un modèle de culture à une échelle inhabituelle, celle des fermes types (fermes statistiques virtuelles sans localisation plus précise que la région RICA) du modèle AROPAj. Le modèle STICS intègre les caractéristiques techniques et physiques et donne accès à des courbes potentielles ; la prise en compte des propriétés économiques requises pour ces courbes permet d'en déterminer une seule pour chaque culture de chaque ferme type. Les courbes construites peuvent prendre en compte l'azote produit sur la ferme issu des déjections animales par l'intermédiaire de coefficients d'équivalence. Tout en étant cohérente avec la réponse à l'azote habituellement observée pour chaque espèce cultivée, chacune des courbes construites est propre à chaque culture de chaque ferme type. En effet, elle intègre les caractéristiques économiques, physiques (sol et climat) et techniques de chacune d'entre elles.

Le second objectif de la thèse porte sur la caractérisation des fermes types de manière à leur donner une réalité physique et technique. En définissant les entrées nécessaires au modèle de culture STICS, nous avons attribué à chacune des cultures de ces fermes types un itinéraire technique simplifié qui reflète à la fois les caractéristiques régionales et celles propres à la ferme type. En dotant chacune des cultures d'un type de sol et d'un climat, nous avons pu amorcer un lien entre des entités statistiques que sont les fermes types et le milieu physique.

Enfin, en intégrant les courbes de réponse à l'azote dans le modèle économique AROPAj, nous avons pu rendre celui-ci plus réactif, en apportant une marge de manœuvre supplémentaire au producteur virtuel que représente chaque ferme type. L'offre optimale de chaque production végétale ne dépend plus seulement de la répartition des surfaces dans l'assolement, mais aussi du niveau de fertilisation azotée qui conditionne le rendement pouvant être atteint. Cette marge de manœuvre supplémentaire joue également sur les

émissions de gaz à effet de serre (GES) qui ne dépendent plus uniquement des quantités produites (pour les productions végétales : surfaces et rendements fixes), mais aussi des niveaux d'intrants azotés nécessaires pour atteindre un niveau de production donné. Ainsi, l'effet d'une taxe sur les émissions de GES est mieux pris en compte par un modèle économique intégrant les courbes de réponse à l'azote, car le niveau d'émissions des activités productrices de GES de chaque ferme type peut être modulé à plusieurs niveaux. L'arbitrage se fait entre les sources de GES que sont d'une part les activités animales, et d'autre part les activités végétales qui émettent indirectement par les engrais qu'elles reçoivent, et par les aliments méthanogènes qu'elles fournissent aux animaux.

Enfin, en étudiant les variations possibles des courbes de réponse produites dans un contexte de changement climatique, toutes choses égales par ailleurs, nous avons mis en évidence la forte variabilité de la réponse à l'azote des cultures de maïs et de blé tendre dans ces situations. Dans ce contexte, l'eau semble devenir le facteur limitant de la production, devant l'azote. La localisation des productions de céréales vers les régions de plus haute altitude semble possible d'un point de vue climatique. La réponse des rendements à l'azote apparaissant très variable pour des conditions climatiques futures, se pose la question de son intégration dans le modèle économique. Une méthode pouvant prendre en compte à la fois la tendance moyenne et la variabilité de la réponse semblerait appropriée.

D'une manière générale, les exemples utilisés dans cette thèse se situent uniquement en France, cependant, la méthode mise au point n'est pas restreinte à cette aire géographique. Elle a été conçue pour s'adapter aux situations rencontrées dans toutes les régions européennes. Compte tenu de l'importance de l'eau, qui est un facteur plus limitant de la production dans les pays du Sud de l'Europe (Espagne, Italie, Grèce, Portugal), il serait cependant nécessaire de mener des tests supplémentaires. Ceux-ci pourraient par exemple nous amener à redéfinir l'ordre de priorité des cultures vis-à-vis de l'irrigation.

Parmi les autres facteurs influençant le niveau de production et ayant une influence sur l'environnement, mise à part l'eau, les éléments fertilisants autres que l'azote (phosphore et potassium) et les pesticides pourraient être considérés. Pour les éléments fertilisants P et K, la notion de courbe de réponse, ou plutôt de surface de réponse, paraît être adaptée pour traduire la relation entre le niveau d'apport et la production. Une démarche similaire à celle mise en

œuvre dans cette thèse pourrait être adoptée, sous réserve de disposer de modèles pouvant prendre en compte ces deux éléments en plus de l'azote. Pour les pesticides, il semble plus complexe de transposer la relation entre les apports et le niveau de production atteint. La modélisation de la relation entre le rendement et les intrants devrait, encore plus que pour les autres facteurs, prendre en compte le moment où s'effectuent les opérations. Ceci laisse pour l'instant les pesticides peu accessibles au type de méthode mise au point dans cette thèse.

Afin de pouvoir intégrer les changements climatiques et leur effet sur la production dans le modèle AROPAj, une première approche a été l'étude des modifications de la courbe de réponse à l'azote en conditions climatiques futures, toutes choses égales par ailleurs. L'adaptation des pratiques culturales n'est pas prise en compte pour l'instant, faute de disponibilité de données fiables en relation avec notre échelle de travail. De plus, les conséquences du changement climatique sur les émissions même de GES n'apparaissent pas actuellement dans les calculs préconisés par le GIEC et utilisés par AROPAj. Ces aspects seraient à prendre en compte afin de pouvoir intégrer l'effet des changements climatiques sur la production et les émissions de GES dans le modèle AROPAj. Une fonction des émissions de N_2O en lien avec le niveau de production et le niveau d'apports azotés pourrait être envisagée, et évaluée à partir de modèles qui considèrent ces émissions gazeuses.

Nous avons mis en évidence des réponses à l'azote, pour une culture et une ferme type, variables d'une année sur l'autre, dans des conditions climatiques futures. Ceci pose la question de l'intégration de ces réponses au sein d'un modèle économique qui ne peut prendre en compte, à chaque simulation, qu'une seule courbe de réponse par couple (culture, groupe type). Pour chacun de ces cas, il sera nécessaire de considérer la variabilité des courbes obtenues, et pour cela, d'envisager différentes méthodes d'intégration. En effet, on observe, selon les cultures et les groupes types des faisceaux de courbes en conditions climatiques futures aux situations diverses par rapport à la courbe de réponse à l'azote de référence actuelle. Si dans certains cas, les cultures se révèlent plus productives globalement vis-à-vis de l'azote, dans d'autres cas, les courbes de réponse « futures » se situent majoritairement en dessous de la référence de 1997. De plus, les courbes « futures » peuvent soit constituer un faisceau assimilable à une translation de la courbe de référence, soit s'écarter à partir du point d'ordonnée à l'origine. L'ensemble de ces « déformations » des courbes de réponse à l'azote donne à s'interroger sur la méthode à mettre au point pour intégrer aujourd'hui, dans

l'utilisation d'un modèle économique, les diversités des situations rencontrées à l'horizon 2070-2100.

Bibliographie

ABARE (1996). The MEGABARE Model: interim documentation. Australian Bureau of Agriculture and Resource Economics. Canberra.

Ackello-Ogutu C., Paris Q., Williams W. A. (1985). "Testing a Von Liebig crop response function against polynomial specifications." American Journal of Agricultural Economics **67**(4).

Adenaeuer M., Britz W., Jansson T., Perez I., Wieck C. (1997). CAPRI Modelling System "Common Agricultural Policy Regional Impact Analysis".

Allison M., Armstrong M. (1995). "Can the fertiliser nitrogen requirement of sugar beet be predicted?" British Sugar Beet Review **63**(4).

Allison M. F., Armstrong M. J., Jaggard K. W., Todd A. D., Milford G. F. J. (1996). "An analysis of the agronomic, economic and environmental effects of applying N fertilizer to sugarbeet (Beta vulgaris)." Journal of Agricultural Science **127**(4).

Angenendt E., Schäfer M., Neufeldt H., Zeddies J. (2004). "Modellierung klimarelevanter Emissionen aus der Landwirtschaft Baden-Württembergs." Schriften der Gesellschaft für Wirtschafts- und Sozialwissenschaften des Landbaues e.V. **39**: 221--230.

Arfini F. (2001). "Mathematical programming models employed in the analysis of the common agricultural policy." Working Paper of INEA (Istituto Nazionale di Economia Agraria) **9**: 36 p.

ARVALIS Institut du végétal, Ed. (2005). Fertilisation azotée du blé tendre d'hiver.

Barkaoui A., Butault J. P. (1998). "Meuse agriculture modelling and Agenda 2000." Economie Rurale(No. 248).

Batjes N. H. (1996). "Total carbon and nitrogen in the soils of the world." European journal of Soil Science **47**: 151-163.

Batjes N. H. (2002). "Carbon and nitrogen stocks in the soils of Central and Eastern Europe." Soil Use and Management **18**(4): 324-329.

Bazzaz F., Sombroek W. (1997). Changements du climat et production agricole : Effets directs et indirects du changement des processus hydrologiques, pédologiques et physiologiques des végétaux, FAO. Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture. Rome. Italie ; Polytechnica. Paris. France.

Belanger G., Walsh J. R., Richards J. E., Milburn P. H., Ziadi N. (2000). "Comparison of three statistical models describing potato yield response to nitrogen fertilizer." Agronomy Journal **92**(5).

Benbi D. K., Nieder R. (2003). Handbook of processes and modeling in the soil-plant system. Binghamton, USA, Food Products Press.

Biomasse Normandie (2002). Evaluation des quantités actuelles et futures des déchets épandus sur les sols agricoles et provenant de certaines activités - Lot 3 effluents d'élevage - Rapport Final. Ministère de l'écologie et du développement durable.

Boiffin J., Stengel P. (1999). Réapprendre le sol : nouvel enjeu pour l'agriculture et l'espace rural. Club Déméter. Economie et stratégies agricoles. A. Colin**:** 147-211.

Boote K. J., Jones J. W., Hoogenboom G. (1998). Simulation of crop growth: CROPGRO model. Agricultural systems modeling and simulation. R. M. Peart et R. B. Curry. New York, USA, Marcel Dekker Inc.**:** 651-692.

Bouman B. A. M., van Keulen H., van Laar H. H., Rabbinge R. (1996). "The 'School of de Wit' crop growth simulation models: A pedigree and historical overview." Agricultural Systems **52**(2-3): 171-198.

Bouman B. A. M., Kropff M. J., Tuong T. P., Wopereis M. C. S., ten Berge H. F. M., van Laar H. H. (2001). ORYZA2000: modelling lowland rice. Los Baños (Philippines), International Rice Research Institute, and Wageningen University.

Boussard J. M., Boussemart J. P., Flichman G., Jacquet F., Lefer H. B. (1997). "The effects of the CAP reform on French crop-livestock farms: technical changes and regional specialization." Economie Rurale(No. 239).

Boussemart J. P., Flichman G., Jacquet F., Lefer H. B. (1996). "Predicting the effects of CAP reform on two French agricultural regions: application of a bioeconomic model." Canadian Journal of Agricultural Economics **44**(2).

Boyd D. A., Yuen L. T. K., Needham P. (1976). "Nitrogen requirement of cereals. 1. Response curves." Journal of Agricultural Science, UK **87**(1): 149-162.

Brisson N., Perrier A. (1991). "A semiempirical model of bare soil evaporation for crop simulation models." Water Resources Research **27**(5).

Brisson N., Seguin B., Bertuzzi P. (1992). "Agrometeorological soil water balance for crop simulation models." Agricultural and Forest Meteorology **59**(3-4).

Brisson N., Ozier-Lafontaine H., Améglio T. (1997). Les potentialités agricoles. Ecole-Chercheurs INRA en bioclimatologie Le Croisic 25-29 mars 1997. P. Lagouarde J.M. et Cruiziat. Versailles, INRA Editions. **Tome 2:** 441-448.

Brisson N., Mary B., Ripoche D., Jeuffroy M. H., Ruget F., Nicoullaud B., Gate P., Devienne-Barret F., Antonioletti R., Durr C., Richard G., Beaudoin N., Recous S., Tayot X., Plenet D., Cellier P., Machet J. M., Meynard J. M., Delecolle R. (1998). "STICS: a generic model for the simulation of crops and their water and nitrogen balances. I. Theory and parameterization applied to wheat and corn." Agronomie **18**(5/6).

Brisson N., Mary B. (2002). STICS versions 5.0 Notice concepts et formalismes, INRA.

Brisson N., Ruget F., Gate P., Lorgeou J., Nicoullaud B., Tayot X., Plenet D., Jeuffroy M. H., Bouthier A., Ripoche D., Mary B., Justes E. (2002). "STICS: a generic model for simulating crops and their water and nitrogen balances. II. Model validation for wheat and maize." Agronomie **22**(1).

Brisson N., Wery J. (2002). Introduction aux modèles de culture. Ecole chercheurs Pour une bonne utilisation des modèles de culture, Le Croisic.

Brisson N., Gary C., Justes E., Roche R., Mary B., Ripoche D., Zimmer D., Sierra J., Bertuzzi P., Burger P., Bussiere F., Cabidoche Y. M., Cellier P., Debaeke P., Gaudillere J. P., Henault C., Maraux F., Seguin B., Sinoquet H. (2003). "An overview of the crop model STICS." European Journal of Agronomy **18**(3/4).

Brisson N. (2004). Questionnements sur l'impact du changement climatique sur les grandes cultures. Séminaire MICCES - INRA - 22-23 janvier 2004, Isle sur Sorgue.

Brisson N., Déqué M., Diaz R., Ducharne A., Juin S., Lebonvallet S. (2005). Utilisation des scénarios de changement climatique dans un modèle de culture. Séminaire STICS- 17-18 mars 2005, Carry Le Rouet.

Brown D. K., Deardorff A. V., Fox A. K., Stern R. M. (1996). Computational Analysis of Goods and Services Liberalization in the Uruguay Round. The Uruguay Round and the Developing Countries. W. Martin et L. A. Winters. New York, Cambridge University Press.

Bullock D. G., Bullock D. S. (1994). "Quadratic and quadratic-plus-plateau models for predicting optimal nitrogen rate of corn: a comparison." Agronomy Journal **86**(1).

Burniaux J.-M., Mensbrugghe D. v. d. (1990). A Rural/Urban-North/South general equilibrium model for agricultural policy analysis. OECD Economics Department Technical Papers 33. Paris.

Cabelguenne M., Marty J. R., Hilaire A. (1982). "Comparaison technico-économique de la valorisation de l'irrigation par quatre cultures d'été (maïs, soja, sorgho, tournesol)." Agronomie **2**: 567-576.

Cabelguenne M., Debaeke P., Bouniols A. (1999). "EPICphase, a version of the EPIC model simulating the effects of water and nitrogen stress on biomass and yield, taking account of developmental stages: validation on maize, sunflower, sorghum, soybean and winter wheat." Agricultural Systems **60**(3).

Cerrato M. E., Blackmer A. M. (1990). "Comparison of models for describing corn yield response to nitrogen fertilizer." Agronomy Journal **82**(1).

CETIOM, Ed. (2002). Comment conduire son colza pour valoriser les effluents d'élevage - Brochure.

CETIOM, Ed. (2003a). Colza d'hiver- Les techniques culturales, Le contexte économique.

CETIOM, Ed. (2003b). Tournesol - Les techniques culturales, Le contexte économique.

Chenery H. B. (1949). "Engineering production functions." Quarterly Journal of Economics: 501-531.

Collectif (1999). Encyclopédie des techniques agricoles. 1. Productions végétales - CD-Rom. Ibis Press.

Couture J.-N., Robert L. (2000). La gestion des fumiers : solide ou liquide. MAPAQ.

Daroussin J., King D. (1997). A pedotransfer rules database to interpret the soil geographical database of Europe for environmental purposes, in The use of pedotransfer in soil hydrology research in Europe. Proceedings of the second workshop of the projet 'Using existing soil data to derive hydraulic parameters for simulation modelling in environmental studies and in land use planning', 10-12 october 1996, Orléans, France, INRA Orléans

JRC Ispra.

Darwin R. F., Tsigas M., Lewandrowski J., Raneses A. (1995). World agriculture and climate change: Economic adaptations. Agricultural Economic Report 703. ERS-USDA. Washington, DC, US Government Printing Office.

Dayan E., Keulen H. v., Jones J. W., Zipori I., Shmuel D., Challa H. (1993). "Development, calibration and validation of a greenhouse tomato growth model: I. Description of the model." Agricultural Systems **43**(2).

De Cara S., Jayet P. A. (2000). "Emissions of greenhouse gases from agriculture: the heterogeneity of abatement costs in France." European Review of Agricultural Economics **27**(3).

De Cara S., Houzé M., Jayet P.-A. (2004). Greenhouse gas emissions from agriculture in the EU: A spatial assessment of sources and abatement costs. Cahiers de recherche. Thiverval-Grignon, INRA SAE2.

De Cara S., Houzé M., Jayet P. A. (2005). "Methane and nitrous oxide emissions from agriculture in the EU: a spatial assessment of sources and abatement costs." Environmental and Resource Economics **Accepté- A paraître**.

De Wit C. T., Brouwer R., Penning de Vries F. W. T. (1970). The simulation of photosynthetic systems. Prediction of photosynthetic productivity. Proceedings IBP/PP Technical Meeting Trebon 1969. I. Setlik. Pudoc, Wageningen, The Netherlands**:** 47-50.

Debaeke P., Cabelguenne M., Hilaire A., Raffaillac D. (1998). "Crop management systems for rainfed and irrigated sunflower (Helianthus annuus) in south-western France." Journal of Agricultural Science **131**(2).

Deumier J. M., Balas B., Merrien A., Lacroix B., Algans J. L., Estragnat A., Leguevaques B. (1995). Grandes cultures, quel assolement, quelle stratégie d'irrigation? Perspectives Agricoles**:** 96-103.

Diaz R. (2004). Global Change and crop modelling project. Stage interne INRA. Avignon**:** 32 p.

Domergue M. (2001). Impact du réchauffement climatique sur le parcours phénologique d'espèces / variétés fruitières dans la vallée du Rhône. Rouen, ESITPA**:** 56.

Donaldson A. B., Flichman G., Webster J. P. G. (1995). "Integrating agronomic and economic models for policy analysis at the farm level: the impact of CAP reform in two European regions." Agricultural Systems **48**(2).

Donet I., Le Bas C., Ruget F., Rabaud V. (2001). Information et suivi objectif des prairies (ISOP) - Guide d'utilisation. Agreste-Chiffres et données agriculture n° 134. SCEES - Ministère de l'agriculture et de la pêche**:** 55.

Easterling D. R., Thomas C. P., Thomas R. K. (1996). "On the development and use of homogenized climate data sets." Journal of Climate(9): 1429-1434.

Fellous J.-L. (2003). Avis de tempêtes. La nouvelle donne climatique. Paris, Odile Jacob.

Flichman G. (1995). Bio-economic models integrating agronomic, environmental and economic issues with agricultural use of water. Farm water management: socio-economic and environmental aspects, Adana, Turkey, 4-18 June, 1995.

Flichman G., Jacquet F. (2003). "Integrating agronomic and economic models for agricultural policy analysis." Cahiers d'Economie et Sociologie Rurales(No.67).

Folmer C., Keyzer M. A., Merbis M. D., Stolwijk H. J. J., Veenendaal P. J. J. (1995). Common Agricultural Policy Beyond the MacSharry Reform. Amsterdam: North-Holland, Elsevier Publishing Company.

François J. F., McDonald B., Nordstrom H. (1996). Assessing the Uruguay Round. The Uruguay Round and the Developing Countries. W. Martin et L. A. Winters. Cambridge, Cambridge University Press.

Frank M. D., Beattie B. R., Embleton M. E. (1990). "A comparison of alternative crop response models." American Journal of Agricultural Economics **72**(3).

Gabrielle B., Menasseri S., Houot S. (1995). "Analysis and field evaluation of the Ceres models water balance component." Soil Science Society of America Journal **59**(5).

Gate P. (1995). Ecophysiologie du blé, de la plante à la culture, ITCF.

Gibelin A.-L., Déqué M. (2001). Un scénario à l'échelle de l'Europe pour le climat de la fin du XXI ème siècle. Note de travail du groupe de météorologie de grande échelle et climat N° 79. CNRM, Météo France**:** 63 p.

GIEC Groupe de travail I (2001). Bilan 2001 des changements climatiques : les éléments scientifiques. GIEC**:** 97 p.

Godard C., Bamière L., Debove E., De Cara S., Jayet P. A., Niang N. B. (2005). Interface between agriculture and the environment : integrating yield response functions in an economic model of EU agriculture. 89th EAAE Seminar: Modelling agricultural policies: state of the art and new challenges, Parma (Italy), A paraître.

Gohin A., Guyomard H., Mouel C. l. (1998). The analysis of agricultural policy in general equilibrium: the example of the French general equilibrium model for agriculture and agricultural food production (FMGEAA). INRA Sciences Sociales.

Hansen S., Jensen H. E., Nielsen N. E., Svendsen H. (1990). Daisy - A Soil Plant Atmosphere System Model.

Harrison G. W., Tarr D., Rutherford T. F. (1997). "Quantifying the Uruguay Round." Economic Journal **107**: 1405-1430.

Hazell P. B. R., Norton R. D. (1986). Mathematical Programming for Economic Analysis in Agriculture. New York.

Heady E. O., Pesek J. (1954). "A fertilizer production surface." Journal of Farm Economy **36**: 466-482.

Heady E. O., Pesek J., Brown W. G. (1955). Corn Response Surface and economic optima in fertilizer use. Research Bulletin 424, Iowa State Exp. Station.

Heady E. O., Dillon J. L. (1961). Agricultural production functions.

Herlihy M. (1992). "Effects of N, P and K on yield and quality of sugar beet." Irish Journal of Agricultural and Food Research **31**(1).

Hertel T. W. (1997). Global Trade Analysis: Modeling and Applications. Cambridge, Cambridge University Press.

Hiederer R. (2002). European Catchment Information System for agri-environmental issues. Proceedings of Euroconference 'Link GEO and Water Research', 7 9 February 2002, Genoa, Italy.

Idso S. B. (1991). "A general relationship between CO2-induced increases in net photosynthesis and concomitant reductions in stomatal conductance." Environmental and Experimental Botany **31**(4): 381-383.

Institut de l'élevage, ITAVI, ITCF, ITP, Eds. (2001). Fertiliser avec les engrais de ferme.

Intergovernmental Panel on Climate Change (2001). Good Practice Guidance and Uncertainty Management in National Greenhouse Gas Inventories. Japan, Institute for Global Environmental Strategies (IGES).

Isfan D., Zizka J., D'Avignon A., Deschenes M. (1995). "Relationships between nitrogen rate, plant nitrogen concentration, yield and residual soil nitrate-nitrogen in silage corn." Communications in Soil Science and Plant Analysis **26**(15/16).

ITCF, Ed. (2002). Orges brassicoles et fourragères.

Jarrige R. (1988). Alimentation des Bovins, Ovins et Caprins. Paris, France, INRA.

Jayet P. A., Lefaudeux F., Mathurin J. (1992). Differentiated impacts of CAP reform according to regions and technical orientations. Etudes Economiques - Economie et Sociologie Rurales/Grignon, Institut National de la Recherche Agronomique.

Jayet P. A., Birfet A., Hofstetter A. (1998). "Agro-forestry and the Common Agricultural Policy: an investigation of incentives to afforestation." Cahiers d'Economie et Sociologie Rurales(No. 48).

Jayet P.-A., Labonne J. (2005). "Impact d'une réforme de la Politique Agricole Commune par le découplage." Economie et Prévision **167**(1).

Jensen E. S., Haahr V. (1990). "The effect of pea cultivation on succeeding winter cereals and winter oilseed rape nitrogen nutrition." Applied Agricultural Research **5**(2).

Jeuffroy M. H., Recous S. (1999). "Azodyn: a simple model simulating the date of nitrogen deficiency for decision support in wheat fertilization." European Journal of Agronomy **10**(2).

Johnson A. K. L., Cramb R. A. (1991). "Development of a simulation based land evaluation system using crop modelling, expert systems and risk analysis." Soil Use and Management **7**(4): 239-246.

Jones C., Kiniry J. (1986). Ceres-N Maize: a simulation model of maize growth and development. Temple, TX.

Jones J. W., Hoogenboom G., Porter C. H., Boote K. J., Batchelor W. D., Hunt L. A., Wilkens P. W., Singh U., Gijsman A. J., Ritchie J. T. (2003). "The DSSAT cropping system model." European Journal of Agronomy **18**(3-4): 235-265.

Jones P. J., Rehman T., Harvey D. R., Tranter R. B., Marsh J. S., Bunce R. G. H., Howard D. C. (1995). Developing LUAM (Land Use Allocation Model) and modelling CAP reforms. CAS Paper 32. Reading, The University of Reading, Centre for Agricultural Strategy.

Jones R. J. A., Hiederer R., Rusco E., Montanarella L. (2005). "Estimating organic carbon in the soils of Europe for policy support." European Journal of Soil Science(A paraître).

Judez L., Chaya C., Martinez S., Gonzalez A. A. (2001). "Effects of the measures envisaged in "Agenda 2000" on arable crop producers and beef and veal producers: an application of Positive Mathematical Programming to representative farms of a Spanish region." Agricultural Systems **67**(2).

Juin S., Brisson N., Clastre P., Grand P. (2004). "Impact of global warming on the growing cycles of three forage systems in upland areas of southeastern France." Agronomie **24**(6/7).

King D., Daroussin J., Tavernier R. (1994). "Development of a soil geographic database from the Soil Map of the European Communities." Catena **21**: 37-56.

Kroes J. G., Wesseling J. G., Dam J. C. v. (2000). "Integrated modelling of the soil-water-atmosphere-plant system using the model SWAP 2.0 an overview of theory and an application." Hydrological Processes **14**(11/12).

Lafolie F. (1991). "The PASTIS model." Fertilizer Research **27**: 215-231.

Lal H., Hoogenboom G., Calixte J. P., Jones J. W., Beinroth F. H. (1993). "Using crop simulation models and GIS for regional productivity analysis." Transactions of the American Society of Agricultural Engineers **36**(1): 175-184.

Lanzer E. A., Paris Q. (1981). "A new analytical framework for the fertilization problem." American Journal of Agricultural Economics **63**(1).

Le Bas C., King D., Daroussin J. (1997). "A Tool for Estimating Soil Water Available for Plants Using the 1:1,000,000 Scale Soil Geographical Data Base of Europe." ITC Journal **3-4**.

Leat P. M. K., Chalmers N. (1991). "Analysing Agricultural Adjustment in Grampian Using an Input-Output Model of the Agricultural and Food Complex." Input-output models in the agricultural sector: 57-71.

Lebonvallet S. (2002). Simulation de l'azote chez le blé dur et impacts des changements climatiques. Département Agronomie Environnement. Paris, INA P-G**:** 32 p. + annexes.

Leclerc B. (1995). Guide des matières organiques. Paris.

Lee H., Oliviera-Martins J., Mensbrugghe D. v. d. (1994). The OECD GREEN model: an updated overview. OECD technical economics papers No 97. Paris.

Legrand G., Vanstallen M. (2000). Fumure azotée en betterave sucrière. IRBAB et KBIVB**:** 53.

Lemaire G., Gastal F. (1997). N uptake and distribution in plant canopies. Diagnosis of the nitrogen status in crops. G. Lemaire. Berlin, Springer Verlag**:** 3-44.

Leterme P., Reau R. (1993). Azote : Quand l'apporter au tournesol? Oléoscope. **14:** 13-14.

Limaux F., Recous S., Meynard J.-M., Guckert A. (1999). "Relationship between rate of crop growth at date of fertiliser N application and fate of fertiliser N applied to winter wheat." Plant and Soil **214**(1 - 2): 49-59.

Llewelyn R. V., Featherstone A. M. (1997). "A comparison of crop production functions using simulated data for irrigated corn in western Kansas." Agricultural Systems **54**(4): 521-538.

Lorgeou J., Souverain F., Eds. (2003). Atlas agroclimatique du maïs, Arvalis

Meteo France.

Makowski D., Wallach D., Meynard J. M. (1999). "Models of yield, grain protein, and residual mineral nitrogen responses to applied nitrogen for winter wheat." Agronomy Journal **91**(3).

Marsden J. R., Pingry D. E. (1986). "Engineering Production Functions and the Testing of Quantitative Economic Hypotheses." Economica **53**(212): 533-534.

Mary B., Beaudoin N., Justes E., Machet J. M. (1999). "Calculation of nitrogen mineralization and leaching in fallow soil using a simple dynamic model." European Journal of Soil Science **50**(4).

McCown R. L., Hammer G. L., Hargreaves J. N. G., Holzworth D. P., Freebairn D. M. (1996). "APSIM: a novel software system for model development, model testing and simulation in agricultural systems research." Agricultural Systems **50**(3).

Meudt M., Britz W. (1997). The CAPRI nitrogen balance. Bonn, Germany.

Meynard J.-M., Boiffin J., Caneill J., Sebillotte M. (1981). "Elaboration du rendement et fertilisation azotée du blé d'hiver en Champagne Crayeuse. II. Type de réponse à la fumure azotée et application de la méthode du bilan prévisionnel." Agronomie **1**: 795-806.

Mitscherlich E. A. (1909). "Das gesetz des minimums und das gesetz des abnehmenden bodenertrages." **38**: p.537-552.

Moen T. N., Kaiser H. M., Riha S. J. (1994). "Regional yield estimation using a crop simulation model: concepts, methods, and validation." Agricultural Systems **46**(1): 79-92.

Monteith J. L. (1977). "Climate and the efficiency of crop production in Britain." Philosophical Transactions of the Royal Society of London **Series B, 281**: 277–249.

Neeteson J. J., Wadman W. P. (1987). "Assessment of economically optimum application rates of fertilizer N on the basis of response curves." Fertilizer Research **12**(1).

Nicolardot B., Recous S., Mary B. (2001). "Simulation of C and N mineralisation during crop residue decomposition: a simple dynamic model based on the C:N ratio of the residues." Plant and Soil **228**(1).

OECD (1999a). AGLINK Model - Technical Documentation. a. a. f. Directorate for food. Paris.

OECD (1999b). The OECD agricultural outlook. a. a. f. Directorate for food. Paris.

Oger R. (1994). "Selection and interpretation of nitrogen fertilizer response functions for cereals." Bulletin des Recherches Agronomiques de Gembloux **29**(3).

Paris Q. (1992). "The Vonliebig Hypothesis." American Journal of Agricultural Economics **74**(4): 1019-1028.

Paris Q., Arfini F. (1999). Assessment of Agenda 2000's impact on the Emilia Romagna region agricultural system using aggregate FADN data. Eurotools Seminar.

Piet L. (2002). Spatialisation d'un modèle d'équilibre général calculable pour l'étude de la localisation des activités agricoles à une échelle infra-nationale. Unité de Recherche Agriculture et dynamique de l'espace rural, Eaux et Forêt. Bordeaux, Cemagref**:** 315.

Rabaud V., Cesse M., Eds. (2004). Enquête sur les pratiques culturales en 2001. Agreste Chiffres et Données Agriculture, Ministère de l'égriculture, de l'alimentation, de la pêche et des affaires rurales.

Reau R., Wagner D. (1994). Comparaison technico-économiques de conduites de culture du tournesol. Oléoscope**:** 23-24.

Ritchie J. T. (1972). "Model for predicting evaporation from a row crop with incomplete cover." Water Resources Research **8**(5).

Ritchie J. T., Otter S. (1985). Description and performance of CERES-Wheat: A user-oriented wheat yield model. ARS Wheat Yield Projet.ARS-38. W. O. Willis, U.S. Department of Agriculture-Agricultural research service**:** 159-175.

Roberts D., Russell N. (1996). Income distribution and the structure of production: insights from SAM-based model of UK agriculture. Rural Economy Modelling: An Input-Output Approach. P. Midmore et L. Harrisson-Mayfield. Wallingford**:** 53-67.

Roningen V. (1986). A static world policy simulation (SWOPSIM) modeling framework. Washington, DC, USDA, Economic Research Service.

Rosenzweig C., Hillel D. (1998). Climate change and the global harvest: potential impacts of the greenhouse effect on agriculture. Climate change and the global harvest: potential impacts of the greenhouse effect on agriculture.

Ruget F., Nicoullaud B., Lorgeou J., Brisson N., Gate P., Ripoche D., King D., Delecolle R., Daroussin J., Ngongo L., Clastre P. (1995). Délimitation de zones équivalentes en France et dans la Communauté Européenne pour optimiser les réseaux d'expérimentation des variétés, maïs, résultats complets. Etude pour le Ministère de l'Agriculture, de la Pêche et de l'Alimentation. INRA et AGPM**:** 41.

Salvatici L., Anania G., Arfini F., Conforti P., De Muro P., Londero P., Sckokai P. (2000). Recent developments in modelling the CAP: Hype or hope? Agricultural Sector Modelling and Policy Information Systems, 65th EAAE Seminar 29-31 March 2000, Bonn, Germany.

Schneider U. A. (2000). Agricultural Sector Analysis on Greenhouse Gas Emission Mitigation in the United States. College Station, TX, USA, Texas A\& M University.

Schroder J. J., Neeteson J. J., Withagen J. C. M., Noij I. G. A. M. (1998). "Effects of N application on agronomic and environmental parameters in silage maize production on sandy soils." Field Crops Research **58**(1).

Seguin B., Baculat B., Brisson N., Domergue M., Garcia I. (2004). Impact du changement climatique sur les arbres fruitiers et la vigne. Séminaire MICCES - INRA - 22-23 janvier 2004, Isle sur Sorgue.

Sinclair T. R. (1986). "Water and nitrogen limitations in soybean grain production. I. Model development." Field Crops Research **15**(2).

Smith V. K. (1986). "Another View of the State of Engineering Production Functions." Economica **53**(212): 529-532.

Soussana J.-F. (2001). Changement climatique : impacts potentiels sur l'agriculture et adaptations possibles (Annexe scientifique). Economie et stratégies agricoles - Nouveaux enjeux pour l'agriculture. A. Colin. Paris. **Déméter 2002:** 195-222.

Spaeth S. C., Sinclair T. R. (1985). "Linear increase in soybean harvest index during seed-filling." Agronomy Journal **77**(2).

Sparrow P. E. (1979). "Nitrogen response curves of spring barley." Journal of Agricultural Science, UK **92**(2).

Spitters C. J. T. (1990). "Crop growth models: their usefulness and limitations." Acta Horticulturae(No. 267).

Stewart D. W., Dwyer L. M. (1990). "A model of spring wheat (Triticum aestivum) for large area yield estimations on the Canadian prairies." Canadian Journal of Plant Science **70**(1): 19-32.

Stockle C. O., Dyke P. T., Williams J. R., Jones C. A., Rosenberg N. J. (1992a). "A method for estimating the direct and climatic effects of rising atmospheric carbon dioxide on

growth and yield of crops: Part II - Sensitivity analysis at three sites in the midwestern USA." Agricultural Systems **38**(3).

Stockle C. O., Williams J. R., Rosenberg N. J., Jones C. A. (1992b). "A method for estimating the direct and climatic effects of rising atmospheric carbon dioxide on growth and yield of crops: Part I - Modification of the EPIC model for climate change analysis." Agricultural Systems **38**(3).

Stockle C. O., Martin S. A., Campbell G. S. (1994). "CropSyst, a cropping systems simulation model: water/nitrogen budgets and crop yield." Agricultural Systems **46**(3).

Stockle C. O., Donatelli M., Nelson R. (2003). "CropSyst, a cropping systems simulation model." European Journal of Agronomy **18**(3-4): 289-307.

Sylvester-Bradley R., Stokes D. T., Scott R. K. (1990a). "A physiological analysis of the diminishing responses of winter wheat to applied nitrogen. I. Theory." Aspects of Applied Biology(No.25).

Sylvester-Bradley R., Stokes D. T., Scott R. K., Willington V. B. A. (1990b). "A physiological analysis of the diminishing responses of winter wheat to applied nitrogen. 2. Evidence." Aspects of Applied Biology(No.25).

Sylvester-Bradley R., Cross R. B. (1991). "Nitrogen residues from peas and beans and the response of the following cereal to applied nitrogen." Aspects of Applied Biology(No.27).

Tangermann S., Josling T. E. (1994). Pre-accession agricultural policies for Central Europe and the European Union Study commissioned by. Study prepared for the DG I. Göttingen, European Commission.

The European Soil Bureau (1998). The European Soil Data Base, version 1.0, The European Soil Bureau, JRC, European Commission.

Tongeren F. v., Meijl H. v. (1999). Review of applied models of international trade in agricultural and related resource and environmental modeling. EU-Fair VI-CT 98-4148, Interim report 1. F. v. Tongeren et H. v. Meijl, Agricultural Economics Researtch Institute.

Tongeren F. v., Meijl H. v., Veenendaal P., Frandsen S., Nielsen C. P., Staehr M., Brockmeier M., Manegold D., Francois J., Rambout M., Surry Y., Vaittinen R., Kerkela L., Ratinger T., Thomson K., Frahan B. H. d., El-Mekki A. A., Salvatici L. (2001). Review of agricultural trade models: an assessment of models with EU policy relevance. Agricultural sector modelling and policy information systems. Proceedings of the 65th European Seminar of the European Association of Agricultural Economists (EAAE), Bonn, Germany, 29-31 March, 2000.

Tubiello F. N., Ewert F. (2003). "Simulating the effects of elevated CO2 on crops: approaches and applications for climate change." European Journal of Agronomy **18**(1/2).

United States Geological Survey (2003). Global Landcover Characteristics Database.

Vaidyanathan L. V., Sylvester-Bradley R., Bloom T. M., Murray A. W. A. (1987). "Effects of previous cropping and applied nitrogen on grain nitrogen content in winter wheat." Aspects of Applied Biology(No. 15).

van der Goot E. (1998). Spatial interpolation of daily meteorological data for the crop growth monitoring system (CGMS). Seminar on data spatial distribution in meteorology and

climatology Volterra, 28 sept. - 3 Oct 1997. M. Bindi et B. Gozzini. Luxembourg, Office for official publications of the European Communities.

van Diepen C. A., Wolf J., van Keulen H., Rappoldt C. (1989). "WOFOST: a simulation model of crop production." Soil Use and Management **5**(1).

van Ittersum M. K., Leffelaar P. A., van Keulen H., Kropff M. J., Bastiaans L., Goudriaan J. (2003). "On approaches and applications of the Wageningen crop models." European Journal of Agronomy **18**(3-4): 201-234.

van Lanen H. A. J., van Diepen C. A., Reinds G. J., de Koning G. H. J., Bulens J. D., Bregt A. K. (1992). "Physical land evaluation methods and GIS to explore the crop growth potential and its effects within the European Communities." Agricultural Systems **39**(3): 307-328.

Van Ranst E., Vanmechelen L., Thomasson A. J., Daroussin J., Hollis J. M., Jones R. J. A., Jamagne M., King D. (1995). Elaboration of an extended knowledge database to interpret the 1 :1,000,000 EU soil map for environmental purposes. Elaboration of an extended knowledge database to interpret the 1 :1,000,000 EU soil map for environmental purposes. D. King, R. J. A. Jones et A. J. Thomasson. Luxembourg, Office for Official Publications of the European Community**:** 286 p.

Vanotti M. B., Bundy L. G. (1994). "Corn nitrogen recommendations based on yield response data." Journal of Production Agriculture **7**(2).

Varian H. R. (2003). Introduction à la micro-économie.

Vold A. (1998). "A generalization of ordinary yield response functions." Ecological Modelling **108**(1/3).

von Liebig J. (1855). Die grundsätze der agricultur - chemie mit rücksicht auf die in England angestellten untersuchungen. Braunschweig, Friedrich Viewig und Sohn.

Vos J. (1999). "Split nitrogen application in potato: effects on accumulation of nitrogen and dry matter in the crop and on the soil nitrogen budget." Journal of Agricultural Science **133**(3).

Weir A. H., Bragg P. L., Porter J. R., Rayner J. H. (1984). "A winter wheat crop simulation model without water or nutrient limitations." Journal of Agricultural Science, UK **102**(2).

Westhoff P., Young R., II (2001). The status of FAPRI's EU modeling effort. Agricultural sector modelling and policy information systems. Proceedings of the 65th European Seminar of the European Association of Agricultural Economists (EAAE), Bonn, Germany, 29-31 March, 2000.

Whisler F. D., Acock B., Baker D. N., Fye R. E., Hodges H. F., Lambert J. R., Lemmon H. E., McKinion J. M., Reddy V. R. (1986). "Crop simulation models in agronomic systems." Advances in Agronomy **40**.

Wibe S. (1986). "Observable and Non-observable Data: A Reply [Engineering Production Functions--A Survey]." Economica **53**(212): 535-536.

Wibe S. A. (1984). "Engineering Production Functions: A Survey." Economica **51**(24): 401-411.

Willekens A., Van Orshoven J., Feyen J. (1998). Estimation of the phenological calendar , Kc-curve and temperature sums for cereals, sugar beet, potato, sunflower and rapeseed

across Pan Europe, Turkey, and the Maghreb countries by means of tansfer procedures. GfG-K.U. Leuven Research & Development. Leuven, Joint Research Center of the European Communities - Space Applications Institute - MARS Project**:** 60.

Williams J. R., Jones C. A., Dyke P. T. (1984). "A modeling approach to determining the relationship between erosion and soil productivity." Transactions of the ASAE (American Society of Agricultural Engineers) **27**(1).

Wolf W. (1995). SPEL system: Methodologiacl documentation (Rev.1), Vol.1: Basics, BS, SFSS. Theme 5 Series E. Luxembourg, Eurostat.

Wu J., Mapp H. P., Bernardo D. J. (1996). "Integrating economic and physical models for analysing water quality impacts of agricultural policies in the high plains." Review of Agricultural Economics **18**(3).

Young R., II, Westhoff P. W., Brown D. S., Adams G., Womack A. W. (1999). Modeling the world agrifood sector: the Food Agricultural Policy Research Institute Approach. The Agricultural Economics Society Annual Conference 1999, 28th March, Stranmillis University College, The Queen's University, Belfast.

Annexes

Liste des annexes

Annexe 1 Liste des Sigles et acronymes **242**
Annexe 2 Les OTE prises en compte par le modèle AROPAj **244**
Annexe 3 Méthodes utilisées pour renseigner les paramètres « sol » de STICS **245**
Annexe 4 Les groupes de précocité et variétés utilisées dans la modélisation STICS **248**
Annexe 5 Les engrais apportés par culture **251**
Annexe 6 Les effluents d'élevage **253**
Annexe 7 Résultats de l'analyse de sensibilité de la méthode de construction de la courbe au prix de l'engrais en Midi-Pyrénées **258**
Annexe 8 Les caractéristiques des sols attribués aux cultures par région **273**
Annexe 9 Validation des données climatiques produites par le modèle Arpège **276**

Annexe 1 Liste des Sigles et acronymes

ABIES	Agriculture Biologie Environnement Santé
ADEME	Agence De l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie
AOC	Appellation d'Origine Contrôlée
BES	Bureau Européen des Sols
CCR	Centre Commun de Recherches (JRC en anglais)
CEMAGREF	Centre d'Etudes sur le Machinisme Agricole et le Génie Rural des Eaux et Forêts
CETIOM	Centre Technique Interprofessionnel des Oléagineux Métropolitains
CGMS	Crop Growth Monitoring System
CIPAN	Cultures Intermédiaires Pièges à Nitrates
CIRAD	Centre de coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement
CLC	Corine Land Cover
CNRM	Centre National de Recherches Météorologiques
FADN	Farm Accountancy Data Network (RICA en français)
FAO	Food and Agriculture Organization of the United Nations
GES	Gaz à effet de serre
GHCN	Global Historical Climatology Network
GIEC	Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat (IPCC en anglais)
INA P-G	Institut National Agronomique Paris-Grignon
INN	Indice de Nutrition Azotée
INRA	Institut National de la Recherche Agronomique
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change (GIEC en français)
ISOP	Information et Suivi Objectif des Prairies
ITAB	Institut Technique de l'Agriculture Biologique
JRC	Joint Research Center (CCR en français)
LAI	Leaf Area Index
MAE	Mesure Agri-environnementale
MAPAQ	Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec
MARS	Monitoring Agriculture by Remote Sensing
MBS	Marge Brute Standard
MEGC	Modèle d'Equilibre général calculable
MEP	Modèle d'Equilibre Partiel
MNT	Modèle Numérique de Terrain
OCDE	Organisation de Coopération et de Développement Economiques
OMC	Organisation Mondiale du Commerce
OTE	Orientation Technico-Economique
PAC	Politique Agricole Commune
PAR	intercepted Photosynthetically Active Radiation
PL	Programmation Linéaire
PMP	Programmation Mathématique Positive
PMSB	Prime Spéciale aux Bovins Mâles

PMTVA	Prime au Maintien du Troupeau de Vaches Allaitantes
PRG	Pouvoir Radiatif Global
RICA	Réseau d'Information Comptable Agricole (FADN en anglais)
SAU	Surface Agricole Utile
SIG	Système(s) d'Information(s) Géographique(s)
SLA	Specific Leaf Area
SRES	Special Report on Emission Scenarios
UCS	Unités Cartographiques de Sols
UE	Union Européenne
UMR	Unité Mixte de Recherche
USDA	United States Department of Agriculture
UTS	Unités Typologiques de Sols
VA	Vache Allaitante
VL	Vache Laitière

Annexe 2 Les OTE prises en compte par le modèle AROPAj

N° OTE	Exploitations comprises par la classe
13	Exploitations spécialisées en **céréaliculture** et en **culture de plantes oléagineuses et protéagineuses**
14	Exploitations à **cultures générales** (spécialisées en culture de plantes sarclées, à culture de céréales et de plantes sarclées combinées, spécialisées en cultures de légumes frais de plein champ, à cultures générales diverses, spécialisées en culture de tabac, spécialisées en culture de coton, avec combinaison de diverses cultures générales)
6	Exploitations de **polyculture** (combinant horticulture et culture permanentes, combinant grandes cultures et horticulture, combinant grandes cultures et vignes, combinant grandes cultures et cultures permanentes, de polyculture à orientation cultures générales, de polyculture à orientation horticole ou cultures permanentes, de polyculture à orientation horticole, de polyculture à orientation cultures permanentes)
81	Exploitations **mixtes grandes cultures – herbivores** (mixtes grandes cultures avec bovins, mixtes bovins laitiers avec grandes cultures, mixtes grandes cultures avec herbivores autres que bovins laitiers, mixtes herbivores, autres que bovins laitiers, avec grandes cultures)
411	Exploitations **laitières spécialisées**
412	Exploitations **laitières spécialisées avec élevage bovin**
43	Exploitations **bovines spécialisées - orientation lait, élevage et viande combinés** (bovines - lait avec élevage et viande, bovines - élevage et viande avec lait)
42	Exploitations **bovines spécialisées - orientation élevage et viande** (bovines spécialisées - orientation élevage, bovines spécialisées -orientation engraissement)
71	Exploitations de **polyélevage à orientation herbivores** (de polyélevage à orientation laitière, de polyélevage à orientation herbivores autres que laitiers)
44	Exploitations avec **ovins, caprins et autres herbivores** (ovines spécialisées, avec ovins et bovins combinés, caprines spécialisées, d'herbivores sans activité dominante)
82	Exploitations **mixtes avec diverses combinaisons cultures – élevage** (mixtes avec grandes cultures et granivores, mixtes avec cultures permanentes et herbivores, avec diverses cultures et élevages mixtes, apicoles, mixtes diverses)
72	Exploitations de **polyélevage à orientation granivores** (de polyélevage : granivores et bovins laitiers combinés, de polyélevage : granivores et herbivores, autres que bovins laitiers, combinés, de polyélevage : granivores et élevage mixte)
5	Exploitations **spécialisées de production animale hors sol (granivores)** (porcines spécialisées, spécialisées porcins d'élevage, spécialisées porcins d'engraissement, combinant l'élevage et l'engraissement de porcins, avicoles spécialisées, spécialisées poules pondeuses, spécialisées volailles de chair, combinant poules pondeuses et volailles de chair, avec diverses combinaisons de granivores, combinant porcins et volailles, combinant porcins, volailles et autres granivores)

La limite en gras sépare les groupes appartenant aux OTE 13, 14 et 6 d'une part, qui sont considérés comme « cultivateur », et d'autre part, les autres qui sont plutôt des « éleveurs ».

Annexe 3 Méthodes utilisées pour renseigner les paramètres « sol » de STICS

A. Paramètres définis pour l'ensemble du sol

Paramètre STICS	Signification	Mode d'affectation
numsol	Numéro du sol	Numérotation créée
Typsol	type de sol	Nom du sol issu de la Base de données géographique des sols d'Europe
Argi	teneur en argile (après décarbonatation) de la couche de surface	Estimée par règle de pédotransfert (extension à l'Europe de la règle ISOP)
Norg	teneur en azote organique de la couche labourée (supposée constante sur la profondeur profhum)	Calcul effectué à partir de l'estimation réalisée par le CCR et la valeur de C/N issue de Batjes, 1996, ou Batjes, 2002 selon le nom du sol.
Profhum	profondeur maximale du sol sur laquelle se produit la minéralisation d'azote (max.60 cm)	Fixée à 30 cm
calc	teneur en $CaCO_3$ de la couche de surface	Estimée par règle de pédotransfert (extension à l'Europe de la règle ISOP)
pH	pH du mélange sol + amendement organique	Estimée par règle de pédotransfert (nouvelle règle créée pour la thèse)
concseuil	seuil minimal de concentration du sol en azote nitrique pour activation du lessivage	Quantité de nitrate soustraite au lessivage : ici toujours constante et égale à 0
albedo	albédo du sol nu sec	Estimée par règle de pédotransfert (extension à l'Europe de la règle ISOP) Sols « normaux » = 0.25, sols « clairs » = 0.3, sols « sombres » = 0.20 (D'après notice STICS)
Q0	paramètre d'évaporation en sol nu (fin de phase I)	Estimée par règle de pédotransfert (nouvelle règle créée pour la thèse) 1 classe supplémentaire par rapport à la bibliographie de la notice STICS : $0 <$ [% argile] ≤ 5 ou $45 <$ [% argile] ≤ 50 : Q0 = 6 $5 <$ [% argile] ≤ 25 ou $35 <$ [% argile] ≤ 45 : Q0 = 9 $25 <$ [% argile] ≤ 35 : Q0 = 12
ruisolnu	fraction de la pluie ruisselée (par rapport à la pluie totale) en conditions de sol nu	Constante = 0 car les parcelles ne sont pas considérées en pente
obstarac	profondeur de sol à laquelle apparaît un obstacle infranchissable à l'enracinement	Estimée par règle de pédotransfert obstarac correspond en général à la profondeur du sol mais pour certaines UTS, il existe un obstacle aux racines situé dans le profil (le sol continue donc au-delà de cet horizon). Dans ce cas,, on considère alors que l'horizon entre la profondeur d'obstacle aux racines et la profondeur du sol a une densité apparente de 1,8

codecailloux	option prise en compte des cailloux dans le bilan hydrique: oui (1), non (0)	Fixé à 1
codemacropor	option de simulation de la circulation d'eau dans la macroporosité des sols pour estimer l'excès d'eau et ruissellement par "débordement": oui (1), non (0)	Fixée à 1
codNH4	option de création d'un compartiment ammoniacal dans l'azote minéral du sol: oui (1), non (0)	Fixé à 0
codevolat	option d'activation du module de volatilisation de l'ammoniac: oui (1), non (0)	Fixé à 0
codefente	option création d'un compartiment supplémentaire dans le bilan hydrique pour les sols argileux gonflants: oui (1), non (0)	Estimée par règle de pédotransfert (nouvelle règle créée pour la thèse) Si vertisol, codefente = 1, sinon, codefente = 0
coderemontcap	code d'activation des remontées capillaires	Fixé à 0
codenitrif	option d'activation du calcul de la nitrification	Fixé à 0
capiljour	remontées capillaires journalières	Fixé à 0
humcapil	humidité minimale pour activation des remontées capillaires	Fixé à 0
codedrainage	option de prise en compte du drainage artificiel	Si l'UTS présente un aménagement de type drainage (donnée de la base de données des sols d'Europe), codedrainage = 1, sinon codedrainage = 0
profimper	profondeur de l'imperméable	Estimée par règle de pédotransfert (nouvelle règle créée pour la thèse) : n'est renseigné que s'il y a un drainage artificiel (codedrainage = 1)
ecartdrain	écartement entre drains	Si codedraiange = 1, ecartdrain = 1200 (données moyennes du CEMAGREF), sinon vaut 0
ksol	conductivité hydraulique à saturation pour le transport de l'eau vers les drains	Si codedraiange = 1, ksol = 30 (données moyennes du CEMAGREF), sinon vaut 0
profdrain	profondeur des drains	Si codedraiange = 1, profdrain = 90 (données moyennes du CEMAGREF), sinon vaut 0

B. Paramètres définis par horizon du sol

Paramètre STICS	Signification	Mode d'affectation
epc	épaisseur de chaque horizon de sol	Estimée par règle de pédotransfert (extension à l'Europe de la règle ISOP)
Hcc	humidité à la capacité au champ (terre fine)	Estimée par règle de pédotransfert (extension à l'Europe de la règle ISOP)
hmin	humidité au point de flétrissement permanent (terre fine)	Estimée par règle de pédotransfert (extension à l'Europe de la règle ISOP)
daf	densité apparente	Estimée par règle de pédotransfert (extension à l'Europe de la règle ISOP)
cailloux	teneur volumique en cailloux	Estimée par règle de pédotransfert (nouvelle règle créée pour la thèse)
typecailloux	type de cailloux parmi : 1 non poreux, 2 roche dure altérée, tendre peu alt., 3 roche dure peu altérée, 4 roche tendre altérée, 5 craie, 6 siltite altérée, 7 siltite peu alt., schiste alt., 8 schiste peu altéré, 9 concrétions ferriques, 10 Autres	Estimée par règle de pédotransfert (nouvelle règle créée pour la thèse) Cela a entraîné une modification du tableau hcccx du fichier param.par car la liste des types de cailloux a été modifiée par rapport à la liste par défaut du modèle STICS et présentent des valeurs d'humidité différentes.
infil	infiltrabilité à la base de l'horizon	Si l'horizon repose sur un horizon imperméable (profimper) il a une infiltrabilité de 0, pour les autres horizons, infil = 50
epd	épaisseur de mélange de l'azote (2×dispersivité)	Valeur fixée à 10

Annexe 4 Les groupes de précocité et variétés utilisées dans la modélisation STICS

Sont indiqués dans les tableaux ci-après :

- Les numéros de variétés/ groupe de précocité utilisés dans le texte et dans la modélisation,
- Le nom de la variété quand celui-ci existe,
- Le groupe de précocité (classe, code spécifique pour le maïs),
- Le nombre de jours vernalisants : JVC,
- Les durées en °J entre stades « STICS » : avec
  - Lev : levée
  - Amf : accélération maximale de la croissance (fin de phase juvénile)
  - Lax : LAI maximal
  - Sen : début de sénescence
  - Drp : début de remplissage des grains
  - Flo : floraison
  - Mat : maturité physiologique

- Les durées totales comptées en « stades reproducteurs » (Srepro) et « en stades végétatifs » (Sveg), et
- Le poids de mille grains (ou d'organes récoltés) à humidité donnée en gramme (ou unité précisée sinon)

A Le blé

N°	Nom	Précocité à montaison	Précocité à maturité	JVC	levamf	amflax	laxsen	senlan	Sveg	levdrp	drpmat	Srepro	PMG maxi (16%)
1	Arminda	tardive	tardive	55	275	375	675	212	1537	837	700	1537	46
5	Promentin	½ précoce	½ précoce	50	265	310	675	212	1462	762	700	1462	50
3	Thésée	½ précoce	½ précoce	38	255	290	675	212	1432	732	700	1432	38
4	Soissons	précoce	½ précoce	38	245	290	675	212	1422	722	700	1422	38
2	Talent	précoce	précoce	50	245	260	675	212	1392	692	700	1392	50
6	Sidéral	précoce	précoce	38	245	260	675	212	1392	692	700	1392	38

B Le blé dur

N°	Nom	Précocité à montaison	Précocité à maturité	JVC	levamf	amflax	laxsen	senlan	Sveg	levdrp	drpmat	Srepro	PMG maxi (16%)
4	Acalou	précoce	précoce	0	210	260	575	412	1457	657	800	1457	52
5	Ardente	très précoce	très précoce	0	210	260	575	412	1457	657	800	1457	52
6	Lloyd	½ précoce	½ précoce	0	230	275	575	412	1492	692	800	1492	52
3	Orjaune	½ tardive	½ précoce	25	230	275	575	412	1492	692	800	1492	48
2	Allur	½ tardive	½ précoce	29	230	275	575	412	1492	692	800	1492	48
10	Arcalis	½ tardive	½ tardive	29	230	275	575	412	1492	692	800	1492	55
1	Ambral	½ précoce	précoce	10	245	290	575	412	1522	722	800	1522	42
8	Artimon	½ précoce	précoce	0	245	290	575	412	1522	722	800	1522	56
7	Néodur	½ précoce	½ précoce	0	245	290	575	412	1522	722	800	1522	56
9	Nefer	½ précoce	½ précoce	0	255	310	575	412	1552	752	800	1552	56

C Le maïs

N°	code et groupe de précocité		variété référence limite de tardivité	durée semis-récolte (grain à 32 % humidité)	levamf	amflax	laxsen	senlan	levdrp	drpmat	flomat	flosen	PMG maxi (32%)
10	A0	Extrême précoce		< 1600 soit 1550	203	412	659	196	935	535	785	589	300
11	A	très précoce	DK 250 - 0.5%	1600 à 1680	219	444	690	207	983	577	827	620	300
1	B	précoce	DEA - 0.5 %	1680 à 1740	225	450	688	272	995	640	890	618	313
9	C1	demi-précoce C1	DEA + 2%	1740 à 1800	233	467	700	270	1020	650	900	630	313
4	C2	demi-précoce C2	Furio - 0.5 %	1800 à 1870	275	550	763	197	1145	640	890	693	330
5	D	demi-tardif	Etalon - 0.5 %	1870 à 1940	285	570	778	197	1175	655	905	708	330
7	E1	tardif	Cecilia	1940 à 2015	300	600	800	220	1220	700	950	730	348
12	E2	très tardif	Cecilia + 3%	2015 à 2090	299	606	819	250	1225	748	998	749	300
2	F	Extrême tardif 1		2090 à 2175	310	630	852	261	1260	793	1043	782	300
3	G	Extrême tardif 2		> 2175 soit 2200	327	663	865	265	1310	810	1060	795	300
6	H	Extrême tardif 3		> 2350 soit 2400	347	704	970	300	1370	950	1200	900	300

Les groupes de précocité du maïs ensilage sont identiques à ceux du maïs grain, seule la date de récolte change : la récolte se fait au stade « Sen » (début de sénescence).

D Le colza

N°	Nom	JVC	levamf	amflax	laxsen	senlan	Sveg	levdrp	drpmat	Srepro	PMG maxi (9%)
1	Goëland	60	100	650	300	700	1750	1000	760	1760	4.15

E Le tournesol

N°	Précocité	levamf	amflax	laxsen	senlan	Sveg	levdrp	drpmat	Srepro	PMG maxi (9%)
1	précoce	370	420	200	580	1570	990	580	1570	80
2	mi précoce	370	470	200	600	1640	1040	600	1640	80
3	tardive	370	530	200	600	1700	1100	600	1700	80

F La pomme de terre

N°	Nom	levamf	amflax	laxsen	senlan	Sveg	levdrp	drpmat	Srepro	PMG maxi (80%)
1	Bintje	150	700	500	500	1850	450	3300	3750	450 kg

G La betterave

N°	levamf	amflax	laxsen	senlan	Sveg	levdrp	drpmat	Srepro	PMG maxi (80%)
1	500	5000	5000	5000	15000	450	5000	5450	1260 kg

H Le pois

N°	Nom	levamf	amflax	laxsen	senlan	Sveg	levdrp	drpmat	Srepro	PMG maxi (45%)
1	Baccara	310	500	330	330	1470	850	410	1260	350

Annexe 5 Les engrais apportés par culture

Les combinaisons possibles des engrais apportés aux cultures en France sont présentées dans le tableau ci-dessous. Elles ont été établies à dires d'experts.

Cultures	Engrais en cours de culture (EC)				Engrais de fond (EF)				Part massique EC	Part massique EF
	Nom	part N	part P_2O_5	part K_2O	Nom	part N	part P_2O_5	part K_2O		
Blé tendre, blé dur, autres céréales	Ammonitrate 33.5	0.335	0	0	0 20 20	0	0.2	0.2	0.55	0.45
Orges, seigle, avoine	Ammonitrate 33.5	0.335	0	0	0 20 20	0	0.2	0.2	0.47	0.53
Pomme de terre	Ammonitrate 33.5	0.335	0	0	scories potassiques 10/20	0	0.1	0.2	0.31	0.69
	solution azotée	0.3	0	0	scories potassiques 10/21	0	0.1	0.2	0.33	0.67
Betterave à sucre	Ammonitrate 33.5	0.335	0	0	Super potassique 13/18	0	0.13	0.18	0.24	0.76
	solution azotée	0.3	0	0	Super potassique 13/19	0	0.13	0.18	0.27	0.73
	aucun	0	0	0	15 15 15	0.15	0.15	0.15	0	1
Colza	Ammonitrate 33.5	0.335	0	0	0 20 20	0	0.2	0.2	0.6	0.4
	solution azotée	0.3	0	0	0 20 20	0	0.2	0.2	0.63	0.37
Tournesol	Ammonitrate 33.5	0.335	0	0	15 15 15	0.15	0.15	0.15	0.31	0.69
Maïs	Ammonitrate 33.5	0.335	0	0	15 15 15	0.15	0.15	0.15	0.53	0.47
	solution azotée	0.3	0	0	15 15 15	0.15	0.15	0.15	0.56	0.44
	urée	0.46	0	0	15 15 15	0.15	0.15	0.15	0.45	0.55

Lorsque deux engrais azotés différents sont apportés au cours du cycle (cas du tournesol et du maïs) contenant de l'azote, on utilise l'efficience de l'engrais (*cf.* 1.1.2.b.vii)), qui tient compte des pertes gazeuses par dénitrification et volatilisation. En faisant l'hypothèse que l'on apporte 2 doses Q1 et Q2 respectivement des engrais E1 et E2 au cours du cycle, on cherche à se ramener à une dose totale équivalente de l'engrais E1 uniquement, on répartira

ensuite cette dose selon le fractionnement de la dose totale décidé pour la culture fertilisée (*cf.* 2.2.3.a.ii)).

2 Apports :

Q1 unités d'azote issues de l'engrais E1 d'efficacité e1
↓

Q2 unités d'azote issues de l'engrais E2 d'efficacité e2
↓

——>

On apporte une dose totale d'azote efficace pour la plante :

Q1.e1 + Q2.e2

Et on ne veut apporter que de l'engrais E1 (NB : dans le cas d'un apport d'engrais simple et d'engrais composé, on se ramènera toujours à l'engrais simple i.e. composé d'un seul élément fertilisant , c'est-à-dire l'azote dans ce cas précis).

On apporte donc deux doses d'azote issu de l'engrais E1 : Q1 et Q'1

Avec **Q'1 = Q2. e2/e1**

Au total on apporte donc une quantité Qt1 = quantité totale d'azote issue de E1 apportée sur tout le cycle cultural :

Qt1 = Q1+Q'1

Ensuite, la répartition de Qt1 se fait selon les règles de fractionnement habituel.

Au cas où la quantité **Qt1** ne soit **pas exactement égale** à l'une de celles **des cas prévus** (multiple de 10), on prendra la **quantité qui s'en rapproche le plus**.

Annexe 6 Les effluents d'élevage

A. Les « producteurs d'effluents définis à partir des activités de production animales d'AROPAj

Activités du modèle économique	catégorie de "producteur" d'effluent correspondante
va' veau 8j batterie acheté	veau allaitant
ve' veau 8j batterie issu de l'exploitation	veau allaitant
vg' veau boucherie 2 mois	veau allaitant
vm' veau "maigre 6-8 mois"	veau allaitant
vt' veau destiné taurillon	veau allaitant
vb' veau destiné boeuf	veau allaitant
nl' veau femelle "lait" non reporté	veau lait
nv' veau femelle "viande" non reporté	veau allaitant
fr' veau femelle reporté	veau lait
jt' veau acheté destiné taurillon	veau allaitant
jb' veau acheté destiné boeuf	veau allaitant
jl' veau femelle acheté "lait"	veau lait
jv' veau femelle acheté "viande"	veau allaitant
te' taurillon issu exploitation	taurillon 2.5 ans
ta' taurillon acheté	taurillon 2.5 ans
me' mâle 1 an issu exploitation destiné boeuf	mâle 1 an allaitant
ma' mâle 1 an acheté destiné boeuf	mâle 1 an allaitant
fl' femelle 1 an issue exploitation "lait"	génisse 1an lait
fv' femelle 1 an issue exploitation "viande"	génisse 1an allaitant
hl' femelle 1 an achetée "lait"	génisse 1an lait
hv' femelle 1 an achetée "viande"	génisse 1an allaitant
be' boeuf issu exploitation	VA
ba' boeuf acheté	VA
rl' génisse "lait"	génisse 3 ans lait
rv' génisse "viande"	génisse 3 ans allaitante
vl' vache laitière	VL
vv' vache "viande"	VA
veau vendu taurillon	veau allaitant
veau vendu boeuf	veau allaitant
veau femelle vendu "lait"	veau lait
veau femelle vendu "viande"	veau allaitant
mâle 1 an vendu destination boeuf	mâle 1 an allaitant
femelle 1 an vendue destination "lait"	génisse 1an lait
femelle 1 an vendue destination "viande"	génisse 1an allaitant
ov' ovins	ovin
cp' caprins	caprin
po' porcs	porc
vo' volailles	volaille

B. Les quantités produites par animal producteur et par an

Animal producteur	Catégorie d'effluent	quantité produite par animal par an	unité	Source des données
veau lait	fumier	2.58	t	Fertiliser avec les engrais de ferme[36] et proportion fumier/lisier (rapport Ministère de l'environnement[37])
	lisier	3.48	m^3	
génisse 1an lait	fumier	5.16	t	Fertiliser avec les engrais de ferme[36]et proportion fumier/lisier (rapport Ministère de l'environnement[37])
	lisier	6.96	m^3	
génisse 3 ans lait	fumier	10.32	t	Fertiliser avec les engrais de ferme[36]et proportion fumier/lisier (rapport Ministère de l'environnement[37])
	lisier	13.92	m^3	
VL	fumier	12.9	t	Fertiliser avec les engrais de ferme[36] (moyenne)
	lisier	17.4	m^3	
veau allaitant	fumier	2.07	t	Fertiliser avec les engrais de ferme[36]et proportion fumier/lisier (rapport Ministère de l'environnement[37])
	lisier	2.55	m^3	
mâle 1 an allaitant	fumier	3.105	t	Fertiliser avec les engrais de ferme[36]et proportion fumier/lisier (rapport Ministère de l'environnement[37])
	lisier	3.825	m^3	
génisse 1an allaitant	fumier	3.105	t	Fertiliser avec les engrais de ferme[36]et proportion fumier/lisier (rapport Ministère de l'environnement[37])
	lisier	3.825	m^3	
taurillon 2.5 ans	fumier	7	t	Fertiliser avec les engrais de ferme[36] (moyenne)
	lisier	5.3	m^3	
génisse 3 ans allaitante	fumier	8.28	t	Fertiliser avec les engrais de ferme[36]et proportion fumier/lisier (rapport Ministère de l'environnement[37])
	lisier	10.2	m^3	
VA	fumier	10.35	t	Fertiliser avec les engrais de ferme[36] (moyenne)
	lisier	12.75	m^3	
ovin	fumier	7.7	t	Guide des matières organiques[38]
caprin	fumier	1.64	t	Guide des matières organiques [38]
porc	fumier	1.35	t	Guide des matières organiques [38]
	lisier	3.4	m^3	
volaille	fumier	0.073	t	Guide des matières organiques [38]
	lisier	0.15	m^3	
	fientes sèches	0.07	t	

[36] Institut de l'élevage, ITAVI, ITCF, ITP, Eds. (2001). Fertiliser avec les engrais de ferme.)
[37] Biomasse Normandie (2002). Evaluation des quantités actuelles et futures des déchets épandus sur les sols agricoles et provenant de certaines activités - Lot 3 effluents d'élevage - Rapport Final. Ministère de l'écologie et du développement durable.

C. Les effluents types et leurs caractéristiques et paramètres STICS

									Paramètres STICS			
									C/N	teneur en carbone	teneur en azote minéral	teneur en eau
Type d'effluent	**Animaux producteurs concernés**	**MS**	**MO**	**C/N**	**N total**	**NH_4**	**P_2O_5**	**K_2O**	**C/N**	**Cres**	**Nminres**	**Eaures**
		% de produit brut	% de produit brut		(kg/t)	(kg/t)	(kg/t)	(kg/t)		% de la matière sèche	% de la matière fraîche	% de la matière fraîche
Fumier de veau	veau lait veau allaitant	**19**	**13**	**14**	**3.9**	*2.7*	**3.7**	**4**	14	28.7	0.27	81
Lisier de veau		**1.9**	**1**	**8**	**1**	**2.1**	**2.1**	**3.8**	8	42.1	0.21	98.1
Fumier VL	génisse 1an lait génisse 3 ans lait VL	**25**	**18**	**14**	**5.5**	**0.5**	**3.5**	**8**	14	30.8	0.05	75
Lisier VL		**12**	**5.5**	**8**	**5**	**2.5**	**2.5**	**6**	8	33.3	0.25	88
Fumier VA	mâle 1 an allaitant génisse 1an allaitant taurillon 2.5 ans génisse 3 ans allaitante VA	**24**	**15**	14	**3.9**	0.8	**3.7**	**4**	14	22.8	0.08	76
Lisier VA		**15**	**10.7**	8	**5.2**	**3.1**	**3.1**	**5**	8	27.7	0.31	85
Fumier ovin	Ovins	**30**	**23**	**23**	**6.7**	**1**	**4.2**	**11.2**	23	51.4	0.1	70
Fumier caprin	Caprins	45	36	*13*	6.1	**1**	5.2	7	13	17.6	0.1	55
Fumier porcin	Porcs	**21**	**16**	*13*	**6**	*7.4*	**6**	**4**	13	37.1	0.74	79
Lisier porcin		**8**	**6**	**8**	**5.1**	**3.2**	**5.5**	**2.6**	8	51	0.32	92
Fumier volailles	Volailles	**58**	**48**	**11**	**25.5**	**10.2**	**21.5**	**21**	11	48.4	1.02	42
Lisier volailles		**25.8**	**18.2**	*4*	**10.5**	**7.4**	**10.4**	**7.2**	4	16.3	0.74	74.2
Fientes sèches volailles		85	18	8	40	12	27	20	8	37.6	1.2	15

Sources :

en gras : Thierry Morvan : communication personnelle
en italique : site « La gestion des fumiers : solide ou liquide », Couture et Robert, 2000 http://www.centre-du-quebec.upa.qc.ca/engrais.asp?id_section=89
en souligné : Fertiliser avec les engrais de ferme (Institut de l'élevage *et al.*, 2001)
en normal : Comment conduire son colza pour valoriser les effluents d'élevage (brochure CETIOM, 2002), sauf pour les paramètres STICS recalculés

[38] Leclerc B. (1995). Guide des matières organiques. Paris.

D. Cas de l'épandage du stock d'effluents de type A sur la sole d'une ferme type

Soient :

Stock initial d'effluents A à épandre = E1

Stock d'effluents A restant à épandre après l'étape 1 : E2

Stock d'effluents A restant à épandre après l'étape 2 : E3

Stock d'effluents A restant à épandre après l'étape 3 : E4

Dose minimale épandable d'effluents A par hectare = dm

Dose maximale épandable d'effluents A par hectare = dM

Dose moyenne épandable d'effluents A par hectare = d

Surface des cultures prioritaires 1 vis-à-vis des effluents A = S1

Surface des cultures prioritaires 2 vis-à-vis des effluents A = S2

Surface des cultures prioritaires 3 vis-à-vis des effluents A = S3

Etape 1	**Si $E1 \geq dM \times S1$**	**Si $dm \times S1 \leq E1 \leq dM \times S1$**	**Si $dm \times S1 < E1$**
	alors on épand les effluents de type A à dose d sur l'ensemble de la surface S1. Il reste $E2 = E1 - d \times S1$ à épandre sur S2.	alors on épand les effluents de type A à dose E1/S1 sur l'ensemble de la surface S1. Il ne reste plus d'effluents de type A à épandre ailleurs.	alors on n'épand pas d'effluents de type A nulle part, il reste un stock E1 de ces effluents qu'on ne peut pas épandre sur les cultures de l'exploitation type.
	Passage à l'étape 2		
Etape 2	**Si $E2 \geq dM \times S2$**	**Si $dm \times S2 \leq E2 \leq dM \times S2$**	**Si $dm \times S2 < E2$**
	alors on épand les effluents de type A à dose d sur l'ensemble de la surface S2. Il reste $E3 = E2 - d \times S2$ à épandre sur S3.	alors on épand les effluents de type A à dose E2/S2 sur l'ensemble de la surface S2. Il ne reste plus d'effluents de type A à épandre ailleurs.	alors on n'épand pas d'effluents de type A nulle part, il reste un stock E2 de ces effluents qu'on ne peut pas épandre sur les cultures de l'exploitation type.
	Passage à l'étape 3		
Etape 3	**Si $E3 \geq dM \times S3$**	**Si $dm \times S3 \leq E3 \leq dM \times S3$**	**Si $dm \times S3 < E3$**
	alors on épand les effluents de type A à dose d sur l'ensemble de la surface S3. Il reste un stock $E4 = E3 - d \times S3$ à des effluents de type A qu'on ne peut pas épandre sur les cultures de l'exploitation type.	alors on épand les effluents de type A à dose E3/S3 sur l'ensemble de la surface S3. Il ne reste plus d'effluents de type A à épandre ailleurs.	alors on n'épand pas d'effluents de type A nulle part, il reste un stock E3 de ces effluents qu'on ne peut pas épandre sur les cultures de l'exploitation type.

E. Bilan phosphore et potassium pour les effluents d'élevage à l'échelle d'une ferme type

On considère que les exportations des cultures doivent être couvertes, si elles le sont par les apports d'effluents d'élevage, alors les engrais contenant phosphore et potassium ne sont pas apportés (*cf.* Annexe 5 : Les valeurs « part massique EC » et « par massique EF » passent respectivement à 1 et 0) : pour une exploitation type :

Si $\sum_j S_j r_j EP_j \leq \sum_{kl} N_k D_{kl} tP_{kl}$ ou si $\sum_j S_j r_j EK_j \leq \sum_{kl} N_k D_{kl} tK_{kl}$ alors on n'apporte pas de P_2O_5 ni de K_2O par les engrais synthétiques.

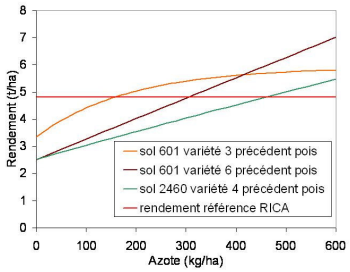
Avec
S_j : Surface de la culture j (en ha)
r_j : rendement de la culture j (en t/ha)
EP_j : exportations annuelles de phosphore de la culture j (en unités P_2O_5/t produite/ha) (*cf.* valeurs tableau ci-après)
EK_j : exportations annuelles de potassium de la culture j (en unités K_2O/t produite/ha) (*cf.* valeurs tableau ci-après)
N_k : nombre d'animaux de la catégorie k
D_{kl} : quantité de l'effluent l produit par l'animal de catégorie k par an (t)
tP_{kl} : teneur en phosphore de l'effluent l produit par l'animal de catégorie k
tK_{kl} : teneur en potassium de l'effluent l produit par l'animal de catégorie k

Sinon, on conserve un apport de P_2O_5 et de K_2O par les engrais synthétiques.

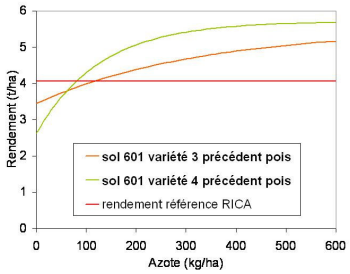
Activité végétale -culture	Exportations annuelles en P_2O_5 par tonne produite	Exportations annuelles en K_2O par tonne produite
Blé tendre	12	18
Blé dur	18	18
Orges	11	20
Avoine	11	20
Seigle	12	18
Maïs grain	7	5
Autres céréales (sorgho)	12	18
Betterave à sucre	1.8	8
Colza	15	10
Tournesol	13	8
Soja	14	35
Féverole- lupin	10.5	15.5
Pommes de terre	1.5	6
Pois protéagineux	8	8
Betteraves fourragères	1.8	8
Maïs ensilage	5.5	12.5
Praires temporaires	11	30
Prairies permanentes	6	22.5
Autres fourrages (luzerne)	7	30

Sources : Bases du logiciel Fermieu http://cra-mp.org/fermieu/fermieu_agronomie.php

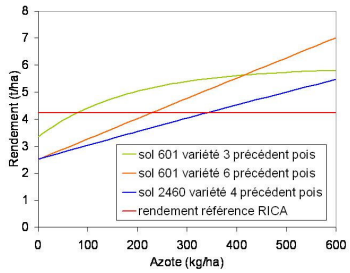
Annexe 7 Résultats de l'analyse de sensibilité de la méthode de construction de la courbe au prix de l'engrais en Midi-Pyrénées

Prix de l'engrais azoté	Sol	Groupe de précocité	Précédent cultural	A	B	t	N^0	Représentation graphique des courbes correspondantes
0.70 p_i	2460	4	légumineuse	2.527	29.21	0.000195	458.176	
0.75 p_i								
0.80 p_i								
0.85 p_i	601	3	légumineuse	3.349	5.91	0.00539	156.08	
0.90 p_i								
0.95 p_i								
p_i								
1.05 p_i	601	6	légumineuse	2.516	311.29	0.000024	304.23	
1.10 p_i								
1.15 p_i								
1.20 p_i								
1.25 p_i								
1.30 p_i								

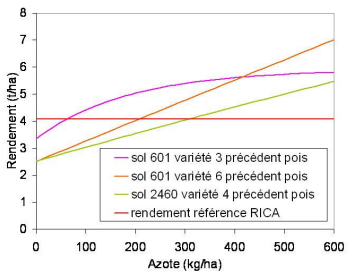
Blé tendre Midi-Pyrénées groupe type 15

Prix de l'engrais azoté	Sol	Groupe de précocité	Précédent cultural	A	B	t	N^0	Représentation graphique des courbes correspondantes
0.70 p_i	601	3	légumineuse	3.349	5.497	0.00539	117.11	
0.75 p_i								
0.80 p_i								
0.85 p_i								
0.90 p_i								
0.95 p_i								
p_i								
1.05 p_i								
1.10 p_i								
1.15 p_i								
1.20 p_i								
1.25 p_i	601	4	légumineuse	2.618	5.712	0.0078	80.49	
1.30 p_i								

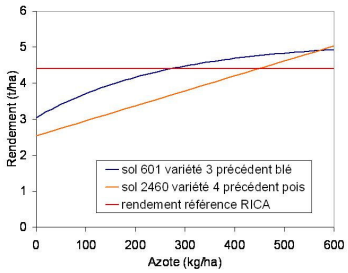
Blé Midi-Pyrénées groupe type 16

Prix de l'engrais azoté	Sol	Groupe de précocité	Précédent cultural	A	B	t	N^0	Représentation graphique des courbes correspondantes
0.70 p_i	2460	4	légumineuse	2.527	29.212	0.00019	341.377	
0.75 p_i								
0.80 p_i								
0.85 p_i								
0.90 p_i	601	6	légumineuse	2.516	311.295	0.000024	229.39	
0.95 p_i								
p_i								
1.05 p_i								
1.10 p_i								
1.15 p_i								
1.20 p_i	601	3	légumineuse	3.349	5.91	0.00539	79.78	
1.35 p_i								
1.30 p_i								

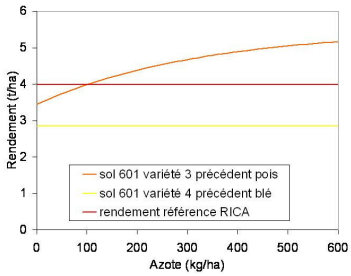
Blé Midi-Pyrénées groupe type 17

Prix de l'engrais azoté	Sol	Groupe de précocité	Précédent cultural	A	B	t	N^0	Représentation graphique des courbes correspondantes
0.70 p_i	2460	4	légumineuse	2.527	29.212	0.00019	308.52	
0.75 p_i								
0.80 p_i								
0.85 p_i								
0.90 p_i	601	6	légumineuse	2.516	311.295	0.000024	208.06	
0.95 p_i								
p_i								
1.05 p_i								
1.10 p_i								
1.15 p_i								
1.20 p_i								
1.35 p_i	601	3	légumineuse	3.349	5.91	0.00539	62.73	
1.30 p_i								

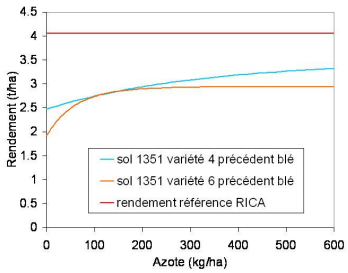
Blé Midi-Pyrénées groupe type 18

Prix de l'engrais azoté	Sol	Groupe de précocité	Précédent cultural	A	B	t	N^0	Représentation graphique des courbes correspondantes
0.70 p_i	601	3	blé	3.046	5.146	0.00381	270.95	
0.75 p_i								
0.80 p_i								
0.85 p_i	2460	4	légumineuse	2.539	477.76	0.000009	447.17	
0.90 p_i								
0.95 p_i								
p_i								
1.05 p_i								
1.10 p_i								
1.15 p_i								
1.20 p_i								
1.35 p_i								
1.30 p_i								

Blé Midi-Pyrénées groupe type 19

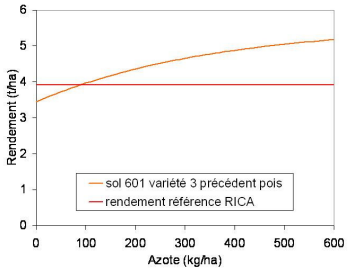
Prix de l'engrais azoté	Sol	Groupe de précocité	Précédent cultural	A	B	t	N^0	Représentation graphique des courbes correspondantes
0.70 p_i	601	4	blé					
0.75 p_i								
0.80 p_i	601	3	légumineuse	3.441	5.492	0.00274	111.7	
0.85 p_i								
0.90 p_i								
0.95 p_i								
p_i								
1.05 p_i								
1.10 p_i								
1.15 p_i								
1.20 p_i								
1.35 p_i								
1.30 p_i								

Blé Midi-Pyrénées groupe type 20

Prix de l'engrais azoté	Sol	Groupe de précocité	Précédent cultural	A	B	t	N^0	Représentation graphique des courbes correspondantes
0.70 p_i	1351	6	blé	1.924	2.937	0.01626		
0.75 p_i								
0.80 p_i								
0.85 p_i								
0.90 p_i								
0.95 p_i								
p_i								
1.05 p_i								
1.10 p_i	1351	4	blé	2.47	3.463	0.00321		
1.15 p_i								
1.20 p_i								
1.35 p_i								
1.30 p_i								

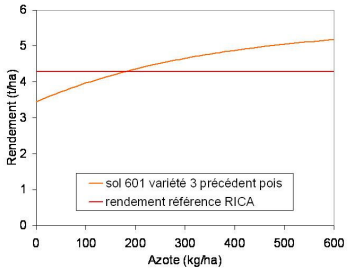
Blé Midi-Pyrénées groupe type 21

Prix de l'engrais azoté	Sol	Groupe de précocité	Précédent cultural	A	B	t	N^0	Représentation graphique des courbes correspondantes
0.70 p_i								
0.75 p_i								
0.80 p_i								
0.85 p_i								
0.90 p_i								
0.95 p_i								
p_i	601	3	légumineuse	3.445	5.569	0.00281	87.77	
1.05 p_i								
1.10 p_i								
1.15 p_i								
1.20 p_i								
1.35 p_i								
1.30 p_i								



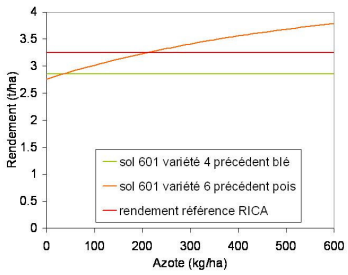
Blé Midi-Pyrénées groupe type 22

Prix de l'engrais azoté	Sol	Groupe de précocité	Précédent cultural	A	B	t	N^0	Représentation graphique des courbes correspondantes
0.70 p_i								
0.75 p_i								
0.80 p_i								
0.85 p_i								
0.90 p_i								
0.95 p_i								
p_i	601	3	légumineuse	3.445	5.569	0.00281	176.58	
1.05 p_i								
1.10 p_i								
1.15 p_i								
1.20 p_i								
1.35 p_i								
1.30 p_i								



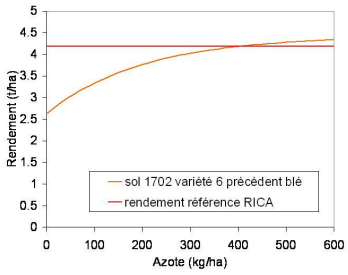
Blé Midi-Pyrénées groupe type 23

Prix de l'engrais azoté	Sol	Groupe de précocité	Précédent cultural	A	B	t	N^0	Représentation graphique des courbes correspondantes
0.70 p_i								
0.75 p_i	601	4	blé	2.854	0	0	Non défini	
0.80 p_i								
0.85 p_i								
0.90 p_i								
0.95 p_i								
p_i								
1.05 p_i	601	6	légumineuse	2.762	4.321	0.00179	207.78	
1.10 p_i								
1.15 p_i								
1.20 p_i								
1.35 p_i								
1.30 p_i								

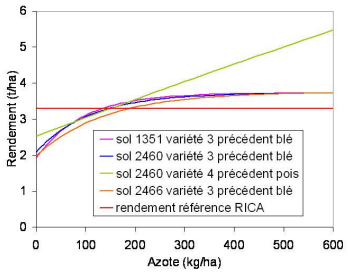


Blé Midi-Pyrénées groupe type 24

Prix de l'engrais azoté	Sol	Groupe de précocité	Précédent cultural	A	B	t	N^0	Représentation graphique des courbes correspondantes
0.70 p_i								
0.75 p_i								
0.80 p_i	1546	6	légumineuse					
0.85 p_i								
0.90 p_i								
0.95 p_i								
p_i								
1.05 p_i								
1.10 p_i								
1.15 p_i	1702	6	blé	2.627	4.424	0.00501	404.28	
1.20 p_i								
1.35 p_i								
1.30 p_i								

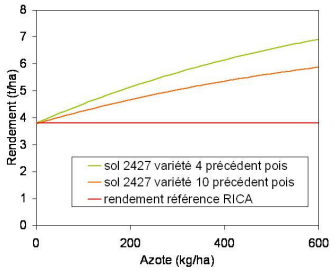


Blé Midi-Pyrénées groupe type 25

Prix de l'engrais azoté	Sol	Groupe de précocité	Précédent cultural	A	B	t	N^0	Représentation graphique des courbes correspondantes
0.70 p_i	2466	3	blé	1.979	3.755	0.00719	186.77	
0.75 p_i								
0.80 p_i								
0.85 p_i	2460	3	blé	2.09	3.731	0.00908	145.18	
0.90 p_i								
0.95 p_i								
p_i	1351	3	blé	1.918	3.73	0.01071	132.57	
1.05 p_i								
1.10 p_i								
1.15 p_i								
1.20 p_i	2460	4	légumineuse	2.527	29.21	0.00019	149.2	
1.35 p_i								
1.30 p_i								

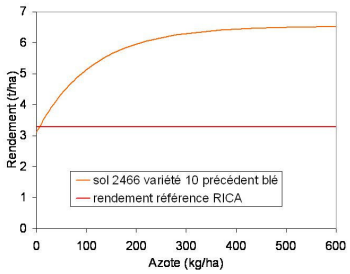
Blé Midi-Pyrénées groupe type 26

Prix de l'engrais azoté	Sol	Groupe de précocité	Précédent cultural	A	B	t	N^0	Représentation graphique des courbes correspondantes
0.70 p_i								
0.75 p_i								
0.80 p_i								
0.85 p_i								
0.90 p_i								
0.95 p_i	2427	10	légumineuse	3.779	7.582	0.00134	6.53	
p_i								
1.05 p_i								
1.10 p_i								
1.15 p_i								
1.20 p_i								
1.25 p_i								
1.30 p_i	2427	4	légumineuse	3.8	9.281	0.0014	1.578	



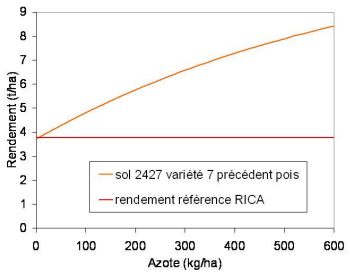
Blé dur Midi-Pyrénées groupe type 15

Prix de l'engrais azoté	Sol	Groupe de précocité	Précédent cultural	A	B	T	N^0	Représentation graphique des courbes correspondantes
0.70 p_i								
0.75 p_i								
0.80 p_i								
0.85 p_i								
0.90 p_i								
0.95 p_i								
p_i	2466	10	blé	3.109	6.534	0.00893	5.822	
1.05 p_i								
1.10 p_i								
1.15 p_i								
1.20 p_i								
1.35 p_i								
1.30 p_i								



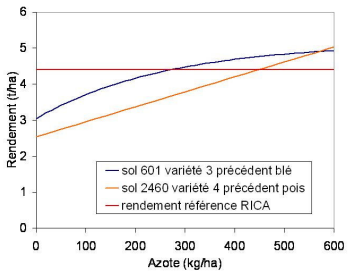
Blé dur Midi-Pyrénées groupe type 16

Prix de l'engrais azoté	Sol	Groupe de précocité	Précédent cultural	A	B	t	N_0	Représentation graphique des courbes correspondantes
0.70 p_i								
0.75 p_i								
0.80 p_i								
0.85 p_i								
0.90 p_i								
0.95 p_i								
p_i	2427	7	légumineuse	3.717	11.774	0.00146	3.85	
1.05 p_i								
1.10 p_i								
1.15 p_i								
1.20 p_i								
1.35 p_i								
1.30 p_i								



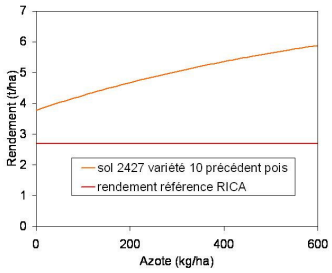
Blé dur Midi-Pyrénées groupe type 18

Prix de l'engrais azoté	Sol	Groupe de précocité	Précédent cultural	A	B	t	N^0	Représentation graphique des courbes correspondantes
0.70 p_i								
0.75 p_i								
0.80 p_i								
0.85 p_i								
0.90 p_i								
0.95 p_i								
p_i	2466	10	blé	2.962	6.91	0.00567	26.32	
1.05 p_i								
1.10 p_i								
1.15 p_i								
1.20 p_i								
1.35 p_i								
1.30 p_i								



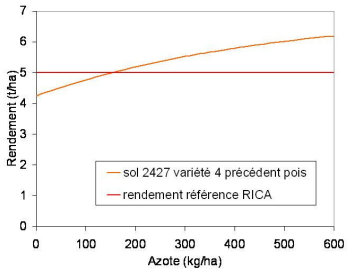
Blé dur Midi Pyrénées groupe type 19

Prix de l'engrais azoté	Sol	Groupe de précocité	Précédent cultural	A	B	t	N^0	Représentation graphique des courbes correspondantes
0.70 p_i								
0.75 p_i								
0.80 p_i								
0.85 p_i								
0.90 p_i								
0.95 p_i								
p_i	2427	10	légumineuse	3.779	7.582	0.00134	Non défini	
1.05 p_i								
1.10 p_i								
1.15 p_i								
1.20 p_i								
1.35 p_i								
1.30 p_i								

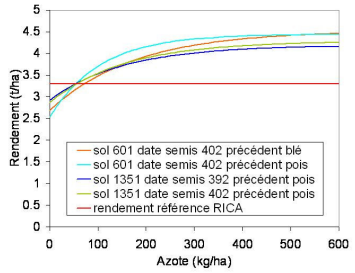


Blé dur Midi-Pyrénées groupe type 21 (la dose N^0 ne pouvant être négative, elle n'est pas définie, les apports organiques initiaux permettaient d'obtenir le rendement r^0)

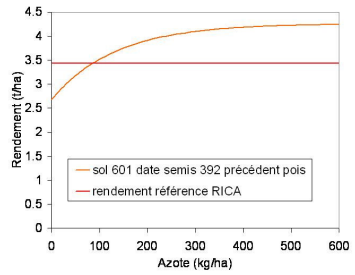
Prix de l'engrais azoté	Sol	Groupe de précocité	Précédent cultural	A	B	t	N^0	Représentation graphique des courbes correspondantes
0.70 p_i								
0.75 p_i								
0.80 p_i								
0.85 p_i								
0.90 p_i								
0.95 p_i								
p_i	2427	4	légumineuse	4.246	6.940	0.00214	153.56	
1.05 p_i								
1.10 p_i								
1.15 p_i								
1.20 p_i								
1.35 p_i								
1.30 p_i								



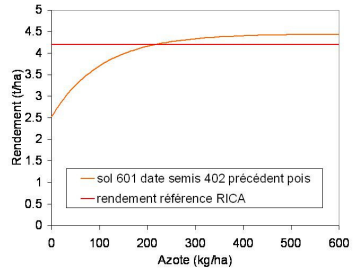
Blé dur Midi-Pyrénées groupe type 22

Prix de l'engrais azoté	Sol	Date de semis	Précédent cultural	A	B	t	N^0	Représentation graphique des courbes correspondantes
0.70 p_i	1351	392	légumineuse	2.926	4.188	0.00656	54.354	
0.75 p_i								
0.80 p_i	1351	402	légumineuse	2.868	4.282	0.00653	56.615	
0.85 p_i								
0.90 p_i	601	402	légumineuse	2.684	4.524	0.00569	72.3	
0.95 p_i								
p_i								
1.05 p_i								
1.10 p_i								
1.15 p_i								
1.20 p_i	601	402	légumineuse	2.531	4.443	0.009526	54.43	
1.25 p_i								
1.30 p_i								

Orge de printemps Midi-Pyrénées groupe type 15

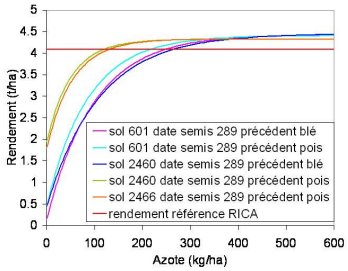
Prix de l'engrais azoté	Sol	Date de semis	Précédent cultural	A	B	t	N^0	Représentation graphique des courbes correspondantes
0.70 p_i	601	392	légumineuse	2.681	4.26	0.00756	84.982	
0.75 p_i								
0.80 p_i								
0.85 p_i								
0.90 p_i								
0.95 p_i								
p_i								
1.05 p_i								
1.10 p_i								
1.15 p_i								
1.20 p_i								
1.35 p_i								
1.30 p_i								

Orge de printemps Midi-Pyrénées groupe type 16

Prix de l'engrais azoté	Sol	Groupe de précocité	Précédent cultural	A	B	t	N^0	Représentation graphique des courbes correspondantes
0.70 p_i	601	402	légumineuse	2.531	4.444	0.00953	216.76	
0.75 p_i								
0.80 p_i								
0.85 p_i								
0.90 p_i								
0.95 p_i								
p_i								
1.05 p_i								
1.10 p_i								
1.15 p_i								
1.20 p_i								
1.35 p_i								
1.30 p_i								

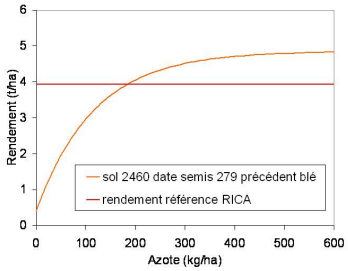
Orge de printemps Midi-Pyrénées groupe type 18

Prix de l'engrais azoté	Sol	Date de semis	Précédent cultural	A	B	t	N^0	Représentation graphique des courbes correspondantes
0.70 p_i								
0.75 p_i	2460	289	blé	0.4398	4.449	0.0091	263.5	
0.80 p_i								
0.85 p_i	601	289	blé	0.136	4.432	0.01016	247.33	
0.90 p_i	601	289	légumineuse	0.453	4.405	0.01162	216.04	
0.95 p_i								
p_i	2466	289	légumineuse	1.796	4.325	0.01822	129.14	
1.05 p_i								
1.10 p_i								
1.15 p_i								
1.20 p_i	2460	289	légumineuse	1.949	4.318	0.01952	118.57	
1.35 p_i								
1.30 p_i								



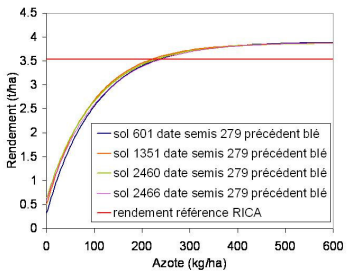
Orge d'hiver Midi-Pyrénées groupe type 19

Prix de l'engrais azoté	Sol	Groupe de précocité	Précédent cultural	A	B	t	N^0	Représentation graphique des courbes correspondantes
0.70 p_i								
0.75 p_i								
0.80 p_i								
0.85 p_i								
0.90 p_i								
0.95 p_i								
p_i	2460	279	blé	0.4042	4.853	0.00858	218.77	
1.05 p_i								
1.10 p_i								
1.15 p_i								
1.20 p_i								
1.35 p_i								
1.30 p_i								



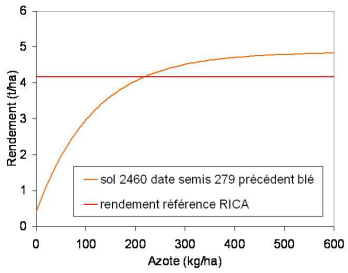
Orge d'hiver Midi-Pyrénées groupe type 20

Prix de l'engrais azoté	Sol	Date de semis	Précédent cultural	A	B	t	N^0	Représentation graphique des courbes correspondantes
0.70 p_i								
0.75 p_i	601	279	blé	0.317	3.89	0.00987	233.57	
0.80 p_i								
0.85 p_i	2466	279	blé	0.59	3.891	0.00932	238.78	
0.90 p_i	2460	279	blé	0.633	3.876	0.00982	229.29	
0.95 p_i								
p_i								
1.05 p_i								
1.10 p_i								
1.15 p_i	1351	279	blé	0.5	3.871	0.01044	220.67	
1.20 p_i								
1.35 p_i								
1.30 p_i								



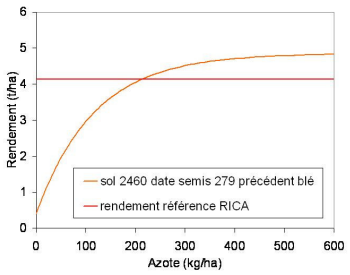
Orge d'hiver Midi-Pyrénées groupe type 21

Prix de l'engrais azoté	Sol	Date de semis	Précédent cultural	A	B	t	N^0	Représentation graphique des courbes correspondantes
0.70 p_i								
0.75 p_i								
0.80 p_i								
0.85 p_i								
0.90 p_i								
0.95 p_i								
p_i	2460	279	blé	0.404	4.853	0.00858	218.77	
1.05 p_i								
1.10 p_i								
1.15 p_i								
1.20 p_i								
1.35 p_i								
1.30 p_i								



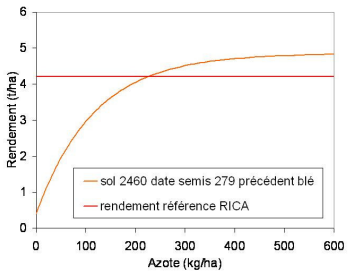
Orge d'hiver Midi-Pyrénées groupe type 22

Prix de l'engrais azoté	Sol	Groupe de précocité	Précédent cultural	A	B	t	N^0	Représentation graphique des courbes correspondantes
0.70 p_i								
0.75 p_i								
0.80 p_i								
0.85 p_i								
0.90 p_i								
0.95 p_i								
p_i	2460	279	blé	0.404	4.853	0.00858	213.71	
1.05 p_i								
1.10 p_i								
1.15 p_i								
1.20 p_i								
1.35 p_i								
1.30 p_i								



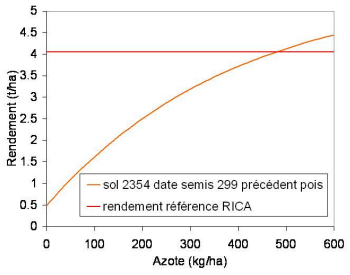
Orge d'hiver Midi-Pyrénées groupe type 23

Prix de l'engrais azoté	Sol	Date de semis	Précédent cultural	A	B	t	N^0	Représentation graphique des courbes correspondantes
0.70 p_i								
0.75 p_i								
0.80 p_i								
0.85 p_i								
0.90 p_i								
0.95 p_i								
p_i	2460	279	blé	0.404	4.853	0.00859	225	
1.05 p_i								
1.10 p_i								
1.15 p_i								
1.20 p_i								
1.35 p_i								
1.30 p_i								



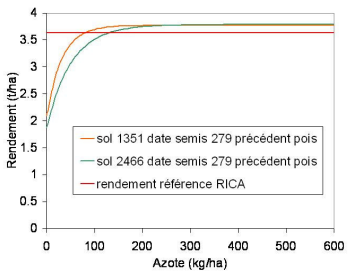
Orge d'hiver Midi-Pyrénées groupe type 24

Prix de l'engrais azoté	Sol	Date de semis	Précédent cultural	A	B	t	N^0	Représentation graphique des courbes correspondantes
0.70 p_i								
0.75 p_i								
0.80 p_i								
0.85 p_i								
0.90 p_i								
0.95 p_i								
p_i	2354	299	légumineuse	0.4848	5.551	0.00254	477.25	
1.05 p_i								
1.10 p_i								
1.15 p_i								
1.20 p_i								
1.35 p_i								
1.30 p_i								



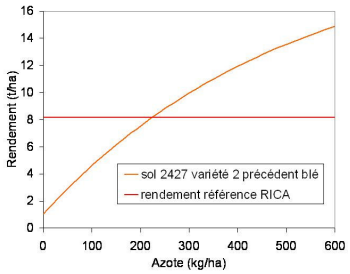
Orge d'hiver Midi-Pyrénées groupe type 25

Prix de l'engrais azoté	Sol	Groupe de précocité	Précédent cultural	A	B	t	N^0	Représentation graphique des courbes correspondantes
0.70 p_i								
0.75 p_i	2466	279	légumineuse	1.87	3.786	0.0194	130.25	
0.80 p_i								
0.85 p_i								
0.90 p_i								
0.95 p_i								
p_i								
1.05 p_i	1351	279	légumineuse	2.087	3.771	0.03119	80.33	
1.10 p_i								
1.15 p_i								
1.20 p_i								
1.35 p_i								
1.30 p_i								



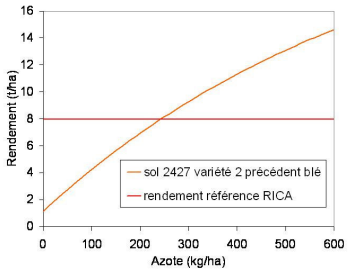
Orge d'hiver Midi-Pyrénées groupe type 26

Prix de l'engrais azoté	Sol	Groupe de précocité	Précédent cultural	A	B	t	N^0	Représentation graphique des courbes correspondantes
0.70 p_i								
0.75 p_i								
0.80 p_i								
0.85 p_i								
0.90 p_i								
0.95 p_i								
p_i	2427	2	blé	1.036	20.976	0.00198	223.34	
1.05 p_i								
1.10 p_i								
1.15 p_i								
1.20 p_i								
1.25 p_i								
1.30 p_i								



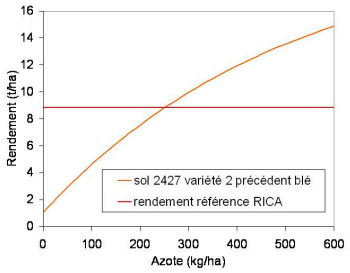
Maïs Midi-Pyrénées groupe type 15

Prix de l'engrais azoté	Sol	Groupe de précocité	Précédent cultural	A	B	t	N^0	Représentation graphique des courbes correspondantes
0.70 p_i								
0.75 p_i								
0.80 p_i								
0.85 p_i								
0.90 p_i								
0.95 p_i								
p_i	2427	2	blé	1.135	24.89	0.00140	242.64	
1.05 p_i								
1.10 p_i								
1.15 p_i								
1.20 p_i								
1.35 p_i								
1.30 p_i								



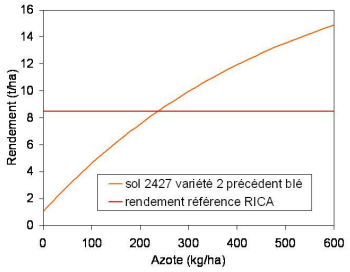
Maïs Midi-Pyrénées groupe type 16

Prix de l'engrais azoté	Sol	Groupe de précocité	Précédent cultural	A	B	t	N^0	Représentation graphique des courbes correspondantes
0.70 p_i								
0.75 p_i								
0.80 p_i								
0.85 p_i								
0.90 p_i								
0.95 p_i								
p_i	2427	2	blé	1.036	20.976	0.00198	250.36	
1.05 p_i								
1.10 p_i								
1.15 p_i								
1.20 p_i								
1.35 p_i								
1.30 p_i								

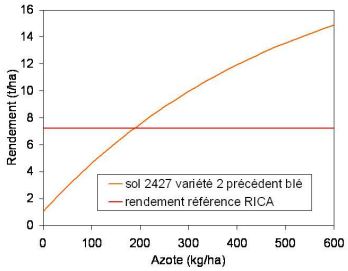


Maïs Midi-Pyrénées groupe type 17

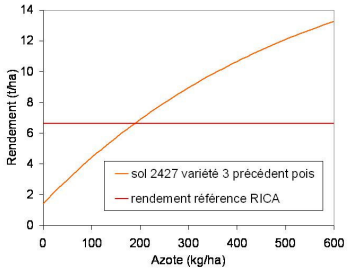
Prix de l'engrais azoté	Sol	Groupe de précocité	Précédent cultural	A	B	t	N^0	Représentation graphique des courbes correspondantes
0.70 p_i								
0.75 p_i								
0.80 p_i								
0.85 p_i								
0.90 p_i								
0.95 p_i								
p_i	2427	2	blé	1.036	20.976	0.00198	235.82	
1.05 p_i								
1.10 p_i								
1.15 p_i								
1.20 p_i								
1.35 p_i								
1.30 p_i								



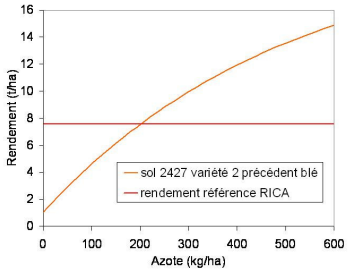
Maïs Midi-Pyrénées groupe type 18

Prix de l'engrais azoté	Sol	Groupe de précocité	Précédent cultural	A	B	t	N^0	Représentation graphique des courbes correspondantes
0.70 p_i								
0.75 p_i								
0.80 p_i								
0.85 p_i								
0.90 p_i								
0.95 p_i								
p_i	2427	2	blé	1.036	20.976	0.00198	69.16	
1.05 p_i								
1.10 p_i								
1.15 p_i								
1.20 p_i								
1.35 p_i								
1.30 p_i								

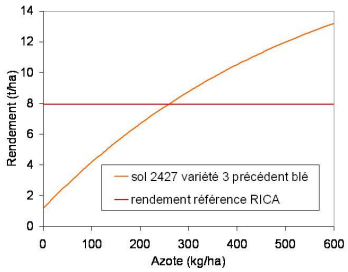
Maïs Midi-Pyrénées groupe type 19

Prix de l'engrais azoté	Sol	Groupe de précocité	Précédent cultural	A	B	t	N^0	Représentation graphique des courbes correspondantes
0.70 p_i								
0.75 p_i								
0.80 p_i								
0.85 p_i								
0.90 p_i								
0.95 p_i								
p_i	2427	3	légumineuse	1.424	19.105	0.00185	188.61	
1.05 p_i								
1.10 p_i								
1.15 p_i								
1.20 p_i								
1.35 p_i								
1.30 p_i								

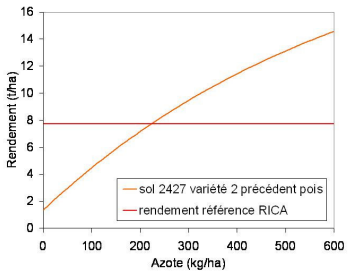
Maïs Midi-Pyrénées groupe type 20

Prix de l'engrais azoté	Sol	Groupe de précocité	Précédent cultural	A	B	t	N^0	Représentation graphique des courbes correspondantes
0.70 p_i								
0.75 p_i								
0.80 p_i								
0.85 p_i								
0.90 p_i								
0.95 p_i								
p_i	2427	2	blé	1.036	20.976	0.00198	200.69	
1.05 p_i								
1.10 p_i								
1.15 p_i								
1.20 p_i								
1.35 p_i								
1.30 p_i								

Maïs Midi-Pyrénées groupe type 21

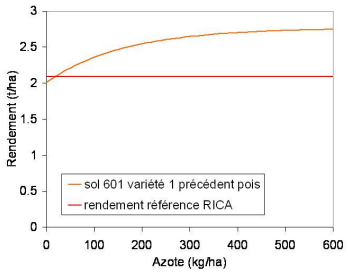
Prix de l'engrais azoté	Sol	Groupe de précocité	Précédent cultural	A	B	t	N^0	Représentation graphique des courbes correspondantes
0.70 p_i								
0.75 p_i								
0.80 p_i								
0.85 p_i								
0.90 p_i								
0.95 p_i								
p_i	2427	3	blé	1.184	19.443	0.00179	258.2	
1.05 p_i								
1.10 p_i								
1.15 p_i								
1.20 p_i								
1.35 p_i								
1.30 p_i								

Maïs Midi-Pyrénées groupe type 22

Prix de l'engrais azoté	Sol	Groupe de précocité	Précédent cultural	A	B	t	N^0	Représentation graphique des courbes correspondantes
0.70 p_i								
0.75 p_i								
0.80 p_i								
0.85 p_i								
0.90 p_i								
0.95 p_i								
p_i	2427	2	légumineuse	1.342	23.129	0.00156	222.89	
1.05 p_i								
1.10 p_i								
1.15 p_i								
1.20 p_i								
1.35 p_i								
1.30 p_i								

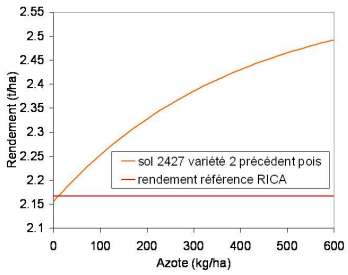
Maïs Midi-Pyrénées groupe type 23

Prix de l'engrais azoté	Sol	Groupe de précocité	Précédent cultural	A	B	t	N^0	Représentation graphique des courbes correspondantes
0.70 p_i								
0.75 p_i								
0.80 p_i								
0.85 p_i								
0.90 p_i								
0.95 p_i								
p_i	601	1	légumineuse	2.008	2.764	0.00625	18.645	
1.05 p_i								
1.10 p_i								
1.15 p_i								
1.20 p_i								
1.25 p_i								
1.30 p_i								



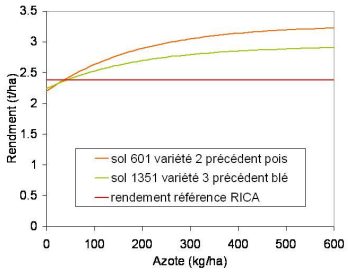
Tournesol Midi-Pyrénées groupe type 15

Prix de l'engrais azoté	Sol	Groupe de précocité	Précédent cultural	A	B	t	N^0	Représentation graphique des courbes correspondantes
0.70 p_i								
0.75 p_i								
0.80 p_i								
0.85 p_i								
0.90 p_i								
0.95 p_i								
p_i	2427	2	légumineuse	2.156	2.585	0.00256	9.728	
1.05 p_i								
1.10 p_i								
1.15 p_i								
1.20 p_i								
1.35 p_i								
1.30 p_i								



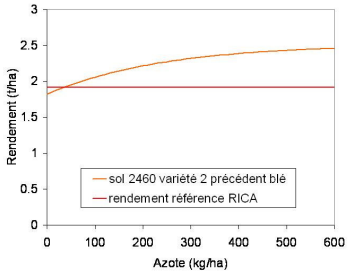
Tournesol Midi-Pyrénées groupe type 16

Prix de l'engrais azoté	Sol	Groupe de précocité	Précédent cultural	A	B	t	N^0	Représentation graphique des courbes correspondantes
0.70 p_i	1351	3	blé	2.238	2.93	0.00544	41.61	
0.75 p_i								
0.80 p_i								
0.85 p_i								
0.90 p_i								
0.95 p_i								
p_i	601	2	légumineuse	2.194	3.27	0.00525	35.66	
1.05 p_i								
1.10 p_i								
1.15 p_i								
1.20 p_i								
1.35 p_i								
1.30 p_i								



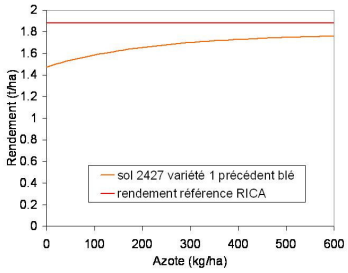
Tournesol Midi-Pyrénées groupe type 17

Prix de l'engrais azoté	Sol	Groupe de précocité	Précédent cultural	A	B	t	N^0	Représentation graphique des courbes correspondantes
0.70 p_i								
0.75 p_i								
0.80 p_i								
0.85 p_i								
0.90 p_i								
0.95 p_i								
p_i	2460	2	blé	1.822	2.519	0.00418	34.46	
1.05 p_i								
1.10 p_i								
1.15 p_i								
1.20 p_i								
1.35 p_i								
1.30 p_i								



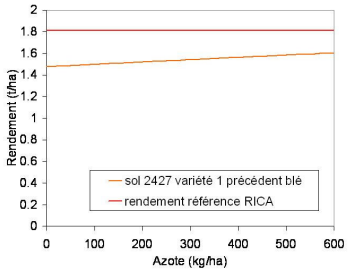
Tournesol Midi-Pyrénées groupe type 18

Prix de l'engrais azoté	Sol	Groupe de précocité	Précédent cultural	A	B	t	N^0	Représentation graphique des courbes correspondantes
0.70 p_i								
0.75 p_i								
0.80 p_i								
0.85 p_i								
0.90 p_i								
0.95 p_i								
p_i	2427	1	blé	1.473	1.778	0.00454	Non défini	
1.05 p_i								
1.10 p_i								
1.15 p_i								
1.20 p_i								
1.35 p_i								
1.30 p_i								



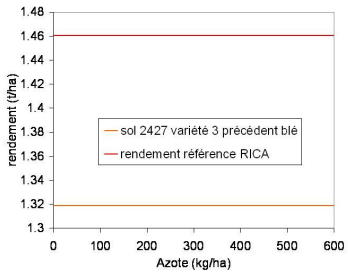
Tournesol Midi-Pyrénées groupe type 19

Prix de l'engrais azoté	Sol	Groupe de précocité	Précédent cultural	A	B	t	N^0	Représentation graphique des courbes correspondantes
0.70 p_i								
0.75 p_i								
0.80 p_i								
0.85 p_i								
0.90 p_i								
0.95 p_i								
p_i	2427	1	blé	1.475	3.378	0.000118	1647.35	
1.05 p_i								
1.10 p_i								
1.15 p_i								
1.20 p_i								
1.35 p_i								
1.30 p_i								

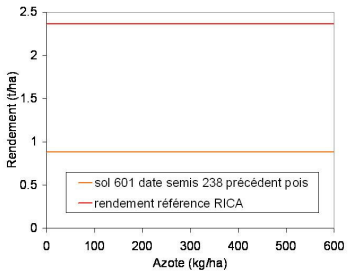


Tournesol Midi-Pyrénées groupe type 20

Prix de l'engrais azoté	Sol	Groupe de précocité	Précédent cultural	A	B	t	N^0	Représentation graphique des courbes correspondantes
0.70 p_i								
0.75 p_i								
0.80 p_i								
0.85 p_i								
0.90 p_i								
0.95 p_i								
p_i	2427	3	blé	1.319	1.319	0.05		
1.05 p_i								
1.10 p_i								
1.15 p_i								
1.20 p_i								
1.35 p_i								
1.30 p_i								



Tournesol Midi-Pyrénées groupe type 21 (Le rendement r^0 n'est pas atteint avec les seuls apports azotés de l'engrais, mais aussi grâce aux apports organiques)

Prix de l'engrais azoté	Sol	Date de semis	Précédent cultural	A	B	t	N^0	Représentation graphique des courbes correspondantes
0.70 p_i								
0.75 p_i								
0.80 p_i								
0.85 p_i								
0.90 p_i								
0.95 p_i								
p_i	601	238	légumineuse	0.8791	0	-2.58E-20	3.83E+19	
1.05 p_i								
1.10 p_i								
1.15 p_i								
1.20 p_i								
1.35 p_i								
1.30 p_i								

Colza Midi-Pyrénées groupe type 20

Annexe 8 Les caractéristiques des sols attribués aux cultures par région

Picardie

altitude	N° de sol	Nom générique (FAO)	Surface totale dans la région (km²)	Caractéristiques principales	Profondeur (en cm, somme de l'horizon le plus superficiel au plus profond)	Nombre d'horizons	Ph, texture, Norg (azote organique), teneur en calcaire et cailloux
1	1042	fluvisol eutrique	678.787	Sol alluvial profond argilo-limoneux	120 = 30+90	2	pH = 6.5 20% argile 0%calcaire Norg = 0.1
1	1974	cambisol calcaro-eutrique	664.388	Sol brun de profondeur moyenne, argilo-limoneux, caillouteux sur toute sa profondeur (craie)	80 = 30 +50	2	pH = 7 25% argile 2%calcaire Norg = 0.1 H1 et H2 : teneur en cailloux de 15 % type craie
1	1792	cambisol calcique	953.756	Sol brun de profondeur moyenne, argilo-limoneux, calcaire et basique, et caillouteux sur toute sa profondeur (calcaire)	70 = 30 + 40	2	pH = 8 20% argile 5%calcaire Norg = 0.2 H1 et H2 : teneur en cailloux de 20 % type calcaire
1	1969	luvisol orthique	3483.07	Sol lessivé profond, argilo-limoneux	140 = 30 +110	2	pH = 6.5 25% argile 0%calcaire Norg = 0.1
1	1820	rendzine orthique	2225.43	Rendzine superficielle et très calcaire et caillouteuse sur toute sa profondeur	50 =30 +20	2	pH = 7 20% argile 25%calcaire Norg = 0.2 H1 et H2 : teneur en cailloux de 20 % type calcaire

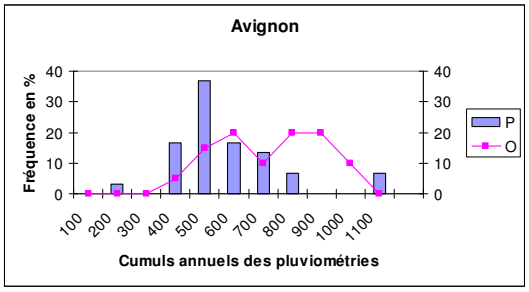
Midi-Pyrénées

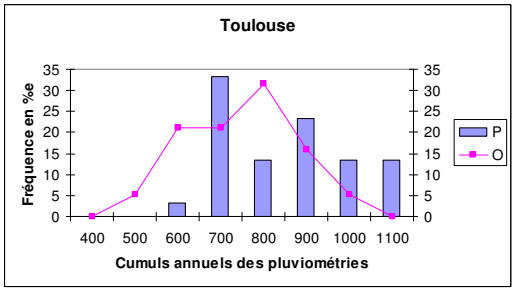
altitude	N° de sol	Nom générique (FAO)	Surface totale dans la région (km²)	Caractéristiques principales	Profondeur (en cm, somme de l'horizon le plus superficiel au plus profond)	Nombre d'horizons	Ph, texture, Norg (azote organique), teneur en calcaire et cailloux
1&2	601	podzoluvisol eutrique	2528.53	sol lessivé profond, limono argileux	110 = 30 + 20 + 60	3	pH = 5.5 20% argile 0% calcaire Norg = 0.05
1	1351	fluvisol fluvi-calcarique	926.531	Sol alluvial profond calcaire	110 = 30 + 80	2	pH = 20 20% argile 15% calcaire Norg = 0.14
1&2	2427	rendzine orthique	1510.01	Rendzine peu profonde et très calcaire et très argileuse, caillouteuse sur toute sa profondeur	30	1	pH =7 45% argile 40% calcaire Norg = 0.14 H1 et H2 : 20 % de cailloux type « roche dure peu altérée »
1&2	2460	cambisol calcique	2516.69	Sol brun calcaire,argileux, de profondeur moyenne	80 = 30 + 50	2	pH = 8 45% argile 5%calcaire Norg = 0.16
1&2	2466	cambisol calcique	1266.19	Sol brun calcaire,argileux, de profondeur moyenne	80 = 30 + 50	2	pH = 8 45% argile 10 % calcaire Norg = 0.16
2&3	1546	cambisol dystrique	1487.28	Sol brun acide, de profondeur moyenne, caillouteux sur toute sa profondeur	70 = 30 +40	2	pH = 5 20% argile 0% calcaire Norg = 0.2 H1 et H2 : teneur en cailloux de 15 % type « roche dure altérée ou roche tendre peu altérée »
3	474	cambisol dystrique	341.95	Sol brun acide, de profondeur moyenne	70 = 30 +40	2	pH = 5 9.5% argile 10 % calcaire

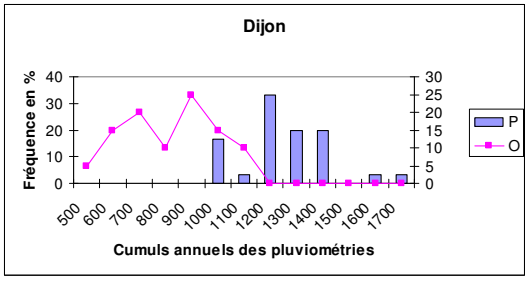
							Norg = 0.2
3	550	luvisol orthique	555.281	Sol lessivé, de profondeur moyenne	70 = 30 +40	2	pH =6.5 9.5% argile 0 % calcaire Norg = 0.2 H1 et H2 : teneur en cailloux de 20 % type « schiste peu altéré »
3	1702	luvisol orthique	637.406	Sol lessivé, argileux de profondeur moyenne	80 = 30 + 50	2	pH = 6.5 20% argile 0 % calcaire Norg = 0.2
3	2354	cambisol calcique	388.413	sol brun calcaire, argileux, superficiel et caillouteux sur toute sa profondeur	50 = 30+ 20	2	pH = 8 45% argile 5 % calcaire Norg = 0.12 H1 et H2 : teneur en cailloux de 20 % de cailloux type « roche dure peu altérée »

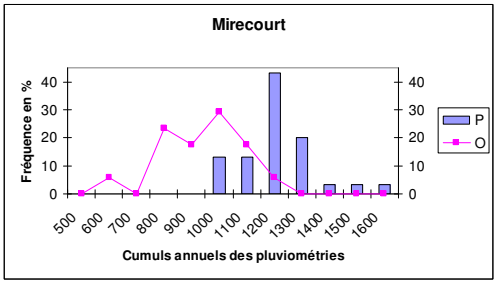
Annexe 9 Validation des données climatiques produites par le modèle Arpège

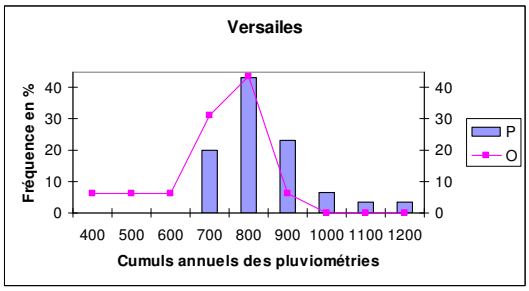
A. Distribution des cumuls annuels de pluviométrie pour les séries climatiques passées observées et passées simulées par le modèle Arpège

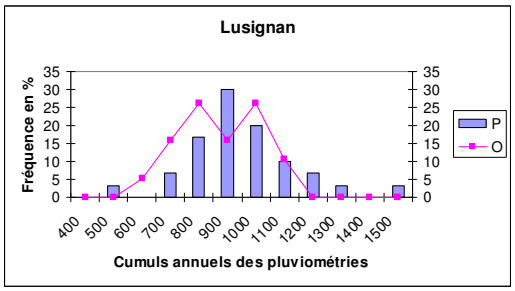


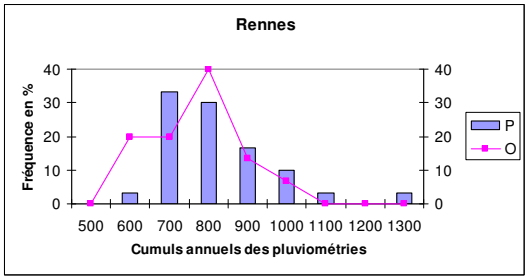








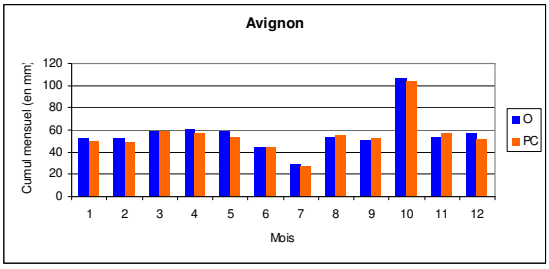


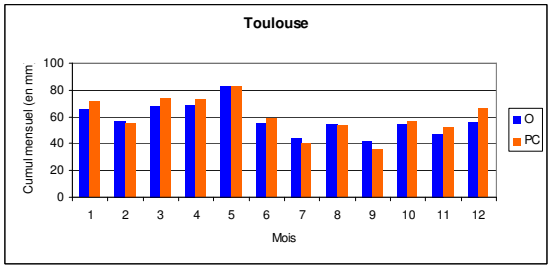


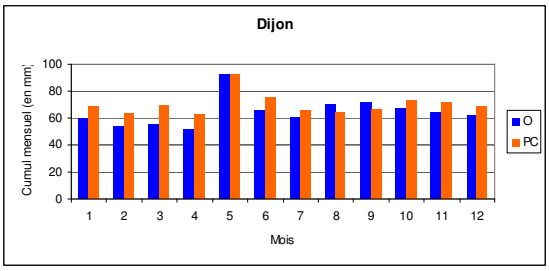
P = série passée simulée

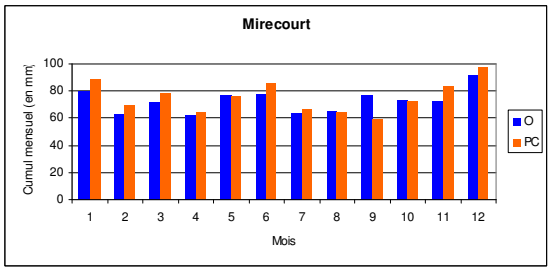
O = série passée observée

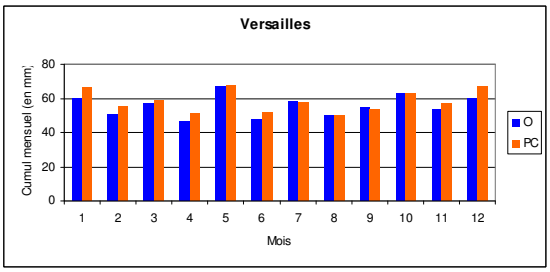
B. Comparaison des cumuls mensuels moyens de pluviométrie pour les séries passées observées et passées simulées corrigées

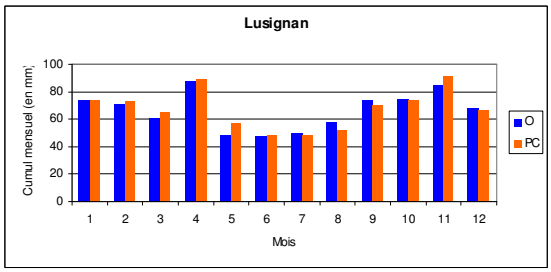


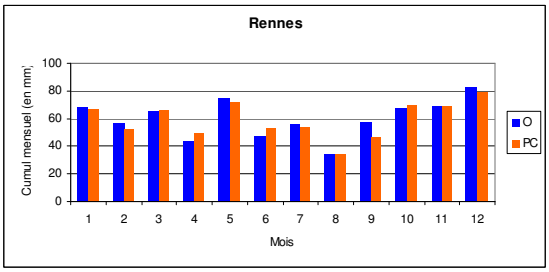








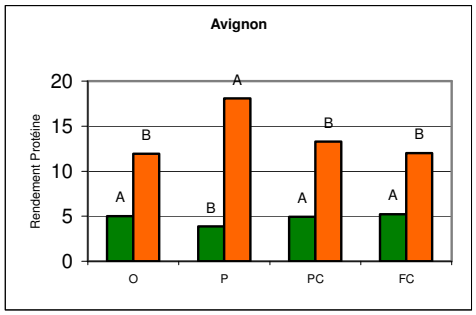


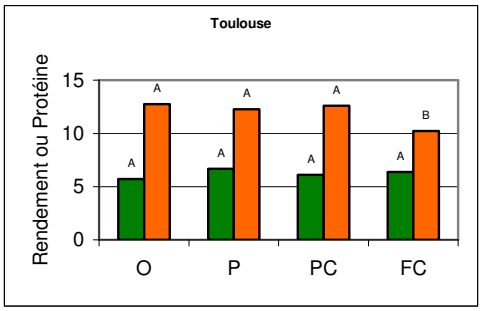


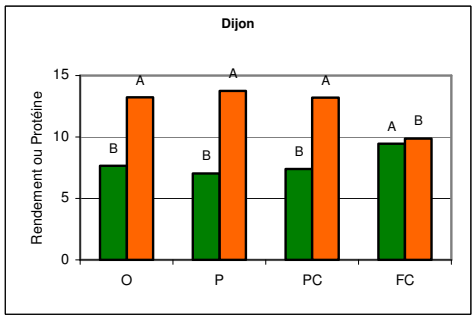
PC = série passée simulée corrigée

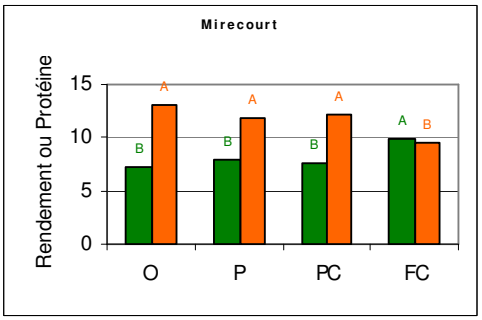
O = série passée observée

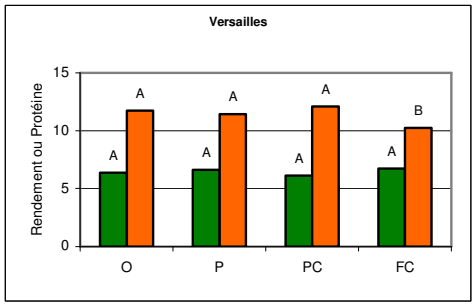
C. Comparaison des rendement et taux de protéines obtenus pour du blé tendre en conditions climatiques observées (O), passées (P), passées corrigées (PC) et futures corrigées (FC).

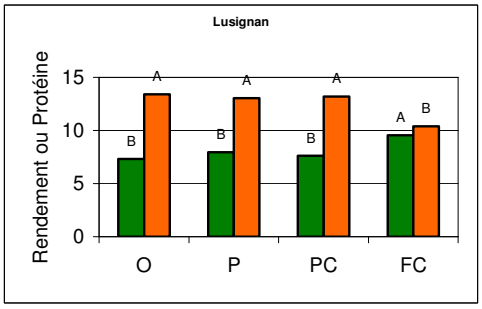


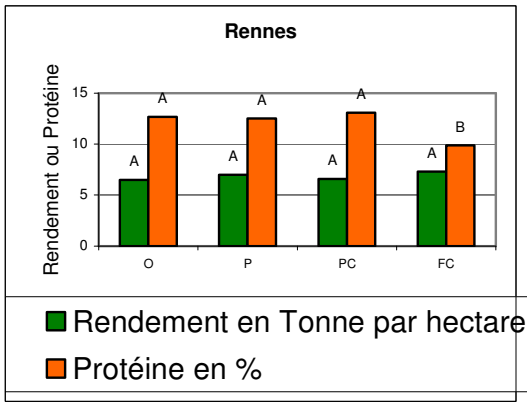












Les lettres indiquent des groupes de moyennes identiques pour chacune des variables rendement ou teneur en protéines.