



**HAL**  
open science

# Représentation et simulation des pratiques culturelles des agriculteurs à l'échelle régionale pour estimer la demande en eau d'irrigation

Laure Maton

► **To cite this version:**

Laure Maton. Représentation et simulation des pratiques culturelles des agriculteurs à l'échelle régionale pour estimer la demande en eau d'irrigation : Application à un bassin versant maïsicole du sud-ouest de la France. Ecosystèmes. Institut National Polytechnique (Toulouse), 2006. Français. NNT : 2006INPT025A . tel-04577930

**HAL Id: tel-04577930**

**<https://ut3-toulouseinp.hal.science/tel-04577930>**

Submitted on 16 May 2024

**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.

N° d'ordre :2353

## THESE

présentée

pour obtenir

**LE TITRE DE DOCTEUR DE L'INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE TOULOUSE**

École doctorale : SEVAB

Spécialité : Fonctionnement des écosystèmes et agrosystèmes

par Melle Laure Maton

Titre de la thèse      Représentation et simulation des pratiques culturales des agriculteurs à  
l'échelle régionale pour estimer la demande en eau d'irrigation  
*Application à un bassin versant maïsicole du sud-ouest de la France...*

Soutenue le 29 juin 2006

devant le jury composé de :

M.	Philippe Grieu	Président
MM.	Jean-Pierre Amigues	Directeur de thèse
	Delphine Burger-Leenhardt	Encadrante de thèse
	François Papy	Rapporteur
	Guillermo Flichman	Rapporteur
	Chantal Gascuel	Membre
	Jean-Daniel Rinaudo	Membre invité

## RESUME

Les pratiques culturelles sont un élément déterminant des prélèvements d'eau pour l'irrigation. Or ces pratiques sont elles-mêmes conditionnées par le contexte pédoclimatique et le contexte d'exploitation. Il est donc important pour la simulation de scénarios décrivant l'évolution du climat et des exploitations irrigantes de bien représenter ces pratiques au sein de modèles visant à estimer la demande régionale en eau d'irrigation à moyen terme. Tel est l'objectif de la thèse.

La démarche suivie durant la thèse est le résultat d'une double contrainte résultant de l'étendue considérée: (a) la représentation de la diversité des pratiques culturelles et (b) la simplification de cette diversité. Elle a consisté à (i) identifier la diversité des pratiques culturelles par confrontation de différents types de données (expertise, entretiens, calendriers culturels obtenus par enquêtes postales, pratiques recommandées), (ii) formaliser les pratiques sous forme de stratégies par analyses multivariées et classification ascendante hiérarchique et (iii) rechercher des indicateurs de leur distribution spatiale à travers différents types de déterminants facilement accessibles à l'échelle régionale. Il a été choisi de simplifier les processus représentés en se concentrant sur la culture ayant le plus d'influence sur la demande en eau (le maïs grain) et en étudiant deux interventions techniques (le semis, l'irrigation) et un choix technique (le choix de la précocité des variétés) au sein de l'itinéraire technique. Le terrain d'application est un bassin versant irrigué des coteaux de Gascogne au sein du système Neste. Les données sur les pratiques culturelles à l'origine du modèle ont été acquises entre 2000 et 2004.

A partir des résultats d'analyse des pratiques culturelles, un modèle permettant d'estimer les dates de semis, les précocités semées, les densités de semis et les surfaces semées pour le maïs une année au sein de la zone a été développé. L'estimation est stochastique et se fait en fonction de variables décrivant les systèmes de production et les conditions météorologiques de l'année. Couplé à un modèle bio-décisionnel pré-existant simulant la pratique de l'irrigation et le développement des plantes à l'échelle parcellaire, il permet l'estimation de la demande régionale en eau par agrégation des résultats obtenus pour chaque parcelle. Ce modèle a été évalué grâce aux données observées obtenues par une enquête postale réalisée en 2005. Les résultats de comparaison des données observées et simulées montrent que l'estimation de la demande en eau est correcte.

Par rapport aux modèles développés jusque là, ce modèle permet l'estimation de la variabilité de la demande en eau et ouvre des perspectives pour l'évaluation de scénarios prospectifs dans le cadre du changement de politique agricole commune et de l'évolution du climat. La représentation et la simulation des pratiques culturelles à l'échelle régionale réalisée pendant la thèse sont une contribution aux travaux de spatialisation des systèmes de culture.

## ABSTRACT

Agricultural practices are a key-element to determine the irrigation water requirements. These practices depend both on soil and climate and on the general context of the farm enterprise. If one wants to simulate the evolution of the irrigation water demand at a regional scale due to some modifications of climate or farm enterprise, it is then important to provide a correct representation of the agricultural practices within the simulation model. This is the main goal of the thesis.

Our approach is the result of two different questions linked to the spatial scale of the study: (a) how to represent the diversity of the agricultural practices, (b) how to simplify this diversity. Three steps have been followed: i) identification of the diversity of the agricultural practices using different sources of data (expertise, interviews, agricultural practices calendar from mail surveys, advisors proposition); ii) analyses of these data with multivariate analyses and hierarchical classifications in order to express strategies; iii) identification of key-determinants part of regional databases that may be used to provide a spatial representation of these strategies. Some simplifications have been made: to focus only on irrigated corn (main irrigated crop in surface and in volume in the study area), to analyse only sowing and irrigation practices as the two main practices within the crop management systems that build the irrigation water demand. The choice of corn precocity is also integrated in the analysis. The study area is a watershed in the Gascogne region part of the Neste system. Agricultural practices were gathered between 2000 and 2004.

From the results of the three previous steps, a model (SIMITKO) has been built that allows to estimate the sowing date, the choice of corn precocity, the sowing density and the area sown a given year. The model is stochastic and uses as input data some variables describing the production system and the climatic data of the given year. SIMITKO is linked to an existing biodecisional model (MODERATO) aimed at simulating corn irrigation strategies. This linkage provides an estimation of the regional water demand for irrigation through the aggregation of simulated demands at a plot scale. The model is evaluated on independent data obtained by a mail survey in 2005. Simulated and observed data are closed.

Contrarily of pre-existing models, our model allows to estimate the variability of the irrigation water demand at a regional scale and may be used to test CAP or climate modifications. This work is part of a more general question on how to give a spatial representation of cropping systems.

## **REMERCIEMENTS**

C'est plus de 10 mois après avoir soutenu ma thèse que je rédige enfin ces remerciements... La vie est ainsi faite, parfois.

Mes remerciements vont directement à Jacques-Eric Bergez et Delphine Burger-Leenhardt qui m'ont accompagnés durant ma période de thèse et qui, depuis, ont tout fait pour que le travail effectué donne naissance à des publications.

Merci Jacques-Eric pour ton regard scientifique à la fois pointu, critique et bienveillant, pour ton aide constructive (et toujours trop optimiste coté timing !) notamment à la rédaction des articles, à l'encadrement des stagiaires et pour ton aide infaillible et indispensable pour l'élaboration du modèle SIMITKO. Merci enfin pour ton soutien.

Merci Delphine pour ton courage d'avoir lancé ce sujet de thèse, à l'origine mi économie-mi agronomie, et d'y avoir cru jusqu'au bout malgré l'évolution constante, ou presque, de la problématique (du moins dans ma petite tête !). Merci pour ta rigueur scientifique, ta droiture et pour ta relecture efficace et toujours positive de la thèse.

Mes remerciements vont ensuite à Michel Goulard et Frédéric Garcia pour leur disponibilité pendant ces trois années et quelques...et pour leur aide méthodologique de grande qualité.

Merci à tous les quatre pour le bagage méthodologique que vous m'avez transmis au fil du temps, bagage que j'espère pouvoir entretenir...

Je remercie François Papy pour son rapport, fin, de la thèse et pour les trois discussions que nous avons eues au cours de la thèse ; elles ont été de véritables points de repères pour moi. Merci également à Guilherme Flichman, Chantal Gascuel et Jean-Daniel Rinaudo.

Je remercie les membres de mon comité de pilotage et en premier lieu mon directeur de thèse Jean-Pierre Amigues ainsi que Ramon Laplana, Marc Chedeville, Jean-Luc Trouvat, Alban Thomas et Philippe Grieu pour leurs conseils et leurs encouragements. Merci également aux membres de l'UMR AGIR alors en construction (aventure passionnante à suivre). Et merci enfin à Bernard Lacroix pour ses apports enrichissants sur le sujet.

Merci à la joyeuse bande de thésards (doctorants !) que j'espère continuer à fréquenter malgré nos parcours diversifiés thématiquement et surtout géographiquement. En particulier, merci à Estelle, Jane, Pauline, Marie et Anne Mottet.

Merci à la seconde joyeuse bande de l'aikido-pizza-artisansdumonde que je n'oublie pas, en particulier Pascal, Patrick, Pascal Magie et Fabrice.

Merci enfin à Vincent et Jacko, à mes amis et à Janine.

**ABREVIATIONS**

ACM	Analyse des Correspondances Multiples
ACP	Analyse en Composante Principale
ADAR	Agence de Développement Agricole et Rural
ADD	Agriculture et Développement Durable
AEAG	Agence de l'Eau Adour-Garonne
AEP	Alimentation en Eau Potable
AGPM	Association Générale des Producteurs de Maïs
ASA	Association Syndicale Autorisée
ASG	Astarac du Gers
ASY	Astarac des Hautes-Pyrénées
BIG	Coteaux de Bigorre
CACG	Compagnie d'Aménagement des Côteaux de Gascogne
CAH	Classifications Ascendantes Hiérarchiques
CART	Arbre de classification et de régression
CUMA	Coopérative d'Utilisation du Matériel Agricole
DAA	Diplôme d'Agronomie Approfondie
DC	Débit de Crise
DCE	Directive Cadre Européenne
DOE	Débit Objectif d'Etiage
DRAF	Direction Régionale de l'Agriculture et de la Forêt
EDF	Electricité de France
ENFA	Ecole Nationale de Formation Agronomique
ENSAT	Ecole Nationale Supérieure d'Agronomie de Toulouse
GAS	Coteaux de Gascogne
GC	Grandes Cultures
HARM	Haut Armagnac
INRA	Institut National de la Recherche Agronomique
MISE	Mission InterService de l'Eau
OAS	Organisme d'Approvisionnement et de Stockage
OTEX	Orientation Technico-Economique des eXploitations
PAC	Politique Agricole Commune
PE	Polyculture Elevage
PGE	Plan de Gestion des étiages
PRA	Petite Région Agricole
RGA	Recensement général agricole
SAGE	Schéma d'Aménagement et de Gestion des Eaux
SAR	Société d'Aménagement Régional
SAU	Surface Agricole Utile
SDAGE	Schéma Directeur d'Aménagement et de Gestion des Eaux
SI	Surface Irriguée

## LISTE DES FIGURES

Figure 1: Représentation schématique du modèle à développer (1)	19
Figure 2 : Présentation des décisions stratégiques et tactiques d'un irrigant	22
Figure 3 : Représentation schématique du modèle (2) et présentation de deux questions méthodologiques	24
Figure 4 : Représentation schématique du modèle (3)	30
Figure 5: Répartition des cultures irriguées en France en 2000.	34
Figure 6 : L'itinéraire technique maïsicole (source : Arvalis). Nb : les pratiques culturales analysées dans ma thèse sont entourées.	35
Figure 7: Les principales étapes de la thèse.	37
Figure 8: Localisation de la zone de la Baïse Amont en France et au sein du système NESTE.	40
Figure 9: Pluviométrie annuelle de 1961 à 1999 (Auch (32)).	41
Figure 10: Pluviométrie mensuelle (moyenne, max, min) sur une série climatique de 39 ans (Auch(32)).	42
Figure 11: Présentation du découpage communal de la zone et des petites régions agricoles (PRA)	43
Figure 12: Probabilités de passage d'une culture (ou groupe de cultures) à une autre.	43
Figure 13: Les enquêtes menées et ou analysées pendant la thèse	46
Figure 14: Représentation des différents niveaux des variables explicatives de la distribution des pratiques culturales explorées	51
Figure 15: General diagram of the analysis approach. PCA: Principal Component Analysis; HAC: Hierarchical Ascendant Classification; MCA: Multiple Correspondences Analysis; Lm: Linear model; Glm: Generalised linear modelling; CART: Classification and Regression.	60
Figure 16: Histograms of the irrigation strategy variables. X-axis represents the different classes (either discrete or continuous, see main text for description), Y-axis represent the proportion over the surveyed population. For the modalities of the variable REA (Reaction in the event of rainfall), see Tableau 4	64
Figure 17 : Projection of the individuals on the first two factors from the MCA on the irrigation variables (factor 1 in X-axis and factor 2 in Y-axis). "1" and "2" means that individuals belong to IS1 and IS2 respectively.	66
Figure 18 : Plot of first factorial plane (f1*f2) of irrigation strategies groups (IS1, IS2) and farming sub-systems. Sub-systems linked to Irrigation Strategy 2 (IS2) are underlined (link shown by an arrow); TIC1, TIC2 and ES1 closed to IS1 are the only well represented variables.	67
Figure 19: Results from the optimal classification tree. Depending on their Production System (PS), Equipment System (ES) and Theoretical Irrigation Capacity (TIC), farmers belong to a given class of Irrigation Strategy (IS). For example, if farmer belongs to PS2, PS7 or PS8 and then, if its TIC is adequate (TIC2) or more than adequate (TIC3), the farmer use the irrigation strategy IS2 with a probability of 57%.	67
Figure 20 : Présentation des différences physiologiques (besoins en sommes de degrés jours des différentes phases du développement de la plante et niveau de besoin en eau) entre une variété précoce et une variété tardive (d'après Girardin P. 1998. Ecophysiologie du maïs.)	73
Figure 21 : Présentation de la zone d'étude (schématisée par le cadre rectangulaire). Les limites des PRA sont représentées par des lignes continues, le zonage climatique (pluviométrie et températures) par des traits discontinus.	75
Figure 22 : Pluviométrie mensuelle (moyenne, maximale et minimale) d'une série climatique de 39 ans pour les mois de mars, avril, mai et juin (station d'Auch, 32 – 1961 à 1999)	76
Figure 23 : Comparaison des pourcentages de surface (ha) pour chaque type de précocité pour les données d'enquête postale et les données du listing de vente d'une des coopératives	80
Figure 24: Pluviométrie décadaire en 2000 et 2001 de la 3ème décennie de mars à la 2ème décennie de juin.	82
Figure 25: Besoins en sommes de température des variétés semées en fonction des dates de semis a : échantillon 2000 b : échantillon 2001. Les dates où 20 et 80% des surfaces sont semées sont données par la distribution cumulée des semis, présentée pour chaque année dans les encadrés	83
Figure 26 : Part des différentes précocités en 2000 et 2001 (données enquêtes postales)	84
Figure 27: Pourcentage (ha) de chaque groupe de précocité dans les 5 PRA classées du nord au sud (données 2000 et 2001)	85
Figure 28: Présentation des zonages obtenus par analyse (a) des précocités majoritaires (c) des dates où 50% de la surface est semée, (d) du décalage de vitesse de semis entre boubène et terrefort, (e) du nombre de précocité au sein des exploitations et (f) des dynamiques de semis	87
Figure 29 : Comparaison du nombre de jours estimé à partir des données de SIMSEM et du nombre de jours observé (déclaré par les agriculteurs dans l'enquête postale 2000)	92
Figure 30: Comparaison des données des agriculteurs ayant répondu en 2000 et 2001 : les dates de démarrage des semis	93

Figure 31: Comparaison des données des agriculteurs ayant répondu en 2000 et 2001 : les surface de maïs grain	93
Figure 32: Localisation de la zone d'étude en France et présentation du découpage communal, des petites régions agricoles (PRA) et du maillage en point de grille (avec les numéros des points de grille)	99
Figure 33: Coupes géomorphologiques schématique (Penalver et Longueval, 1999)	100
Figure 34: Pluie décadaire de janvier à juin en 2003 et 2004 dans la zone de la Baise. ( Point de grille 26 : latitude : 43.75°, longitude : 0.25°)	101
Figure 35 : Présentation des étapes de la démarche	103
Figure 36: (a) Disposition des points de grille 23 à 28 au sein de la zone ; (b) Evolution moyenne sur 4 ans (1998, 2000, 2001, 2003) entre les jours juliens 80 (21 ou 22 mars) et 183 (2 ou 3 juillet) , (b) de la température journalière pour chacun de ces points de grille et (c) du pourcentage cumulé du nombre de jours disponibles.	107
Figure 37: Cumul des jours disponibles en 2003 à partir du jour julien 55 (24 février) pour les points de grille 24 à 27	108
Figure 38 : Distribution des groupes de précocité (% ha) dans chaque PRA en 2003 d'après les enquêtes postales. Les quatre PRA situées sur un axe Nord-sud sont encadrées. La PRA GAS est située plus à l'est. Les groupes de précocités s'échelonnent de E2 à B : E2( très tardif), E1 (tardif), D (demi-tardif), C (demi-précoce), B (précoce).	109
Figure 39: distribution du nombre d'agriculteurs démarrant le semis en fonction de la date selon le type de sol présent dans la sole de maïs grain (terrefort, boubène, terrefort et boubène)	110
Figure 40: distribution du nombre d'agriculteurs démarrant le semis en fonction de la date selon la localisation de la sole de maïs grain (coteaux, vallée, dans les deux zones)	111
Figure 41 : Répartition des parcelles de maïs grain entre les quatre associations type de sol*localisation	112
Figure 42 : Répartition des groupes de précocités (a) dans les zones de vallée ou de coteaux et (b) sur les sols terrefort ou boubène.	113
Figure 43 : Répartition des surfaces de chaque groupe de précocité selon les ensembles type de sol*localisation	114
Figure 44: dynamique des semis en zone de coteaux et de vallée (sud ASG, ASY)	114
Figure 46: les étapes de construction de la typologie de stratégies de semis et de choix de précocité	117
Figure 47 : Arbre de classification permettant de déterminer la distribution des trois classes de stratégies de semis et de choix de précocité	121
Figure 48: Arbre de classification complet (Breiman et al., 1984) obtenu à partir de : « Classes de débit= f(PRA+SAU+ surface de maïs+rendement objectif+ type d'atelier d'élevage+main d'oeuvre+organisation du chantier+type de semoir+vitesse de semis +travail de nuit ou non) ». Classes de débit de chantier : 1 : 7-9 ha/j ; 2 : 10-12 ha/j ; 3 : 15-16 ha/j ; 4 : 20 ha/j.	122
Figure 49 : Représentation schématique des deux parties du modèle	135
Figure 50 : Présentation de l'enchaînement des modules M1, M2, M3 et M4 dans SIMITKO pour un agriculteur ou exploitation-type « a » et une répétition.	136
Figure 51: Mise en correspondance des dates de semis et de SWC(j)/SWCx pour un sol et une année donnée dans une PRA	141
Figure 52: Distribution des dates de démarrage par quinzaine pour la PRA HARM en 2000, 2001 et 2003	142
Figure 53: Arbre de classification des groupes de jours juliens correspondant aux dates de démarrage et résultat de la validation croisée	143
Figure 54: Histogrammes des variables décrivant la stratégie de choix de précocité et de semis. L'axe des abscisses représente les modalités des variables (Tableau 22) et l'axe des ordonnées représente le nombre d'individus parmi la population de maïsiculteurs irrigants enquêtés en 2003.	149
Figure 55 : (a) Distribution des volumes d'eau pour chaque simulation et (b) distribution des volumes d'eau demandés (pour 2500 répétitions)	154
Figure 56: Dynamique de la demande en eau. Pour chaque décade, la distribution des volumes d'eau demandés est présentées (. : maximum, 8 : huitième quintile, M : moyenne, m : médiane, 2 : deuxième quintile, o : minimum	155
Figure 57: Distribution spatiale du volume total demandé, et des volumes demandés à la première décade d'août et la première décade de juillet.	156
Figure 58: Distribution en fonction du nombre de quadruplets (colonne de gauche) et du nombre de répétitions de SIMITKO (colonne de droite) des (a) quantités d'eau par unité de surface, (b) dates de démarrage de l'irrigation et (c) du rendement. Les valeurs moyennes (colonne de droite) correspondent à la distribution des valeurs moyennes de chaque répétition	157
Figure 59: Pourcentage cumulé observé et simulé de surface semée journalièrement au cours de la période de semis pour chaque groupe de précocité	158

Figure 60 : Dynamique de semis des trois groupes de précocité très tardif, tardif, demi-tardif (données observées et simulées)	159
Figure 61: Comparaison des pourcentages de surface semée par décade observée et simulée	159
Figure 62: Pourcentage en surface de chaque densité (données observées et simulées)	160
Figure 63: Dates de démarrage de l'irrigation observées en 2005	161
Figure 64: Distribution des pourcentages de surface observés et simulés pour chaque intervalle de quantité d'eau unitaires par parcelle et comparaison des pourcentages de surface observées et simulées pour chaque intervalle de quantité d'eau unitaire	162
Figure 65: Distribution des agriculteurs selon leur quantité d'eau unitaire (données observées et simulées)	163
Figure 66: Comparaison des valeurs minimales, du 1 <sup>er</sup> quartile, de la médiane, de la moyenne du 3 <sup>ème</sup> quartile et de la valeur maximale des distributions observées et simulées	163
Figure 67: Distribution des dates de semis estimées par SIMITKO	166
Figure 68: Quantité d'eau estimée selon les dates de semis et les groupes de précocité simulés	167
Figure 69: Distributions des volumes et des quantités d'eau unitaires pour chaque stratégie. Les résultats sont présentés de haut en bas pour les stratégies a à c.	168
Figure 70: Dynamiques moyennes des semis de chaque groupe de précocité toutes stratégies confondues et pour chaque stratégie	170
Figure 71: Distributions cumulées du volume final pour différents nombres de répétitions (10, 100, 500, 1000, 1500, 2000) pour 5 tirages aléatoires	171
Figure 72 : Distributions cumulées du volume fin juillet pour différents nombres de répétitions (10, 100, 500, 1000, 1500, 2000) pour 5 tirages aléatoires	172
Figure 73: Distributions cumulées du volume total pour différents nombres de répétitions (100, 200, 300, 400, 500) pour 5 tirages aléatoires	173
Figure 74 : Illustration de l'impact potentiel des scénarios	183
Figure 75: "Indice sécheresse" 2003 pour la station météorologique de Blagnac (31) (source: METEO France) Il s'agit d'un suivi de l'état des réserves du sol par gestion d'un bilan hydrique simplifié mono réservoir (RFU=0mm et RS=100mm) avec frein à l'évaporation proportionnel au remplissage. Différentes zones de couleur indiquant le degré de sécheresse en cours (pas de sécheresse, sécheresse effective, sécheresse critique, sécheresse exceptionnelle) sont indiquées.	220

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1: Evolution des surfaces irriguées en France .....	13
Tableau 2: Proportion of the departmental agricultural area in use for the main crops for the four departments of the study areas (Agreste, 2003). For the cereal data, the percentage of the maize area in the cereal is given (in italics).....	59
Tableau 3 : Expert analysis to determine the different classes for the starting and ending irrigation rules. * These classes are defined by the use of a criterion from the previous and next classes (e.g. starting at number of leaves equals to 9 or when advised to do so by advisor). .....	62
Tableau 4 : Elements to determine the classes REA for the delaying rule according to (i) the amount of rainfall causing a 1-day withholding of irrigation (D) and (ii) the amount of rainfall causing a delay in the irrigation cycle (R). (D=5.7 mm and R=10 mm are the median values from the surveyed farmers) .....	63
Tableau 5: Description of the production systems types using the original explanatory variables. PS7 and PS8 represent a single individual. ....	65
Tableau 6: Percentage of farms in each county in the different Production Systems (PS), Equipment Systems (ES) and Theoretical irrigation capacity (TIC) classes. ....	68
Tableau 7: Caractéristiques de différents groupes de précocité (d'après l'AGPM- technique, 2003) .....	78
Tableau 8 : Répartition des agriculteurs ayant répondu à l'enquête et des surfaces de maïs irrigué dans chaque PRA. Le tableau présente les données exhaustives pour la zone puis les données calculées à partir des retours d'enquêtes.....	79
Tableau 9 : Nombre de groupes de précocité et types d'association de précocité semés par les agriculteurs. Le nombre et le pourcentage d'agriculteur sont donnés pour chaque association de groupes de précocité identifiée, en 2000 et 2001 .....	89
Tableau 10: Surface de maïs grain et durée de chantier de semis selon le nombre de groupe de précocité semé..	90
Tableau 11: Répartition des agriculteurs de la zone (données du RGA 2000) et ayant répondu à l'enquête (nombre d'agriculteurs et surface -SAU et maïs grain- dans chaque PRA) .....	105
Tableau 12: Répartition de l'échantillon d'agriculteurs selon les critères de choix de l'échantillon. (Le nombre d'agriculteurs dans chaque PRA et pour chaque système de production est indiqué entre parenthèses)...	106
Tableau 13 : Dates de semis minimales observées dans les différentes PRA en 2003 (source : données d'enquêtes postales 2003). Les jours juliens correspondant aux dates sont donnés entre parenthèses. ....	108
Tableau 14 : Description des modalités des variables de construction de la typologie de stratégies .....	116
Tableau 15: description des variables explicatives et à expliquer.....	119
Tableau 16: Données relevées pour expliquer la variabilité des débits de chantier .....	130
Tableau 17 : .....	131
Tableau 18 : Présentation des variables climatiques .....	142
Tableau 19: Nombre de jours disponibles et probabilités cumulées de semer dans chaque quinzaine pour la PRA HARM .....	144
Tableau 20: Détermination des probabilités $P(Q_i)$ en fonction du nombre de jours disponibles $N(Q_i)$ dans la quinzaine $Q_i$ .....	145
Tableau 21: Présentation de l'arbre de détermination des distributions de stratégies de choix de précocité et de semis .....	147
Tableau 22: Modalités des 7 variables décrivant les stratégies de choix de précocité et de mode de semis .....	148
Tableau 23: Présentation des modalités possibles des variables pour chaque stratégie. Entre parenthèse, figure la probabilité associée à la (les) modalité(s).....	150
Tableau 24: Volumes estimés par les relevés de consommation et par les modèles ADEAUPI et SIMITKO-MODERATO et surfaces de maïs et données climatiques correspondants à ces estimations. ....	164
Tableau 25: Date correspondant au démarrage, à 50% des volumes demandés et à l'arrêt des irrigations estimées par ADEAUPI et par SIMITKO-MODERATO .....	165

## SOMMAIRE

<b>RESUME</b> .....	<b>1</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>2</b>
<b>REMERCIEMENTS</b> .....	<b>3</b>
<b>ABREVIATIONS</b> .....	<b>4</b>
<b>LISTE DES FIGURES</b> .....	<b>5</b>
<b>LISTE DES TABLEAUX</b> .....	<b>8</b>
<b>SOMMAIRE</b> .....	<b>9</b>
<b>I. INTRODUCTION : LA DEMANDE REGIONALE EN EAU D'IRRIGATION A MOYEN TERME, UNE DONNEE INCERTAINE</b> .....	<b>12</b>
I.1    LA DEMANDE EN EAU D'IRRIGATION, UNE DONNEE NECESSAIRE POUR LA GESTION QUANTITATIVE DE L'EAU	12
I.2    DEFINITION DE LA DEMANDE EN EAU D'IRRIGATION .....	14
I.3    L'AGRICULTURE IRRIGUEE FACE A UN CONTEXTE CHANGEANT .....	15
I.3.1 <i>L'impact de la réforme de la PAC</i> .....	15
I.3.2 <i>L'impact de la directive cadre sur l'eau</i> .....	16
I.3.3 <i>Le changement climatique</i> .....	16
I.4    QUELLE SERA LA DEMANDE REGIONALE EN EAU D'IRRIGATION A MOYEN TERME? .....	16
I.5    PRESENTATION DU MEMOIRE .....	17
<b>II. PROBLEMATIQUE</b> .....	<b>18</b>
II.1    INTRODUCTION .....	19
II.2    DEFINITION D'UN CADRE METHODOLOGIQUE POUR L'ESTIMATION DE LA DEMANDE REGIONALE EN EAU D'IRRIGATION A MOYEN TERME .....	19
II.2.1 <i>Une démarche prospective</i> .....	19
II.2.2 <i>Estimer la demande en eau d'irrigation à l'échelle régionale</i> .....	20
II.2.3 <i>Estimer la répartition spatio-temporelle de la demande</i> .....	21
II.2.4 <i>Prendre en compte le comportement tactique des irrigants</i> .....	21
II.2.5 <i>Définir des scénarios décrivant les choix stratégiques des irrigants</i> .....	23
II.3    EMERGENCE D'UNE QUESTION METHODOLOGIQUE .....	23
II.3.1 <i>La représentation du comportement tactique dans les modèles développés à l'échelle régionale</i>	24
II.3.2 <i>La représentation des pratiques culturelles à l'échelle régionale</i> .....	27
II.4    DEFINITION DE MA QUESTION DE RECHERCHE.....	29
<b>III. DEMARCHE</b> .....	<b>32</b>
III.1    LES CHOIX METHODOLOGIQUES .....	33
III.1.1 <i>Estimer la demande en eau d'irrigation régionale à partir de la demande en eau pour le maïs grain</i> .	33
III.1.2 <i>Décrire l'itinéraire technique à partir des pratiques culturelles ayant le plus d'influence sur la demande en eau</i> .....	34
III.1.3 <i>Considérer la sole de maïs grain comme une « unité de gestion »</i> .....	36
III.2    LES GRANDES ETAPES DU TRAVAIL .....	37
<b>IV. MATERIEL ET METHODES</b> .....	<b>39</b>
IV.1    LE TERRAIN D'ETUDE .....	40
IV.2    LES DONNEES UTILISEES .....	43
IV.2.1 <i>Les données d'enquêtes</i> .....	44
IV.2.2 <i>Les données non issues d'enquêtes réalisées dans le cadre de la thèse</i> .....	46
IV.3    CHOIX DE MODELISATION .....	47
IV.3.1 <i>Choix d'un formalisme pour décrire les pratiques culturelles</i> .....	47
IV.3.2 <i>Choix d'un modèle permettant de simuler le développement du maïs</i> .....	49
IV.4    LE TYPE D'ANALYSES MENEES .....	49
IV.4.1 <i>Pour identifier les pratiques et simplifier leur diversité</i> .....	49

IV.4.2	<i>Pour rechercher des indicateurs permettant d'estimer la distribution spatiale des pratiques culturales et définir des scénarios</i> .....	50
<b>V.</b>	<b>RÉSULTATS</b> .....	<b>53</b>
V.1	ARTICLE 1: ASSESSING THE IRRIGATION STRATEGIES OVER A WIDE GEOGRAPHICAL AREA FROM STRUCTURAL DATA ABOUT FARMING SYSTEMS. ....	56
V.1.1	<i>Abstract</i> .....	56
V.1.2	<i>Key words</i> .....	57
V.1.3	<i>Introduction</i> .....	57
V.1.4	<i>Materials and methods</i> .....	58
V.1.5	<i>Results</i> .....	62
V.1.6	<i>Discussion</i> .....	68
V.1.7	<i>Conclusion</i> .....	70
V.1.8	<i>Acknowledgements</i> .....	70
V.2	ARTICLE 2 : IDENTIFICATION DE LA DIVERSITE DES PRATIQUES CULTURALES DES AGRICULTEURS A L'ECHELLE REGIONALE. APPLICATION AUX PRATIQUES DE CHOIX DE PRECOCITE ET DE SEMIS DES MAÏSCULTEURS DE LA ZONE DE LA BAÏSE-AMONT DANS LE SUD-OUEST DE LA FRANCE .....	71
V.2.1	<i>Introduction</i> .....	73
V.2.2	<i>Matériel et méthodes</i> .....	74
V.2.3	<i>Modes d'intervention des organismes d'approvisionnement et de stockage dans les choix de précocité des variétés des maïsiculteurs de la zone de la Baïse</i> .....	80
V.2.4	<i>Les pratiques des maïsiculteurs</i> .....	82
V.2.5	<i>Discussion Conclusion</i> .....	94
V.3	CHAPITRE 3 : ESTIMER LA DISTRIBUTION SPATIALE DES PRATIQUES DE SEMIS ET DE CHOIX DE PRECOCITE DES MAÏSCULTEURS AU SEIN D'UN VASTE PERIMETRE IRRIGUE .....	97
V.3.1	<i>Introduction</i> .....	97
V.3.2	<i>Matériel et méthodes</i> .....	98
V.3.3	<i>Résultats</i> .....	106
V.3.4	<i>Discussion-Conclusion</i> .....	124
V.4	CHAPITRE 4 : SIMITKO-MODERATO UN MODELE SIMULANT LES PRATIQUES CULTURALES DES MAÏSCULTEURS IRRIGANTS POUR ESTIMER LA DEMANDE EN EAU D'IRRIGATION A L'ECHELLE REGIONALE EN FONCTION DE SCENARIOS .....	132
V.4.1	<i>Attendus du modèle</i> .....	132
V.4.2	<i>Choix de modélisation</i> .....	133
V.4.3	<i>Matériel</i> .....	134
V.4.4	<i>Structure globale du modèle</i> .....	135
V.4.5	<i>Les variables d'entrée et de sortie du modèle</i> .....	137
V.4.6	<i>Estimation des quadruplets {date, précocité, densité, surface} pour la zone irriguée</i> .....	137
V.4.7	<i>Estimation de la demande en eau au sein de la zone de la Baïse-Amont</i> .....	151
V.4.8	<i>Résultats et discussion</i> .....	153
<b>VI.</b>	<b>DISCUSSION - CONCLUSION GENERALE</b> .....	<b>174</b>
VI.1	RETOUR SUR LA DEMARCHE.....	174
VI.1.1	<i>Analyser l'opportunité des pratiques culturales pour en connaître les modalités et l'efficacité à l'échelle régionale</i> .....	174
VI.1.2	<i>Du concept d'itinéraire technique à celui de « stratégie » à l'échelle régionale</i> .....	177
VI.1.3	<i>Influence de l'échelle sur la démarche adoptée</i> .....	178
VI.2	APPORTS, LIMITES ET PROPOSITIONS D'AMELIORATION DU MODELE.....	180
VI.2.1	<i>Pour le diagnostic de l'existant</i> .....	180
VI.2.2	<i>Pour l'évaluation de scénarios prospectifs</i> .....	182
VI.3	CONCLUSION.....	186
VI.3.1	<i>Une contribution à l'agronomie du territoire</i> .....	186
VI.3.2	<i>Un outil pour une meilleure connaissance de la demande en eau</i> .....	187
<b>VII.</b>	<b>BIBLIOGRAPHIE</b> .....	<b>189</b>
<b>VIII.</b>	<b>ANNEXES</b> .....	<b>201</b>
VIII.1	ANNEXE 1 : REVUE SUR L'EVOLUTION DES OBJETS DE RECHERCHE ET DE LEUR MODELISATION EN AGRONOMIE .....	201
VIII.1.1	<i>Le champ cultivé et les modèles développés à l'échelle parcellaire</i> .....	201

VIII.1.2	<i>Les pratiques de l'agriculteur et les modèles représentant les processus de décision des agriculteurs</i>	202
VIII.1.3	<i>Les problèmes environnementaux et la modélisation à de nouvelles échelles.....</i>	203
VIII.1.4	<i>L'agriculture durable et des modèles intégratifs.....</i>	204
VIII.1.5	<i>Bilan .....</i>	204
VIII.2	ANNEXE 2 : CALCUL DE LA MARGE BRUT DU MAÏS IRRIGUE ET DU BLE TENDRE EN SEC .....	206
VIII.3	ANNEXE 3 : ENQUETES POSTALES ENVOYÉES EN 2000 ET 2001 AUX IRRIGANTS DE LA ZONE DE LA BAÏSE.	207
VIII.4	ANNEXE 4 : QUESTIONNAIRE POSTAL ENVOYÉ EN 2003 AUX IRRIGANTS DE LA ZONE DE LA BAÏSE.	208
VIII.5	ANNEXE 5 : QUESTIONNAIRE POSTAL ENVOYÉ EN 2005 AUX IRRIGANTS DE LA ZONE DE LA BAÏSE.	209
VIII.6	ANNEXE 6 : GUIDE D'ENTRETIENS 2003 POUR ENQUETE AUPRES DES O.A.S.....	210
VIII.7	ANNEXE 7 : GUIDE D'ENTRETIENS 2004 POUR ENQUETE AUPRES DE MAÏSCULTEURS .....	212
VIII.8	ANNEXE 8 : PLUVIOMETRIE EN 2000, 2001, 2003, 2004 ET 2005 POUR LES POINTS DE GRILLE 25, 26 ET 27 (DE JANVIER AU 31 OCTOBRE).....	214
VIII.9	ANNEXE 9 : SORTIES DE L'ANALYSE DES CORRESPONDANCES MULTIPLES ET DE LA CLASSIFICATION ASCENDANTE HIERARCHIQUE EFFECTUEE SUR LES VARIABLES SOW, PRECO, DENS.....	217
VIII.10	ANNEXE 10 : RESULTAT DE LA VALIDATION DE L'ARBRE DE CLASSIFICATION PREDICTIF DES STRATEGIES DE SEMIS ET DE CHOIX DE PRECOCITE .....	219
VIII.11	ANNEXE 11 : INDICE SECHERESSE 2003 POUR LA STATION METEOROLOGIQUE DE BLAGNAC (31) (SOURCE: METEO FRANCE) .....	220
VIII.12	ANNEXE 12 : DISTRIBUTION DES GROUPES DE PRECOCITE SELON LA PRA (EXTRAIT DU MODELE INFORMATIQUE) .....	221
VIII.13	ANNEXE 13 : PARAMETRAGE DES REGLES DE DECISION D'IRRIGATION DANS LE MODELE ADEAUMIS	222
VIII.14	ANNEXE 14 : CONTEXTE D'IRRIGATION CHOISI DANS MODERATO.....	224
VIII.15	ANNEXE 15 : REPRESENTATION SPATIALE DES DONNEES LIEES A LA DEMANDE EN EAU (SOURCE : ENQUETE POSTALE 2005, 47 AGRICULTEURS).....	225
VIII.16	ANNEXE 16 : DYNAMIQUE DES SEMIS DES DIFFERENTS GROUPES DE PRECOCITE POUR CHAQUE STRATEGIE ET TOUTES STRATEGIE CONFONDUES POUR 10, 50, 300 ET 2500 REPETITIONS ET RESULTATS POUR 1 REPETITION.	228

## I. INTRODUCTION : LA DEMANDE REGIONALE EN EAU D'IRRIGATION A MOYEN TERME, UNE DONNEE INCERTAINE

### I.1 La demande en eau d'irrigation, une donnée nécessaire pour la gestion quantitative de l'eau

En France, depuis la loi sur l'eau de 1992, la gestion de l'eau est passée d'une gestion par l'offre à une gestion par la demande et s'est accompagnée du développement de la notion de gestion intégrée de l'eau. Au lieu de favoriser la disponibilité de la ressource en eau par des investissements structurels, on cherche à répartir au mieux les usages ou à réduire leur volume et à augmenter leur efficacité par des incitations et des règles. La gestion intégrée de l'eau est un concept à l'interface entre gestion de l'offre et gestion de la demande (Feuillette, 2001). Selon les démarches, il peut sous-entendre une gestion ayant pour objectif de répartir l'eau de manière optimale entre les différents usages en fonction des disponibilités en eau dans le temps et dans l'espace et d'assurer la protection des milieux aquatiques (Amigues, 1999), mais aussi une gestion à la fois quantitative et qualitative, ou une gestion intégrant les ressources superficielles et souterraines ou encore tenant compte de différents secteurs économiques

Par rapport aux différents usages<sup>1</sup>, l'usage agricole de l'eau - c'est-à-dire essentiellement l'irrigation - présente des particularités qui rendent délicate la gestion de l'eau. En effet, l'irrigation est une pratique agricole très dépendante du climat, du choix des cultures et des itinéraires techniques réalisés par les agriculteurs chaque année. Contrairement à l'usage urbain (alimentation en eau potable et utilisation d'eau brute pour les jardins, piscines...) qui est assez constant et considéré comme peu compressible par les gestionnaires, l'usage agricole de l'eau peut varier de manière importante d'une année à l'autre. Il présente, de plus, une forte saisonnalité (Tiercelin, 1998). Par exemple, en Midi-Pyrénées, l'usage agricole peut représenter jusqu'à 90% de la consommation totale en période d'étiage (Mission Eau, 2004). Enfin, étant donnée son importance pendant les périodes d'étiage, il fait l'objet de mesures de restrictions dont l'efficacité est difficilement évaluable.

L'irrigation a fortement contribué à l'augmentation de la demande en eau ces trente dernières années. Les surfaces irriguées ont augmenté entre les années 70 et les années 90. En France, depuis 1994, les surfaces ont dépassé les 1 500 000 hectares, ce qui représente 6% de la SAU. Elles se stabilisent de nouveau autour de cette valeur depuis quelques années. Seize pourcents des exploitations faisaient appel à l'irrigation en 2000, soit 100 000 exploitations environ (Tableau 1).

En France, les prélèvements en eau d'irrigation des bassins hydrographiques (par ordre de prélèvements, Rhône Méditerranée Corse, Adour Garonne et Loire Bretagne) se sont stabilisés depuis 1992 pour représenter au total environ 4 millions de m<sup>3</sup>. En terme de consommation annuelle, l'irrigation représente 2.5 milliards de m<sup>3</sup> sur un total de 6 milliards pour l'ensemble des usages, soit 40% de la consommation nette.

Dans certains bassins versants, on observe un déséquilibre chronique entre les prélèvements et les ressources. Des conflits d'usage apparaissent chaque année pendant les mois d'été, période pendant laquelle l'eau est la plus rare et les prélèvements pour l'irrigation

---

<sup>1</sup> Les principaux usages sont domestique (eau potable), agricole (irrigation), industriel, environnemental (maintien de la salubrité des rivières) et pour les loisirs.

sont concentrés. Pour parvenir à un équilibre entre ressources et prélèvements, la gestion quantitative de l'eau agricole s'impose.

Suite à la loi sur l'eau de 1992, un panel d'outils techniques, économiques et réglementaires visant à améliorer la gestion quantitative de l'eau agricole a été développé à différentes échelles (Guines, 2003).

**Tableau 1: Evolution des surfaces irriguées en France**

Evolution de l'irrigation en France							
(superficies en milliers d'hectares)							
	1970	1979	1988	1993	1995	1997	2000
Superficies irrigables	767	1 325	1 796	2 417	2 510	2 698	2 633
Superficies irriguées	539	801	1 147	1 468	1 620	1 907	1 575
% d'exploitations équipées	9%	12%	13%	16%	17%	17%	16%
Source : SCEES – Ministère de l'Agriculture							

A l'échelle de la parcelle, les outils ont pour vocation de rendre les choix techniques d'irrigation et les pratiques plus économes en eau. Il existe par exemple des outils techniques améliorant la gestion tactique de l'eau. Il s'agit d'outils de pilotage de l'irrigation permettant un suivi du déficit hydrique du sol ou des besoins en eau des plantes en cours de campagne (Tron et al., 2000).

A l'échelle de l'exploitation, les outils permettent d'orienter les choix de production vers des productions moins exigeantes en eau ou de réduire leur importance dans l'assolement. Ils peuvent également jouer sur la pratique d'irrigation en imposant une quantité d'eau à ne pas dépasser. Il s'agit dans ce cas d'outils réglementaires et contractuels tels que les mesures agri-environnementales et les contrats territoriaux d'exploitation (Ducau et Leibreich, 2001). D'autres outils peuvent avoir pour vocation d'inciter les agriculteurs à limiter leur usage de l'eau et de les contrôler. Ils s'agit d'outils économiques tels que les quotas, la tarification ou les marchés de l'eau (Montginoul, 1998).

A l'échelle des périmètres irrigués ou des bassins versants, les problèmes portent sur l'allocation prioritaire entre parcelles/secteurs et sur l'efficacité de la distribution ; ces problèmes impliquent un questionnement sur la coordination entre irrigants. Dans ce cas, des outils d'aide à la concertation et à la négociation sont développés (Barreteau, 2003; Courtois et al., 2003). La directive cadre sur l'eau, en tant qu'outil réglementaire, privilégie une gestion collective par les irrigants. Par ailleurs, certains gestionnaires de la ressource utilisent des modèles de gestion estimant la demande en eau d'irrigation pour la campagne culturale à venir. Ces outils permettent d'améliorer la gestion stratégique et tactique de l'eau à l'échelle de grands bassins (Trouvat, 1997). Ils combinent un suivi de l'état de la ressource (tableau de bord) et une estimation des apports naturels et des prélèvements à venir pour aider à la prise de décisions relatives aux lâchers d'eau des réservoirs en cours de campagne.

Les prises de décision concernant une échéance de plusieurs années rentrent dans le cadre de la planification. Elles concernent en général l'échelle du bassin versant ou de la région à laquelle se posent des questions sur la politique à mener pour favoriser une demande moins

consommatrice et inciter à une répartition spatio-temporelle des prélèvements. Les SDAGE<sup>2</sup>, les SAGE<sup>3</sup> et les Plans de Gestion des Etiages (PGE) sont des outils de planification qui imposent de fixer des règles de gestion collective. Par exemple, dans le cadre des PGE, un débit objectif d'étiage (DOE) et un débit de crise (DCR) en deçà duquel les prélèvements sont restreints ou stoppés doivent être fixés collectivement. Les valeurs de ces débits seuil de gestion sont choisis en fonction de débits naturels reconstitués et d'une estimation de l'évolution de la demande en eau d'irrigation (Cancel P, 2002). Pour la planification, on trouve également des modèles de gestion qui peuvent permettre aux gestionnaires de mieux allouer l'eau. Il s'agit des modèles de gestion intégrée (Krol et al., 2006)

Ainsi, cet inventaire non exhaustif montre que les outils développés aux différentes échelles (spatiale et temporelle) font presque systématiquement appel à une estimation de la demande en eau d'irrigation.

## **I.2 Les définitions de la demande en eau d'irrigation**

La demande en eau d'irrigation est une notion qui n'a pas la même définition selon l'échelle à laquelle on se place et selon la question que l'on aborde<sup>4</sup>. Selon Margat (1996), il peut s'agir :

- Du besoin en eau des cultures,
- Du besoin en eau d'irrigation des plantes,
- De la quantité d'eau consommée au sein d'un système d'irrigation,
- De la quantité d'eau prélevée dans une ressource donnée.

Beaucoup de modèles utilisent les besoins en eau des cultures comme indicateur de la demande en eau (FAO, 1998). Ce besoin en eau est calculé à partir de l'évapotranspiration potentielle maximale, du coefficient cultural et, parfois, des caractéristiques des sols. De nombreux travaux de prospective se basent également sur le besoin en eau d'irrigation des plantes, qui se calcule à partir des besoins en eau des plantes et d'un bilan hydrique permettant de tenir compte des conditions météorologiques (apports d'eau par les précipitations). Multiplié par le rendement du système d'adduction d'eau aux parcelles et l'efficacité du matériel d'irrigation, cette donnée permet d'estimer la quantité d'eau consommée au sein d'un système d'irrigation (ou prélèvements nets). Quand on cherche à estimer la quantité d'eau détournée d'un cours d'eau pour l'irrigation, on s'intéresse aux prélèvements bruts qui correspondent à la quantité d'eau consommée, multipliée par un coefficient traduisant la part d'eau prélevée retournant au milieu plus loin le long du cours d'eau et/ou plus ou moins tard.

Ces estimations de la demande en eau peuvent être qualifiées de « théoriques ». Il s'agit en effet en général d'une part d'une donnée statistique et d'autre part d'un volume estimé en supposant que les irrigants apportent exactement la dose d'eau dont la plante a besoin au moment où elle en a besoin.

Ainsi, la demande en eau d'irrigation correspond à une grandeur physique variable suivant le système considéré : un agronome travaillant sur des variables agronomiques s'intéressera

---

<sup>2</sup> Schéma Directeur d'Aménagement et de Gestion des Eaux

<sup>3</sup> Schéma d'Aménagement et de Gestion des Eaux

<sup>4</sup> Nous ne considérons pas ici la « fonction de demande en eau d'irrigation » estimée par les économistes en fonction du prix de l'eau et parfois de critères agronomiques ( cf. Bontemps et al., 2003)

au besoin en eau des plantes ou à leur besoin en eau d'irrigation tandis qu'un gestionnaire de la ressource s'intéressera aux quantités d'eau consommées au sein d'un périmètre irrigué ou prélevées dans une ressource donnée.

### **I.3 L'agriculture irriguée face à un contexte changeant**

L'activité agricole s'exerce dans un contexte général de plus en plus fluctuant : variation des prix des cultures et des coûts de production, modification de la politique agricole commune (PAC) et des politiques régionales, application de la directive cadre européenne sur l'eau (DCE), multiplication des événements climatiques extrêmes (augmentation générale des températures, sécheresses, mais aussi pluies orageuses...). Le contexte socio-économique évolue avec des attentes sociétales nouvelles en terme de qualité des produits, de paysage et d'environnement, des modifications des filières de production... L'irrigation, et en particulier celle du maïs, est très critiquée. Elle fait l'objet de débats dont les échos peuvent, en retour, influencer la réglementation (Lasserre, 2003; UFC Que choisir, 2005). Parallèlement, la production agricole est de plus en plus contractualisée ; les contrats de production mis en place par les distributeurs ou grands groupes coopératifs imposent l'irrigation.

Voyons sans rentrer dans le détail en quoi la PAC, la DCE et le changement du climat constituent un contexte incertain pour l'agriculture irriguée.

#### **I.3.1 L'impact de la réforme de la PAC**

Le projet de réforme de la politique agricole commune est basé sur un découplage partiel des aides à la production. Le montant des aides est basé, à partir de 2006, sur la base des aides reçues dans chaque exploitation entre 2000 et 2002. Chaque agriculteur disposera d'un droit à paiement unique par hectare. Il n'y aura pas obligation de produire, mais obligation de maintenir les terres « dans de bonnes conditions agronomiques et environnementales ». L'octroi du paiement unique est subordonné au respect de directives européennes en matière d'environnement, de santé publique, de santé des animaux etc. C'est ce que l'on appelle l'éco conditionnalité des aides.

Un récent rapport sur l'irrigation, commandité par le ministère français de l'agriculture, souligne le manque d'informations permettant d'évaluer l'impact de la nouvelle PAC sur la demande en eau d'irrigation (Levy et al., 2005). On prévoit que l'impact diffère selon que l'on considère le court terme ou le moyen terme : à court terme, on peut supposer que l'agriculteur ne changera pas complètement son système de production : il modifiera son assolement afin de l'adapter aux évolutions des coûts, des prix et des aides. A moyen terme, que l'on peut par exemple situer à 2013, date du découplage total des aides PAC, il est possible que la structure des exploitations ait elle-même évolué : selon les études sur la gestion des structures, les aides directes, considérées comme une source de revenu, pourront avoir un effet sur le capital des exploitations et ainsi, sur l'agrandissement foncier, le renouvellement du matériel etc. (Sourie et al., 2004) . En fonction du niveau d'endettement de l'exploitation, de l'amortissement du matériel, de la disponibilité de la ressource, du niveau d'irrigation permis, du différentiel de rendement entre culture en sec et culture irriguée (assez variable selon les régions et micro-régions), la réforme sur l'irrigation aura des effets différents (Arvalis-Institut du végétal, 2004b; Levy et al., 2005).

La conditionnalité relative à l'irrigation (mise en place de compteurs) n'aurait pas d'impact significatif par rapport à la situation actuelle dès lors qu'une coordination DRAF-MISE-Agence de l'eau permet déjà de s'assurer que l'agriculteur est en règle avant de procéder au paiement d'une aide aux cultures irriguées. D'autres mesures d'éco conditionnalité pourraient

cependant remettre en cause des pratiques souvent associées à l'irrigation telle que la monoculture par exemple.

### **I.3.2 L'impact de la directive cadre sur l'eau**

La directive cadre sur l'eau demande des engagements de résultats concernant le bon état des eaux pour 2015. Elle porte essentiellement sur la qualité des eaux. Or, pour certaines masses d'eau, l'agriculture irriguée remet en cause l'atteinte du bon état écologique : il peut s'agir de problèmes liés au drainage ou au ruissellement, mais également au prélèvement d'eau qui ne permet pas de diluer la pollution. En cas d'impossibilité d'atteinte du bon état écologique à la date prévue, il y a un risque de « sanctuarisation » des masses d'eau, c'est-à-dire que aucune pollution supplémentaire ne devant toucher la masse d'eau, les activités seront limitées dans certaines zones. Cela pourrait être économiquement dommageable pour les territoires concernés. C'est pourquoi un certain nombre de dispositions sont prévues pour agir sur la qualité de l'eau. Certaines d'entre elles, notamment celles de tarification (redevance azote, redevance prélèvements) en zones vulnérables, risquent d'avoir un impact important sur le coût de l'irrigation pour les agriculteurs (Arvalis-Institut du végétal, 2004b). Enfin, on peut se demander si, à long terme, l'application de la DCE n'aura pas d'effets sur le tourisme qui impliqueraient une nouvelle répartition des usages de l'eau.

### **I.3.3 Le changement climatique**

Il est maintenant admis que le changement climatique est une réalité et qu'il a, et aura, un impact sur l'évolution des territoires et la gestion des ressources. Par rapport à la production agricole, les simulations réalisées avec des modèles de cultures pour le blé et le maïs dans quelques sites français montrent que l'efficacité de l'eau serait augmentée avec une réduction d'eau consommée allant de 0 à 16% (Delécolle et al., 1999; Seguin, 2004). Les cycles de végétation diminueraient, provoquant des modifications des calendriers de travaux agricoles. Les événements pluvieux du printemps augmenteraient, ce qui provoquerait une diminution du nombre de jours disponibles pour le travail dans les parcelles agricoles. La liste est encore longue et des travaux portent actuellement sur l'adaptation des pratiques de production au réchauffement climatique : choix d'un matériel génétique approprié, mise au point de nouvelles pratiques avec l'ajustement du calendrier des cultures et des techniques culturales (fertilisation, irrigation)...(L'INRA au Salon International de l'agriculture du 22 février au 2 mars 2003, 2003) Ainsi, le changement climatique pourrait également avoir un impact sur la demande en eau d'irrigation, que ce soit en terme de volume consommé ou en terme de période de pic de consommation (dynamique temporelle).

## **I.4 Quelle sera la demande régionale en eau d'irrigation à moyen terme?**

Les constats précédents amènent à se demander quelle sera la demande régionale en eau d'irrigation à moyen terme dans les grandes zones irriguées françaises. Devant le futur découplage partiel ou total des aides PAC, la mise en place d'une éco-conditionnalité sur le premier pilier de la PAC, la nouvelle directive cadre sur l'eau qui impose une augmentation de la redevance, l'augmentation des tarifs EDF et la modification progressive du climat, on ne sait pas comment vont évoluer les exploitations irrigantes. Les agriculteurs continueront-ils à irriguer les mêmes surfaces, changeront-ils leurs pratiques d'irrigation en concentrant par exemple leur ressource en eau sur moins de surface ou au contraire, en pratiquant une irrigation plus extensive ? Des études prospectives sont menées mais en général elles n'étudient l'impact que d'un des grands facteurs d'évolution cités ci-dessus à la fois. Des études sont notamment menées sur l'impact de la réforme de la PAC sur la consommation

d'eau par l'agriculture (Buisson, 2005; CACG, 2006; Cogoluèhès, 2005). Elles donnent une estimation de la consommation en eau en se concentrant sur les choix d'assolement des irrigants et utilisant des relations statistiques empiriques entre les surfaces irriguées par culture et le volume d'eau consommé pour différents contextes pédoclimatiques pour estimer la consommation d'eau d'irrigation.

## **I.5 Présentation du mémoire**

Ma thèse présente une approche agronomique de l'estimation de la demande régionale en eau d'irrigation à moyen terme.

Elle se présente en cinq parties. Les parties II, III et IV présentent la problématique de thèse, la démarche mise en œuvre et les matériels et méthodes utilisés. La partie VI présente les résultats principaux. Elle est composée de 4 chapitres :

- Un article publié dans *Agricultural Systems* sur l'identification de stratégies d'irrigation et la recherche de clefs de spatialisation (chapitre 1 des Résultats).
- Un article soumis à *Cahiers Agriculture* sur l'identification de la diversité des pratiques de semis et de choix de précocité à l'échelle régionale (chapitre 2 des Résultats).
- Un chapitre sur la détermination de la distribution spatiale des pratiques de semis et de choix de précocité à l'échelle régionale (Chapitre 3 des Résultats). Il donnera lieu à un article à soumettre à *Agronomy for Sustainable Development*.
- Un chapitre présentant le modèle développé et son évaluation (chapitre 4 des Résultats). Il sera a priori la base de deux articles.

La cinquième partie est une discussion-conclusion générale.

## II. PROBLÉMATIQUE

### Résumé

La problématique de ma thèse est fondée sur trois constats provenant de travaux antérieurs sur l'amélioration de la gestion quantitative de l'eau :

- Pour améliorer la gestion quantitative de l'eau, une estimation de la demande en eau d'irrigation à l'échelle régionale est nécessaire. Elle intéresse les gestionnaires de la ressource pour des objectifs opérationnels à court et moyen terme ou pour la planification ;
- En France, l'agriculture irriguée est actuellement soumise à des modifications de contexte politique et réglementaire (PAC, DCE eau), de contexte socioéconomique (critique de l'agriculture irriguée par la société suite à plusieurs années de sécheresse, augmentation des tarifs d'EDF) et de contexte climatique ;
- Pour estimer la demande en eau d'irrigation, les besoins en eau des plantes ne sont pas un indicateur suffisant ; il est nécessaire de tenir compte du comportement et des contraintes des irrigants. De plus, le volume total demandé n'est pas suffisant pour les gestionnaires. Il est nécessaire d'estimer la répartition spatio-temporelle de la demande en eau d'irrigation.

Il ressort de ces constats :

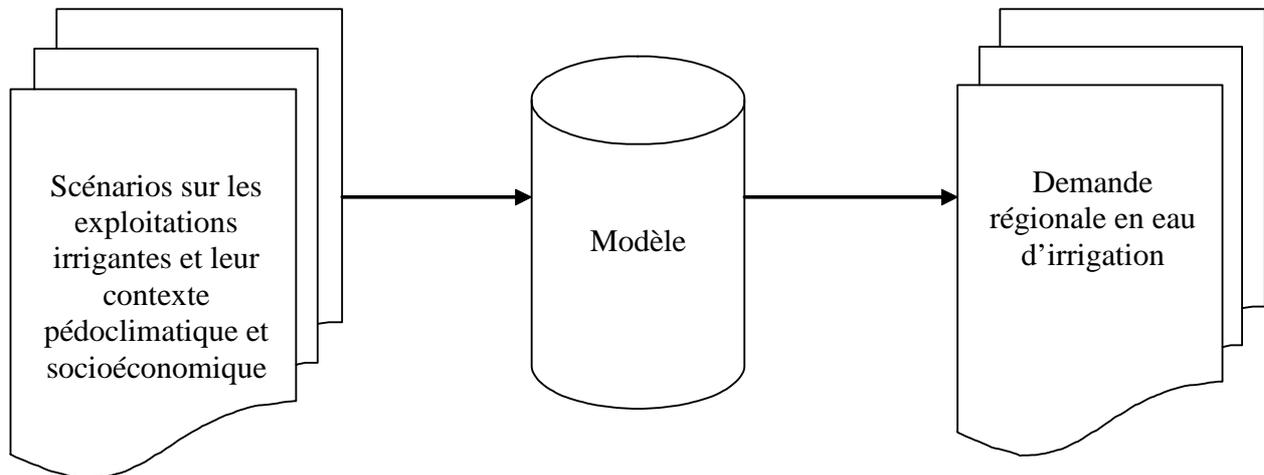
- Que la prédiction de la demande en eau d'irrigation à moyen terme doit tenir compte des incertitudes sur l'impact qu'auront les changements de contexte sur les exploitations agricoles. En effet, on ne connaît pas l'évolution de la structure des exploitations et si les irrigants continueront à irriguer les mêmes surfaces, les mêmes cultures et garderont les mêmes pratiques d'irrigation. La simulation de scénarios prenant en compte les évolutions possibles des exploitations irrigantes et des choix des irrigants apparaît comme une solution à explorer ;
- Qu'il est nécessaire de tenir compte des pratiques culturelles des irrigants pour estimer la demande en eau. Elles sont une traduction du comportement et des contraintes de l'irrigant en décrivant son action sur le système sol-plante et conditionnent la dynamique temporelle de la demande en eau et le volume final consommé. Or, à l'échelle régionale, la description des pratiques culturelles pose un problème méthodologique.

Ma problématique est au croisement d'une question finalisée et d'une question méthodologique. La question finalisée porte sur la demande en eau d'irrigation : Quelle sera la demande en eau d'irrigation à l'échelle régionale à moyen terme étant donné un contexte actuellement très changeant ? Pour répondre à cette question, nous proposons de construire un modèle qui simule les pratiques culturelles et permette d'estimer la répartition spatio-temporelle de la demande en eau d'irrigation en fonction de scénarios.

La construction d'un tel modèle à l'échelle régionale pose des questions méthodologiques. Dans ma thèse, j'aborde particulièrement les questions suivantes: Comment identifier, représenter et simuler la diversité des pratiques culturelles à l'échelle régionale ?

## II.1 Introduction

L'objectif de ma thèse est de développer un modèle permettant d'estimer la demande régionale en eau d'irrigation pour différents scénarios portant sur les exploitations irrigantes et leur contexte (contexte pédoclimatique, environnement socio-économique) (Figure 1)



**Figure 1: Représentation schématique du modèle à développer (1)**

Dans un premier temps, je présente le cadre méthodologique et les objectifs que nous nous sommes fixés. J'explique ensuite que le développement d'un tel modèle pose essentiellement une question méthodologique sur la représentation du comportement tactique des irrigants et que ce qui est fait dans les modèles estimant la demande régionale en eau d'irrigation dans un cadre prospectif ou stratégique ne permet pas de prendre en compte les possibilités d'évolution de ce comportement. Nous proposons alors de rechercher un moyen de simuler les pratiques culturelles des irrigants en supposant qu'elles sont sensibles aux scénarios (exploitations agricoles et leur contexte).

## II.2 Définition d'un cadre méthodologique pour l'estimation de la demande régionale en eau d'irrigation a moyen terme

### II.2.1 Une démarche prospective

Du fait des grands changements présentés dans la partie 1, la demande régionale en eau d'irrigation à moyen terme ne peut être estimée à partir d'un cadre connu décrivant les choix des agriculteurs. Etant donné le nombre de facteurs pouvant influencer l'évolution des exploitations irrigantes, une démarche prospective basée sur la simulation de scénarios paraît pertinente pour estimer la demande en eau d'irrigation à moyen terme. Elle offre notamment la possibilité de simuler les processus biophysiques impliqués.

Les démarches prospectives reposent sur deux types de scénarios : des scénarios pouvant répondre à « Que faut-il pour ? » ou des scénarios permettant de répondre à « Que se passerait-il si ? » (Godet, 1997). Quand on cherche à répondre à « Que faut-il pour ? » on connaît l'objectif à atteindre. Quand on cherche à répondre à la question « Que se passerait-il si ? », on connaît les variables pouvant impliquer un changement. Dans notre questionnement, on se situe dans ce deuxième cas.

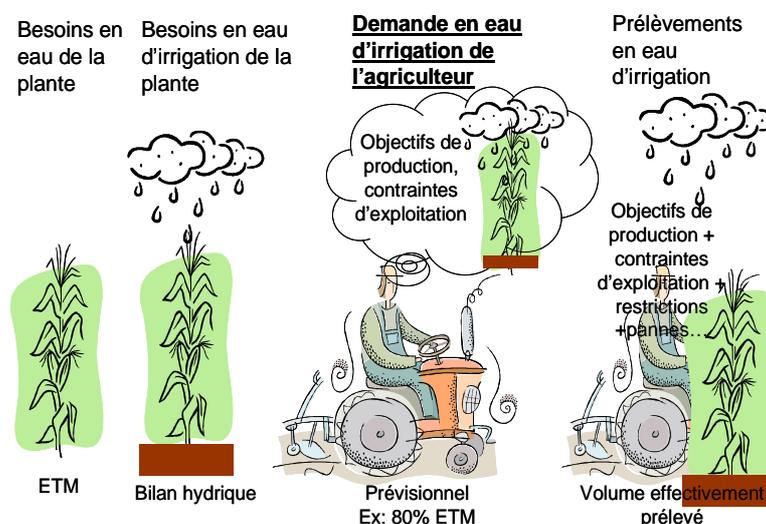
⇒ La simulation de scénarios apparaît comme une solution et est la démarche qui guide ce travail. Nous considérons en effet qu'elle peut fournir des estimations de la demande

régionale en eau d'irrigation en fonction de scénarios qui décriraient l'impact des grands facteurs actuels d'évolution de l'agriculture irriguée sur les exploitations irrigantes. Nous considérons que l'évolution des exploitations irrigantes et de leur contexte (tel que le climat) sont les principaux déterminants de la demande régionale en eau d'irrigation à moyen terme.

## II.2.2 Qu'entend-on-nous par « demande en eau d'irrigation » ?

Nous avons vu que la demande en eau d'irrigation peut être estimée de différentes manières conduisant à l'estimation d'une donnée que nous avons qualifiée de « théorique ». Dans le cadre de la notre démarche, nous souhaitons estimer un volume tenant compte des pratiques des irrigants et non un volume « théorique ». Nous supposons en effet que l'écart entre ces deux volumes peut être significativement important, notamment dans un contexte incertain pouvant faire émerger des stratégies d'irrigation nouvelles.

Ainsi, dans le cadre de la thèse, nous ne considérons pas seulement les besoins des plantes ou les besoins en eau d'irrigation des plantes mais plutôt la quantité d'eau que l'irrigant souhaite consommer une année donnée en fonction de ses objectifs de production, ses contraintes d'exploitation et des pratiques qui en découlent. C'est cette notion que nous appellerons « demande en eau d'irrigation » par la suite. Notons qu'elle ne correspond pas à l'eau réellement consommée une année donnée (nommée « prélèvements en eau d'irrigation » dans la figure suivante) car en particulier, elle n'intègre pas les procédures de restrictions que peuvent subir les irrigants et qui peuvent fortement baisser la consommation.



## II.2.3 Estimer la demande en eau d'irrigation à l'échelle régionale

L'échelle régionale correspond à l'échelle décisionnelle des gestionnaires de la ressource pour leurs objectifs opérationnels stratégiques et de planification de la ressource. Dans le cadre de la gestion intégrée de l'eau, c'est l'échelle d'étude privilégiée (Treyer, 2005). C'est

également l'échelle intéressant les économistes agricoles et les décideurs publics pour appréhender l'impact de politiques publiques, notamment les politiques agri-environnementales (Thomas, 2000).

La demande en eau estimée pour l'échelle régionale est la somme des demandes en eau d'irrigation individuelles (Peret). L'estimation repose donc sur une agrégation des résultats obtenus à l'échelle de l'exploitation agricole (Labbe et al., 2000). Les modèles typologiques et des outils tels que les systèmes d'information géographiques permettent de tels développements (Labbe et al., 2000; Axes et Morardet, 1994).

⇒ Nous considérons que dans le cadre prospectif que nous nous sommes fixés, la demande en eau doit être estimée à l'échelle régionale et que celle-ci relève d'un phénomène additif. J'appellerai « demande régionale en eau d'irrigation » la demande en eau estimée pour un vaste espace correspondant à un espace décisionnel sans que cela implique le caractère administratif de cet espace.

#### II.2.4 Estimer la répartition spatio-temporelle de la demande

La demande en eau d'irrigation est généralement estimée par un volume d'eau total consommé au cours d'une campagne d'irrigation ou d'une année (Knox et al., 1997b), lui-même estimé à partir des surfaces irriguées et de la quantité d'eau unitaire nécessaire (mm). Mais dans de nombreuses zones irriguées, le volume d'eau total n'est pas forcément un indicateur pertinent. Les gestionnaires de la ressource soulignent que de nombreux conflits d'usage ont lieu pendant le pic de demande en eau d'irrigation car celui-ci survient à une période où l'eau est la plus rare ( étiage des rivières) et la plus convoitée touristiquement (Leenhardt et al., 2004a). La période où ce volume d'eau est nécessaire a donc également son importance. La distribution spatiale du volume est aussi un indicateur nécessaire en raison des disparités spatiales de niveau de ressource en eau et des contraintes de gestion (Herrero et Casterad, 1999; Knox et al., 1997b; Weatherhead et Knox, 2000)

⇒ Nous considérons que l'estimation de la demande régionale en eau d'irrigation doit reposer sur une estimation de la distribution spatio-temporelle du volume d'eau demandé.

#### II.2.5 Prendre en compte le comportement tactique des irrigants

L'estimation de la demande en eau à partir des besoins en eau d'irrigation des plantes entraîne une sous estimation ou surestimation de l'eau réellement prélevée par les irrigants (Labbe et al., 2000; Weatherhead et Knox, 2000). Etant donnés leurs objectifs de production, leurs contraintes d'équipement et d'organisation du travail, les irrigants n'ont pas un calendrier d'irrigation correspondant systématiquement à celui des besoins en eau de la plante et de plus, ils couvrent plus ou moins les besoins en eau des plantes (Heinemann et al., 2002). Ainsi, l'estimation des besoins en eau d'irrigation des plantes ne suffit pas pour estimer la demande en eau.

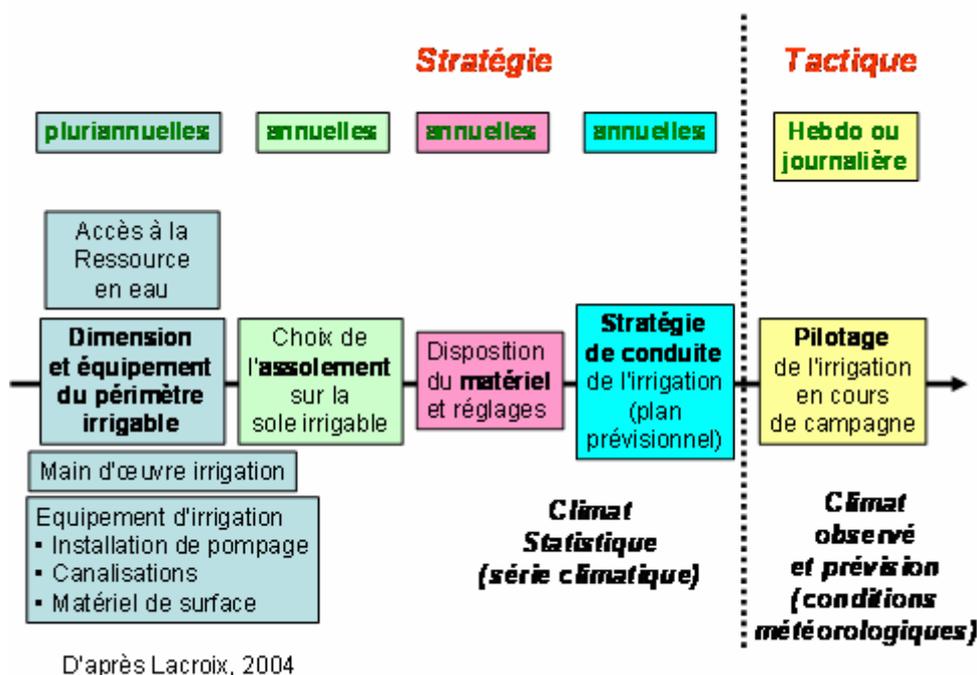
De plus, dans un cadre prospectif, se baser uniquement sur les besoins en eau des plantes ne permet pas de prendre en compte l'évolution possible des pratiques des irrigants et ainsi de la demande en eau réelle. La prise en compte d'un autre déterminant, le comportement des irrigants, s'avère donc nécessaire.

Le comportement d'un irrigant peut être caractérisé d'un point de vue économique, d'un point de vue social, d'un point de vue technico-agronomique etc. Ces trois composantes se retrouvent dans les différentes décisions que l'irrigant prend au niveau de son exploitation agricole. L'ensemble des décisions d'un agriculteur peut être caractérisé par 3 niveaux de

décisions : les décisions stratégiques, les décisions tactiques et les décisions opérationnelles (Sébillotte et Soler, 1990). Ces trois niveaux de décisions sont interdépendants car les décisions stratégiques sont généralement prises par les agriculteurs en fonction de leur représentation de la gestion courante de l'exploitation (Chatelin et al., 1993).

Pour un irrigant, les décisions stratégiques concernent l'investissement à long terme : ressources, distribution, matériel d'arrosage. Elles dépendent du contexte socio-économique, pédoclimatique et de la disponibilité des ressources en eau. Les décisions stratégiques concernent également le choix d'assolement (part des cultures irriguées) et les stratégies de conduite de l'irrigation des différentes cultures irriguées (objectif de couverture des besoins en eau des plantes) (Figure 2). Ces décisions sont prises à l'échelle de la campagne de culture ou de plusieurs campagnes en fonction du contexte économique et de la disponibilité de la ressource.

Les décisions tactiques et opérationnelles concernent les décisions prises par l'agriculteur irrigant pendant une campagne culturale. Ces décisions portent sur les différentes interventions culturales (semis, fertilisation...) et en particulier sur le pilotage de l'irrigation en fonction du climat de la campagne, de l'état de la culture et de la ressource en eau (Puech et al., 1997) (Figure 2).



**Figure 2 : Présentation des décisions stratégiques et tactiques d'un irrigant (Lacroix, 2004)**

Les décisions tactiques d'un irrigant (pilotage de l'irrigation mais aussi les autres interventions culturales de l'itinéraire technique (Sébillotte et Soler, 1990)) déterminent les dates et les modalités d'interventions culturales (semis, fertilisation, protection phytosanitaire etc) (Gras et al., 1989). Ces dates et modalités d'interventions influencent en suivant le développement de la culture et conditionnent ainsi directement la dynamique temporelle de la demande.

⇒ Nous proposons de prendre en compte le comportement tactique des irrigants pour l'estimation de la dynamique temporelle de la demande en eau à l'échelle régionale.

## II.2.6 Définir des scénarios décrivant les choix stratégiques des irrigants

On distingue une demande en eau d'irrigation de « court terme » et une demande de « moyen terme ». La demande en eau d'irrigation de « court terme » est une donnée qui concerne la gestion stratégique et tactique<sup>5</sup> de l'eau par les gestionnaires (Trouvat, 1997). C'est la quantité d'eau que souhaiteraient prélever les irrigants une année donnée une fois leurs choix stratégiques fixés (objectif de production, assolement irrigué/sec, surfaces affectées à chaque culture irriguée, variétés, matériel d'irrigation, etc.). Cette demande est a priori peu compressible. La demande en eau à « moyen terme » concerne la quantité d'eau d'irrigation que souhaiteront consommer les irrigants une année à venir dans un contexte a priori non connu. Cette demande est susceptible d'évoluer en fonction de l'adaptation des agriculteurs aux évolutions du contexte de production.

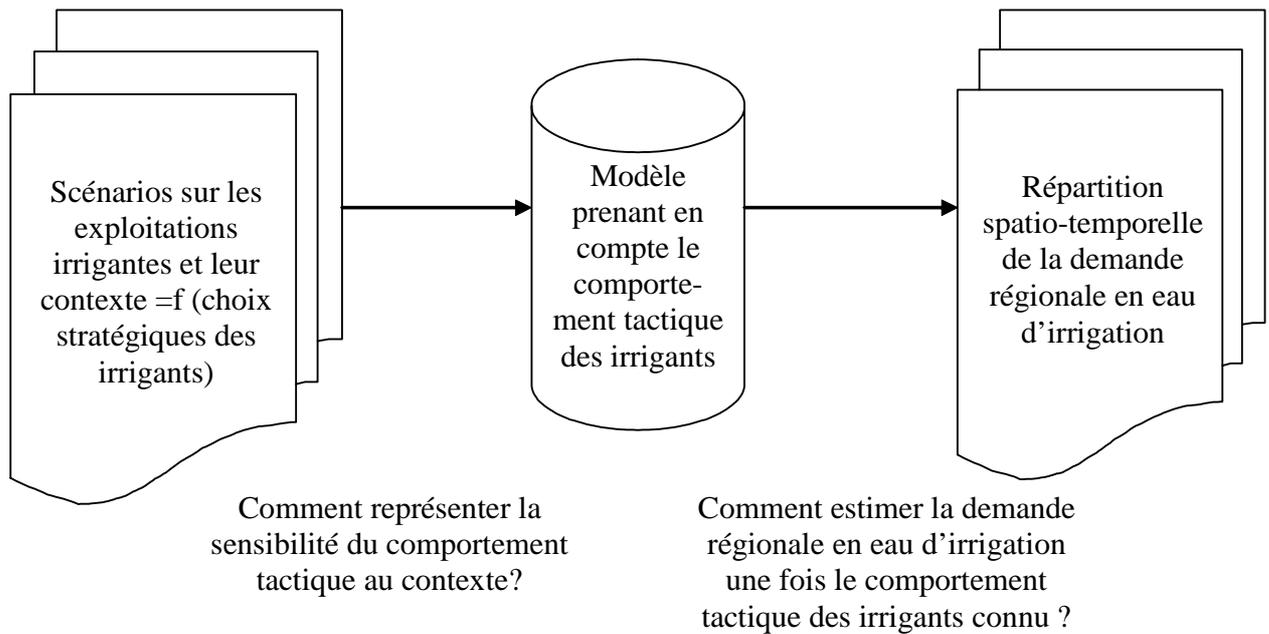
⇒ Afin d'estimer la demande régionale en eau à moyen terme, nous proposons de simuler des scénarios décrivant les choix stratégiques des irrigants. Cela permet de simuler des scénarios décrivant l'évolution des exploitations agricoles irrigants et de fixer un des facteurs de variation de la demande.

## II.3 **Emergence d'une question méthodologique**

Le modèle à développer doit permettre d'estimer la répartition spatiotemporelle de la demande régionale en eau d'irrigation en fonction de scénarios décrivant les choix stratégiques des irrigants et leur contexte. Pour cela, nous proposons de tenir compte du comportement tactique des irrigants (Figure 3).

---

<sup>5</sup> Selon Trouvat (1997), le terme de « gestion de l'eau » (sens large) comprend (i) la planification (avec des décisions à l'échelle pluriannuelle, comme par exemple pour la construction de barrages), la gestion stratégique (décisions saisonnières avec ajustement possible en cours de saison, comme pour la détermination des quotas d'eau affectés à l'irrigation) et la gestion tactique (décisions journalières, comme pour les lâchés d'eau des barrages).



**Figure 3 : Représentation schématique du modèle (2) et présentation de deux questions méthodologiques**

Les hypothèses sous-jacentes sont que le comportement tactique est sensible aux choix stratégiques et au contexte de l'exploitation (pédoclimat, environnement social et économique) et qu'une modification des dates et des modalités des interventions culturales (résultat du comportement tactique) au sein des systèmes irrigués d'une région peut impliquer une variation de la demande régionale en eau d'irrigation.

Le développement d'un tel modèle pose principalement deux questions :

- Comment représenter le comportement tactique des irrigants et sa sensibilité au contexte?
- Comment estimer la demande régionale en eau d'irrigation une fois le comportement tactique des irrigants connu ?

Les modèles d'estimation de la demande en eau développés à l'échelle régionale montrent qu'une fois que le comportement tactique des irrigants est fixé par des dates et des modalités d'interventions culturales, des calendriers ou des règles d'irrigation, l'estimation de la demande en eau est possible grâce à des modèles biophysiques spatialisés. Ces modèles apportent donc une réponse à la deuxième question méthodologique soulevée par le développement de notre modèle.

Je me focalise donc sur la première question. Dans cette partie j'analyse la représentation du comportement tactique des irrigants dans les modèles d'estimation de la demande en eau développés à l'échelle régionale. Après avoir constaté que leur représentation, basée sur les modalités des pratiques culturales, est limitée pour la simulation de scénarios climatiques et socio-économiques, j'analyse la représentation des pratiques culturales dans les modèles développés à l'échelle régionale.

### II.3.1 La représentation du comportement tactique dans les modèles développés à l'échelle régionale

Distinguons les modèles développés pour la gestion tactique et stratégique de ceux développés dans un cadre prospectif.

### **II.3.1.1 La représentation du comportement tactique des irrigants dans les modèles développés pour la gestion tactique et stratégique**

Dans le cas de l'estimation de la demande en eau pour la gestion stratégique et tactique, le contexte correspondant aux choix stratégiques des agriculteurs (surface irriguées, cultures irriguées, variétés, type d'irrigation selon les matériels...) peut être décrit à partir de données provenant de bases de données de l'administration agricole ou d'enquêtes.

Le comportement tactique des irrigants est représenté de façon variable selon que les besoins en eau d'irrigation des plantes sont simulés ou pas. Quand ils ne sont pas simulés, le comportement est représenté par un calendrier d'irrigation. Quand ils sont simulés, certains travaux utilisent également un coefficient multiplicatif des besoins en eau d'irrigation des plantes (Cancel P, 2002; Casterad et Herrero, 1998; Hammel, 1994; Trouvat, 1997) tandis que d'autres, représentent le comportement de l'irrigant sous forme d'un modèle d'action simulant des règles de décision d'irrigation en fonction d'indicateurs fournis par un modèle de culture (Leenhardt et al., 2004a; Leenhardt et al., 2004b). Quand un modèle de culture est mobilisé, des informations sur la conduite de chaque culture (date de semis, densité, profondeur, variétés...) sont requises. Dans les modèles actuels, celles-ci sont fixées de manière unique pour la région considérée.

Dans le cas spécifique de l'estimation de la demande régionale en eau pour l'année en cours, il est possible de caler la représentation du comportement de l'irrigant adoptée par rapport à des données observées pour le territoire irrigué en utilisant la télédétection (nature et développement des cultures) (Guerif et Duke, 1998) ou des relevés de consommation.

### **II.3.1.2 La représentation du comportement tactique des irrigants dans les modèles développés dans un cadre prospectif**

Certains modèles développés dans un cadre prospectif ont pour objectif d'évaluer l'impact de nouvelles règles de gestion de l'eau sur la demande régionale en eau d'irrigation. C'est par exemple le cas du modèle économique proposé par (Palacio et al., 1994) développé pour un petit périmètre irrigué dans un souci d'extrapolation à la petite région agricole. Dans ce type de modèle, on cherche à simuler le comportement stratégique de l'irrigant. Un modèle d'optimisation sous contrainte et une typologie d'exploitations sont mobilisés. Le comportement tactique, utilisé pour la caractérisation de la typologie d'exploitations, est représenté par un calendrier cultural qui influence les choix stratégiques en conditionnant les rendements et les marges brutes des cultures.

Dans le cas de l'estimation de la demande en eau d'irrigation régionale pour la planification, deux types de travaux sont à distinguer : (i) ceux portant sur l'élaboration d'un modèle et le calage de ce modèle grâce à une analyse rétrospective des consommations en eau basée sur une série climatique passée (Heinemann et al., 2002; Knox et al., 1997b), (ii) ceux, peu nombreux actuellement, dont le modèle a déjà été calé et portant effectivement sur la prédiction de la demande en eau d'irrigation à moyen et long terme (Weatherhead et Knox, 2000). Je ne considère pas ici les études prospectives globales<sup>6</sup> dans lesquelles la demande en eau future est basée sur des données macroscopiques telles que la croissance démographique et calculée à l'échelle des pays (Cosgrove et Rijsbergman, 2000; Mutin, 2000; Shiklomanov, 1998).

---

<sup>6</sup> A l'échelle du globe

- Dans le modèle de Knox et al. (1996, 1997), le comportement tactique des irrigants n'est pas pris en compte. La demande en eau est estimée à partir des besoins en eau d'irrigation des plantes calculés par un modèle basé sur un bilan hydrique. Dans le modèle de Heinemann et al. (2002), les besoins en eau d'irrigation des plantes sont simulés à l'aide d'un modèle de culture et le comportement tactique est décrit par des seuils de pourcentage d'eau dans le sol déclenchant une irrigation, les profondeurs de sol variant en fonction de la culture. Les paramètres permettant de représenter le comportement tactique des irrigants ne sont pas issus d'observations mais de recommandations établies par l'administration agricole. Les caractéristiques des cultures (dates de semis, date d'atteinte de la maturité, date de récolte...) sont basées sur l'expertise.
- Le modèle de Weatherhead et Knox (2000) utilise deux façons de représenter le comportement tactique des irrigants. Il s'agit d'une part d'une représentation permettant d'estimer une demande future « réelle », c'est à dire reflétant directement les pratiques d'irrigation des agriculteurs. Pour cela, pour chaque culture irriguée, des relations linéaires entre le volume appliqué et les conditions météorologiques ont été calculé à partir d'enquêtes exhaustives réalisées par l'administration agricole plusieurs années de suite. Les relations linéaires utilisées pour prédire la demande en eau future ont été calculées par extrapolation des tendances identifiées sur l'ensemble des années et validées par des irrigants « leaders » et de conseillers d'irrigation. Il s'agit d'autre part d'une représentation permettant d'estimer une demande « théorique », c'est-à-dire basée sur des pratiques d'irrigation issues de recommandations. Cette partie de modèle s'appuie sur celui de Knox et al. (1996, 1997) permettant d'estimer les besoins en eau d'irrigation des plantes.

### **II.3.1.3 Bilan : une représentation peu sensible au contexte climatique et socio-économique**

Le comportement tactique des irrigants est représenté par :

- (i) les données de l'itinéraire technique conditionnant les besoins en eau : les dates de semis, la profondeur de semis et les variétés. Ces données sont en général des données d'entrée du modèle, identifiées par des enquêtes ou par expertise dans les modèles pour la gestion stratégique ou représentant des préconisations du conseil agricole dans les modèles à vocation prospective. Elles sont généralement fixées par culture et varient selon le type de sol.
- (ii) « la pratique d'irrigation » conditionnant la demande régionale en eau. C'est dans sa représentation que réside la capacité des modèles à estimer la répartition temporelle de la demande en eau. Si la pratique d'irrigation est représentée par un calendrier, la dynamique temporelle est fixée a priori par les dates d'irrigation et elle fait partie des données d'entrée du modèle. Si celle-ci est représentée par des règles de déclenchement et d'arrêt de l'irrigation en fonction de la quantité d'eau contenue dans le sol, la dynamique temporelle de la demande en eau varie selon les conditions météorologiques. Les règles d'irrigation sont en général identiques pour la région considérée.

La revue des modèles développés à l'échelle régionale montre que les données sur les pratiques culturelles traduisant le comportement tactique de l'irrigant sont en général très simplifiées, non évolutive et rarement modélisées. Leur représentation est donc limitée pour la simulation de scénario.

### II.3.2 La représentation des pratiques culturelles à l'échelle régionale

Les pratiques des agriculteurs représentent « la manière dont les techniques sont concrètement mises en œuvre dans le contexte de l'exploitation mais aussi au sein d'une société locale, caractérisée par son histoire, son territoire et son fonctionnement » (Landais et Deffontaines, 1990). Le terme « pratiques culturelles » peut désigner l'intervention culturelle ou la manière de l'organiser. En effet, quand on parle de « pratiques culturelles », on peut entendre soit ce qui participe au processus de décision de réaliser une intervention technique plutôt qu'une autre (par exemple, intervention mécanique ou désherbage chimique pour l'entretien du sol), soit le processus de décision conduisant à l'acte technique lui-même à un moment donné, ce dernier étant alors caractérisé par une date et une modalité d'intervention (dose d'engrais ou d'herbicide, quantité d'eau d'irrigation, densité de semis etc.).

#### II.3.2.1 **Les problèmes méthodologiques posés par l'échelle régionale pour la représentation des pratiques culturelles**

Il n'existe pas de définition établie pour l'« échelle régionale ». Le terme échelle<sup>7</sup> peut porter à confusion mais est ici employé comme synonyme d'« étendue ». Par rapport aux questions agronomiques, l'échelle régionale ne correspond pas à une étendue de taille définie mais à une étendue où il est impossible d'avoir accès de manière exhaustive et précise aux informations concernant les systèmes techniques, en particulier, leur cohérence et leur organisation dans le territoire. C'est pourquoi on en parle parfois au pluriel (« échelles régionales »). Elle peut varier d'une centaine de kilomètres carrés à des milliers de kilomètres carrés et on peut y compter plusieurs centaines voire plusieurs milliers d'exploitations agricoles. On peut l'opposer à l'échelle locale, échelle à laquelle la cohérence des systèmes techniques peut être connue par enquête, et où l'effet de pratiques individuelles est nettement quantifiable.

A l'échelle régionale, les phénomènes étudiés relèvent généralement plus de processus économiques, ou des grands cycles écologiques, que des pratiques individuelles. Cependant, étant donnés les problèmes environnementaux ou ceux posés par la gestion des ressources renouvelables, les pratiques agricoles font de plus en plus partie des facteurs déterminants des phénomènes étudiés (Annexe 1). On est donc amené à les représenter dans les modèles de diagnostic ou de pronostic développés à l'échelle régionale : des modèles de culture appliqués sur des espaces hétérogènes (Faivre et al., 2004) et des modèles spatialisés développés par d'autres disciplines (hydrologie, climatologie, économie, etc.) mais nécessitant la description des pratiques culturelles en entrée pour réaliser des diagnostics ou tester des scénarios (Biarnès et al., 2004).

---

<sup>7</sup> Le terme « échelle » est peu précis et peut correspondre aux différentes notions d'étendue, de couverture ou de support, bien définies par Bierkens et al. (1990) et par Faivre et al. (2004). On définit l'« étendue » comme la surface sur laquelle porte l'étude : c'est la région, le bassin versant, le périmètre irrigué ou le territoire de l'exploitation. Cette étendue est elle-même divisée en un nombre fini de surfaces plus petites qu'on appelle « les unités de support ». C'est sur les unités de support qu'on acquiert de l'information ; mais toutes les unités de support ne sont pas nécessairement observées. Il s'agit, typiquement pour les modèles de culture, des unités considérées comme homogènes : les placettes ou les parcelles. Le « support » est la surface totale couverte par les unités de support. On appelle « taux de couverture » le rapport entre le support et l'étendue. Le terme « résolution » doit être utilisé avec précaution car il signifie parfois « support » et parfois « taux de couverture ». (d'après (Leenhardt, 2004))

A l'échelle régionale, quand on cherche à identifier et localiser la diversité des pratiques culturelles, l'acquisition de données ne peut raisonnablement se faire directement auprès de tous les agriculteurs (Biarnès et al., 2004) comme cela est fait à l'échelle locale (Joannon, 2004). Elle suppose le développement d'une méthodologie différente de celle reposant sur l'enquête approfondie en exploitation agricole. On parle de « spatialisation des pratiques culturelles ou des systèmes de culture ». Par ce terme, on entend l'identification des pratiques culturelles réalisées sur de vastes zones agricoles et l'estimation de leur distribution spatiale.

### **II.3.2.2 Les outils et démarches utilisés pour représenter les pratiques culturelles à l'échelle régionale dans les modèles**

Dans cette présentation des travaux développés, par « pratiques culturelles », on entend ici les cultures semées et les itinéraires techniques pratiqués. Comme il est impossible d'avoir l'information exhaustive, la représentation des pratiques culturelles dépend des moyens d'acquisition de données et des méthodes d'estimation utilisées pour interpoler, extrapoler ou désagréger les informations obtenues. En effet, même si certaines informations sont disponibles dans des bases de données administratives<sup>8</sup>, d'une part, elles sont, sauf exception, délivrées sous forme agrégée à l'échelle communale ou de la petite région agricole, d'autre part, elles ne sont pas systématiquement disponibles pour toutes les années.

Même si la distinction n'est pas toujours évidente, je distingue les modèles de diagnostic de ceux utilisés pour la simulation de scénarios. Dans les modèles de diagnostic, j'inclue les modèles de pronostic.

#### *II.3.2.2.1 Les modèles de diagnostic*

Pour faire un modèle de diagnostic, on cherche à représenter les pratiques culturelles d'une ou de plusieurs années passée ou de l'année en cours mais le diagnostic peut porter sur les années passées, en cours ou à venir dans le cas où l'impact des pratiques culturelles relève de processus lents (Bordenave et al., 2005).

Dans ce cas, pour renseigner l'occupation du sol, il est possible d'acquérir des informations via les différentes enquêtes administratives (fiches PAC par exemple). Des données de télédétection peuvent aussi être utilisées (Yun, 2003).

Concernant les itinéraires techniques, les informations disponibles sont plus difficiles à obtenir. Par exemple, l'enquête « pratiques culturelles » n'est réalisée que tous les 5 ans sur un échantillon de parcelles en France. Des simplifications sont donc faites en utilisant des calendriers d'interventions techniques basés sur des dires d'expert (Mignolet et al., 2004) ou des représentations du processus de décision en se basant sur quelques enquêtes auprès d'agriculteurs (Leenhardt et al., 2004a) ou d'experts (Leenhardt et Lemaire, 2002b). Enfin, la télédétection donne des indications sur les modalités et les dates auxquelles certaines interventions techniques sont réalisées (Guerif et Duke, 1998; Launay et Guérf, 2003) mais elle ne donne pas d'information sur l'itinéraire technique entier.

---

<sup>8</sup> Des recensements généraux agricoles (RGA) ont été réalisés en France en 1970, 1979, 1988 et 2000. L'enquête nationale « Ter-Uti » recense chaque année les cultures semées sur 550 000 points en France. Cet échantillon est identique chaque année ; il n'a été modifié qu'une fois en 1992. L'enquête « pratiques culturelles » permet le relevé de l'itinéraire technique pratiqué sur un échantillonnage de parcelles tous les 5 ans.

### II.3.2.2.2 *Les modèles développés pour la simulation de scénarios*

Dans les modèles développés à l'échelle régionale et inscrits dans des démarches prospectives, on cherche à prendre en compte des pratiques culturelles qui découlent d'un scénario.

Quand elle ne repose pas uniquement sur des données fictives définies par expertise par rapport à un objectif environnemental particulier afin d'évaluer leurs effets ex ante (Hartkamp et al., 2004), la représentation des cultures et itinéraires techniques implique le développement de modèles spécifiques.

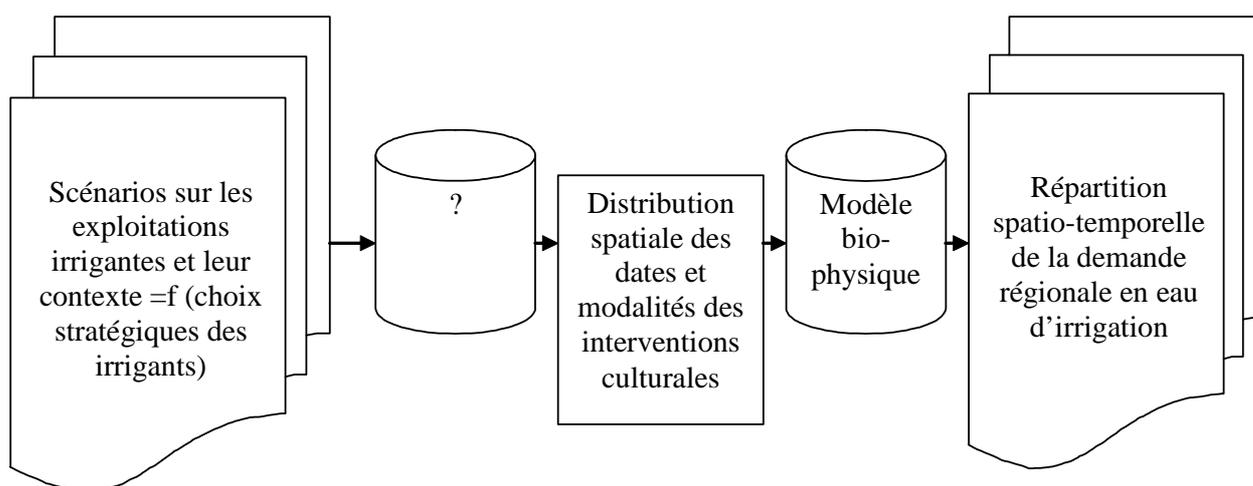
Pour connaître les assolements, il est possible d'utiliser des modèles statistiques, par exemple basés sur les chaînes de Markov (Mari et al., 2002). Ces modèles, développés à partir des données passées des enquêtes Ter-Uti, permettent d'estimer la probabilité de passage annuel d'une culture (ou d'un groupe de cultures) à une autre.

Les modèles micro-économiques peuvent également être utilisés. Par exemple, pour estimer les assolements semés dans deux régions du Royaume Uni, Rounsevell et al. (2003), utilisent un modèle micro-économique d'exploitation agricole basé sur la programmation linéaire. Ce modèle d'optimisation permet d'estimer l'assolement choisi par l'agriculteur en fonction des prix des cultures, et de données estimées en fonction de la localisation de l'exploitation : rendements potentiels simulés par un modèle de culture et contraintes agronomiques (temps disponibles pour les travaux, pénalités à semer certaines rotations, etc). La comparaison avec des données recensées par l'administration agricole montre que cette méthode est valide pour une analyse des réponses de l'usage des terres agricoles aux changements de contexte général. Cependant, le motif de cultures obtenu est plus distribué que dans la réalité. Ce type de modèle appartient à la lignée des modèles développés dans les programmes de recherche sur le changement d'usage des terres (Verburg et al., 1999; Verburg et Veldkamp, 2001). Les itinéraires techniques y sont représentés par des niveaux d'intrants limitant plus ou moins le rendement ne variant pas en fonction du contexte.

Enfin, des recherches sont menées dans le but d'estimer la distribution spatiale de pratiques culturelles à partir d'indicateurs géoréférencés (Biarnès et al., 2004). Dans ce cas précis, par « pratique culturelle », on entend le type d'intervention technique ou stratégie. Les surfaces cultivées sont connues et on ne cherche pas à déterminer les modalités des interventions. Actuellement les travaux reposent sur des combinaisons d'indicateurs à différents niveaux d'organisation afin de déterminer une « clef de spatialisation ». Ils se basent sur le fait que les pratiques culturelles résultent de décisions prises par les agriculteurs mais aussi d'autres acteurs variés selon le niveau d'organisation auquel on s'intéresse. Dans une analyse des pratiques de désherbage des viticulteurs d'un bassin versant de l'Hérault (France), différents niveaux d'organisation sont pris en compte (parcelle, exploitation, bassin de collecte). Les auteurs constatent que l'« appartenance à une commune » doit être prise en compte pour pouvoir expliquer les liens entre pratiques et exploitation (Biarnès et al., 2005).

## II.4 Définition de ma question de recherche

Afin d'estimer la demande régionale en eau d'irrigation, nous proposons d'estimer la distribution spatiale des dates et modalités des interventions culturelles en simulant les pratiques culturelles de irrigants et nous proposons de rendre cette estimation sensible aux choix stratégiques des irrigants et à leur environnement (contexte pédoclimatique, environnement socio-économique) (Figure 4).



**Figure 4 : Représentation schématique du modèle (3) et présentation du maillon manquant**

Dans le cas de la demande en eau d'irrigation, les pratiques culturelles conditionnent directement la dynamique temporelle du volume d'eau et le volume final consommé à travers les dates et les modalités des interventions de l'irrigant. De plus, leur répartition spatiale conditionne également le volume. Il est donc nécessaire de les identifier, de représenter leur répartition spatiale et d'estimer les dates et modalités d'interventions en découlant.

Etant donné notre but d'estimer les dates et modalités des interventions techniques en fonction d'un contexte décrit par la structure des exploitations et par leur environnement, je m'intéresse à la fois aux interventions culturelles et au processus conduisant au choix d'une intervention plutôt qu'une autre. J'emploie donc une définition large de « pratiques culturelles », englobant leur opportunité et leurs modalités.

Pour l'estimation de la demande en eau, nous faisons l'hypothèse qu'il est nécessaire d'avoir une bonne représentation de la distribution des pratiques sur l'étendue considérée : où les pratiques se rencontrent-elles ? Dans quelles proportions ? L'analyse des travaux réalisés sur l'identification de la distribution spatiale des pratiques montre qu'étant données les difficultés d'accès aux données, on est amené à développer une méthodologie spécifique.

Ma question de recherche est : « Comment représenter et simuler les pratiques culturelles à l'échelle régionale pour estimer la demande régionale en eau d'irrigation selon différents scénarios socio-économiques et climatiques ? »

Dans l'objectif de simuler des scénarios prospectifs, je propose de prendre en compte la diversité des pratiques des irrigants et de tenir compte de l'interdépendance existant entre les interventions culturelles pour en donner une représentation cohérente et utilisable dans la simulation des scénarios.

Pour le choix de tenir compte de l'interdépendance des pratiques culturelles, je m'appuie sur le principe de cohérence qui fonde les concepts de système de culture et d'itinéraire technique (Boiffin et al., 2002; Meynard et al., 2001; Sébillotte, 1990). Respecter ce principe de cohérence permet de prendre en compte de la façon dont l'agriculteur s'adapte à un changement de contexte. Par exemple, si le climat simulé ne permet pas un semis aux dates habituelles, il est possible que la suite de l'itinéraire technique change (variétés semées, dose de produits phytosanitaires, irrigation etc) et que certaines pratiques ne soient pas possibles en raison de contraintes organisationnelles nouvelles. Ainsi, je m'attacherai à décrire les liens entre les interventions culturelles pour décrire l'itinéraire technique.

Pour le choix de représenter la diversité des pratiques culturelles, je m'appuie sur la vision systémique de l'exploitation agricole (Bonneviale et al., 1989) qui souligne

l'interdépendance entre système de production et pratiques culturelles me permet de supposer qu'une diversité de systèmes de production implique une diversité de pratiques culturelles.

Ma question de recherche implique un certain nombre de sous questions :

- Comment identifier la diversité des pratiques culturelles ? Sur quelles données se baser ? Selon quels critères la définir ? Cherche-t-on à décrire des pratiques diverses par le niveau de consommation en eau qu'elles engendrent ou diverses par rapport aux éléments contextuels qui les déterminent?

On ne sait pas a priori si les pratiques culturelles des agriculteurs pour une culture donnée sont diverses ou non. Certains travaux montrent une certaine similitude dans les bases de raisonnement des agriculteurs. En effet, les agriculteurs reçoivent souvent des conseils de techniciens ou des bulletins d'informations tels que les avertissement d'irrigation par exemple qui proposent en général des règles simples et peu diverses d'adaptation des pratiques culturelles au contexte pédoclimatique et au type de l'exploitation. Par ailleurs, les travaux menés en sociologie révèlent une importante diversité des réactions des agriculteurs face aux dispositifs de gestion de l'eau et une diversité des représentations qu'ils se font de l'irrigation (Salles et al., 1999; Salles, 2003). Cette diversité de comportements des irrigants pourrait donc impliquer une diversité de conduite des cultures irriguées.

La définition même de ce que l'on entend par « pratique » conditionne ce sur quoi peut porter la diversité des pratiques. On peut s'intéresser soit à la diversité des types d'interventions (intervention mécanique, application de désherbant chimique ou mixte des deux types (Biarnès et al., 2004) soit à la diversité des dates d'intervention et des modalités pour un type d'intervention donné (doses d'engrais par exemple). Dans le cas où l'information concernant la date et les modalités d'intervention sont importantes pour le problème posé, ce qui est mon cas, on est amené à s'intéresser à la fois à la diversité des « modalités » et à la diversité des « opportunités » des pratiques.

- Comment formaliser les pratiques culturelles pour leur simulation ? A partir de quelles variables les décrire ?
- Comment estimer leur répartition spatiale et estimer leurs modalités ?

Enfin, la prise en compte de la diversité des pratiques ouvre sur une question sur la sensibilité de la demande en eau d'irrigation régionale à cette diversité. Rien n'indique l'importance de la diversité des pratiques ni son impact sur le volume d'eau d'irrigation nécessaire et sa répartition spatio-temporelle. On se demande alors quel devrait être le degré de précision d'estimation de la distribution spatio-temporelle des dates et modalités des interventions culturelles ? Ma thèse ne traite pas directement de cette question mais donne des éléments de réponse.

### III. DEMARCHE

#### Résumé

La démarche suivie durant ma thèse est le résultat d'une double contrainte résultant de l'étendue considérée: (i) la représentation la diversité des pratiques culturelles et (ii) la simplification de cette diversité. En effet, nous supposons d'une part, qu'il est nécessaire de prendre en compte la diversité des pratiques pour l'estimation de la demande en eau régionale selon différents scénarios d'évolution des exploitations irrigantes ; d'autre part, estimer la diversité des pratiques ainsi que leur distribution spatiale à l'échelle régionale pose des problèmes méthodologiques (notamment à cause de la collecte et de la disponibilité des données) qui conduisent à simplifier la réalité.

Deux choix méthodologiques ont été réalisés : le premier est de s'intéresser uniquement aux systèmes de cultures de maïs grain. Le second est de ne pas représenter l'ensemble des pratiques culturelles constituant l'itinéraire technique de maïs grain mais seulement les pratiques culturelles qui ont un impact important sur la demande en eau. J'ai donc travaillé (i) sur la pratique de semis qui inclut le choix de la précocité des variétés, la densité de semis et la surface semée et (ii) sur la pratique d'irrigation proprement dite. Afin de donner une représentation cohérente du système technique, les liens entre pratiques culturelles sont pris en compte.

La démarche est composée de 4 étapes :

- L'acquisition d'informations sur les pratiques culturelles et sur les exploitations agricoles. Cette étape repose sur la réalisation d'enquêtes de différents types pour l'acquisition de données.
- L'identification et la représentation de la diversité des pratiques. Cette étape est basée sur des analyses de données multivariées dans le but d'une part d'identifier les variables les plus discriminantes et les liens entre pratiques culturelles et d'autre part, d'identifier des indicateurs permettant d'estimer la distribution spatiale des pratiques culturelles.
- La création du modèle. Le modèle est conçu à partir des résultats de la deuxième étape. Il est conçu comme un ensemble de modules en cascade. Il permet de simuler les pratiques des agriculteurs (semis, choix de précocité, irrigation) en fonction de leur situation géographique et des caractéristiques de leur exploitation. Il produit, in fine, une estimation de la distribution spatio-temporelle des prélèvements d'eau par irrigation de la zone d'étude.
- L'évaluation du modèle. Elle est faite pour la sortie finale du modèle (la demande en eau d'irrigation) et pour des sorties intermédiaires du modèle (calendriers de semis).

### III.1 Les choix méthodologiques

La démarche de ma thèse est le résultat d'une double contrainte liée à la représentation de la diversité des pratiques culturales et à la simplification de cette diversité étant donnée l'échelle étudiée.

Selon Baudry et al. (1996), « *le nombre et la diversité des opérations techniques intervenant durant le processus de production conduisent à ne considérer souvent que celles qui ont un effet déterminant sur le problème environnemental étudié et à proposer une combinaison d'actes techniques qui ont un sens par rapport au modèle environnemental. Par exemple, la qualité de l'eau issue d'une parcelle agricole peut dépendre essentiellement du type de culture (qui laisse ou non le sol nu en hiver). Pour une culture donnée, les pratiques de fertilisation ou de traitements phytosanitaires peuvent intervenir d'avantage dans les fuites de nitrates que les pratiques du travail du sol* ». Nous nous inspirons de cette démarche pour la représentation des pratiques culturales tout en soulignant que l'estimation de la demande régionale en eau d'irrigation ne repose pas sur un « modèle environnemental » : la demande en eau des irrigants est directement le résultat des dates et des modalités des interventions techniques.

Trois simplifications ont été choisies. Il s'agit de nous focaliser sur la culture influençant le plus la demande en eau, le maïs grain, et pour cette culture, sur les interventions techniques ayant un effet déterminant sur la dynamique temporelle de la demande en eau et sur la quantité d'eau totale demandée. Nous avons choisi de nous intéresser à deux interventions techniques: le semis et l'irrigation.

#### III.1.1 Estimer la demande en eau d'irrigation régionale à partir de la demande en eau pour le maïs grain.

Ce choix est raisonné par rapport à deux éléments : le poids du maïs grain dans l'irrigation en France et le fait que cette culture irriguée catalyse les débats sur l'irrigation.

Le maïs est la culture dont dépend le plus la demande en eau d'irrigation. En France, le maïs grain et semence représente 50% des surfaces irriguées (Buisson, 2005) (Figure 5). Dans certaines régions, il représente plus de 60% des surfaces irriguées : 63% en Midi-Pyrénées et 69% en région Aquitaine (Levy et al., 2005). En Midi-Pyrénées, le Gers, le Tarn et Garonne et la Haute-Garonne concentrent les deux tiers des surfaces irrigables et le maïs y représente les trois quart de la sole irriguée (Levy et al., 2005). Parmi les systèmes de culture intégrant le maïs, la monoculture de maïs grain domine largement. La monoculture traduit des motivations technico-économiques orientées vers la production irriguée. C'est donc sur ce type de système de culture que se focalise mon travail.

En dehors du fait qu'actuellement la demande en eau de ces régions dépend essentiellement de l'irrigation du maïs grain, il est probable que son évolution dans les années à venir en dépendra encore plus. En effet, l'avenir du maïs irrigué fait l'objet d'un réel débat. Par exemple, lors du débat public organisé en 2003 dans le cadre du projet de création du réservoir de soutien d'étiage à Charlas, les discussions ont essentiellement portées sur l'évolution de l'agriculture et la place du maïs irrigué dans le paysage agricole. Devant les changements à venir du contexte agricole, les avis sont contradictoires sur le fait que les agriculteurs continueront le maïs grain irrigué. Les calculs prenant en compte l'évolution des contraintes sur le revenu de l'hectare de maïs irrigué concluent à une diminution de 45% du revenu à l'hectare (Arvalis-Institut du végétal, 2004) (Annexe 2). Des études sur l'impact du découplage des aides concluent à une régression importante du maïs dans les régions irriguées

au profit de l'herbe (CNCER, 2003). Mais certains agriculteurs et dirigeants de coopératives (Désangle, 2004) pensent que les agriculteurs très spécialisés, dont le système d'irrigation n'est pas complètement amorti continueront à produire du maïs irrigué dans les mêmes proportions et à bénéficier d'une filière bien organisée. A cette occasion, certaines associations environnementales ont prôné une réduction de 15% des surfaces de maïs et demandent la mise en place d'aides publiques pour les maïsiculteurs qui arrêteraient d'irriguer (Solagro, 2003).

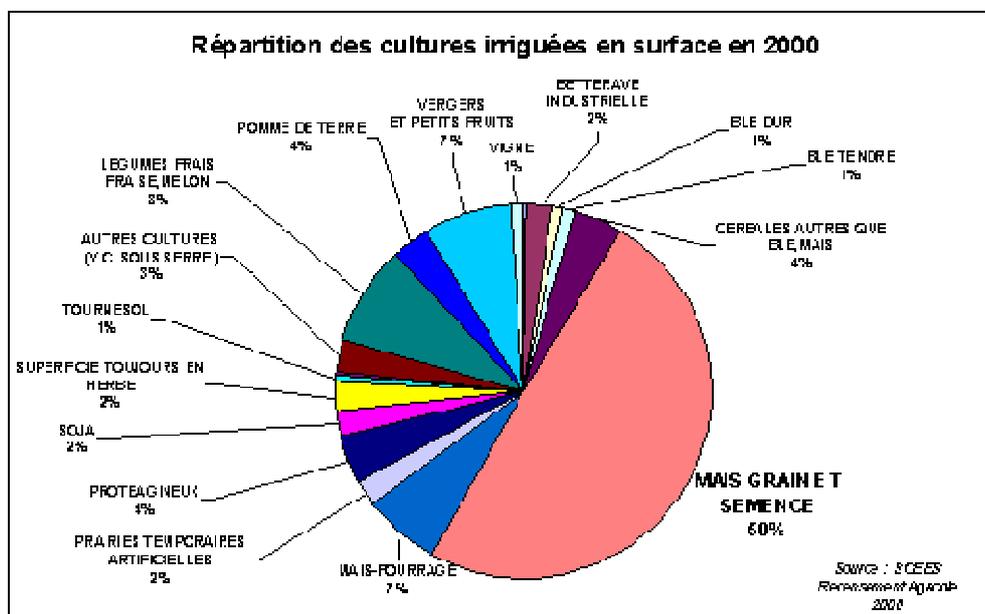


Figure 5: Répartition des cultures irriguées en France en 2000.

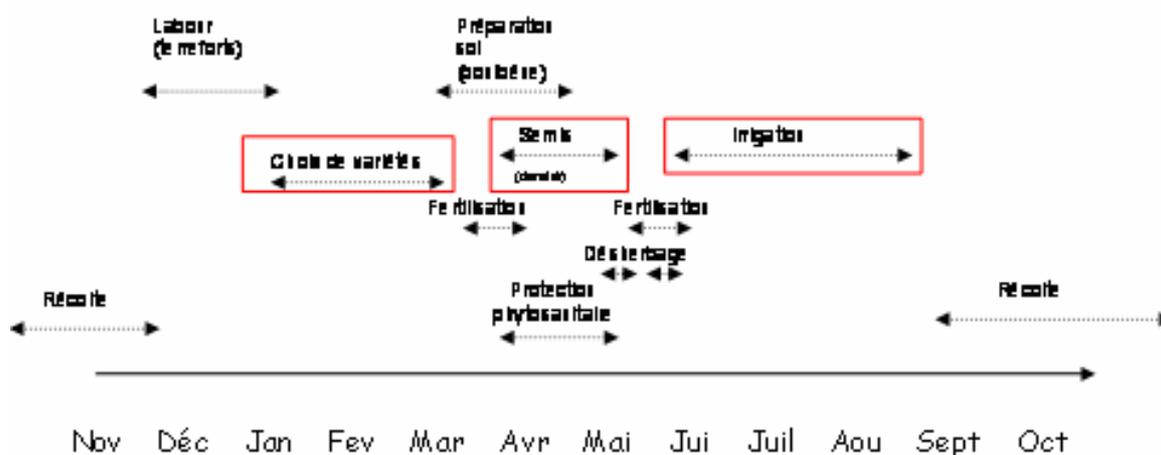
### III.1.2 Décrire l'itinéraire technique à partir des pratiques culturales ayant le plus d'influence sur la demande en eau

L'irrigation et le semis sont deux interventions techniques ayant une influence majeure sur la quantité d'eau totale apportée à la plante et la dynamique de ces apports à l'échelle parcellaire. J'ai donc choisi de représenter l'itinéraire technique de maïs à partir de ces deux interventions. Dans la pratique du semis, j'inclue le choix de la précocité des variétés et de la densité de semis. La diversité des autres pratiques culturales (préparation du sol, fertilisation, désherbage, récolte) n'est pas directement analysée mais ces autres pratiques peuvent être prises en compte pour l'analyse des pratique de semis et d'irrigation (Figure 6).

L'irrigation a un effet direct et évident sur la demande en eau. La demande en eau est en effet égale à la quantité d'eau d'irrigation que l'on souhaite apporter pendant la campagne d'irrigation. C'est pourquoi l'objectif de notre travail est de prédire les apports d'eau d'irrigation à l'échelle individuelle pour pouvoir, par agrégation, prédire la demande régionale en eau d'irrigation. L'irrigation est un acte technique qui implique, pour le maïs grain, des interventions répétées au cours de la campagne culturale. Il peut y avoir une irrigation après le semis, pour favoriser la levée du maïs. Puis, la période d'irrigation proprement dite, ou « campagne d'irrigation » commence. Avant la période d'irrigation, l'irrigant décide d'un calendrier prévisionnel d'irrigation (Deumier et al., 1995): il prévoit la date de démarrage de l'irrigation sur les différentes parcelles (en général en juin ou juillet), la durée des tours d'eau<sup>9</sup>, une période d'arrêt ou non entre les tours d'eau, la dose à apporter par tour d'eau, des

9

arrêts en cas de pluie, la reprise après un évènement pluvieux et l'arrêt définitif (en général en août ou en septembre). En cours de campagne, l'agriculteur applique son plan d'action en fonction des évènements de l'année (état de la culture, ressource en eau, météorologie).



**Figure 6 : L'itinéraire technique maïsicole (source : Arvalis). Nb : les pratiques culturelles analysées dans ma thèse sont entourées.**

Le semis a un effet moins direct que celui de l'irrigation sur la demande en eau d'irrigation pendant une campagne culturale mais il est également très important puisque les dates de semis conditionnent la période des besoins en eau des plantes. L'Encadré 1 explique en quoi, théoriquement, le type de précocité de la variété et les dates de semis ont un impact sur les besoins en eau des plantes et ainsi, sur l'irrigation. En pratique, ne pas intégrer la variabilité intra et interannuelle des dates de semis à des modèles de gestion peut conduire à de mauvaises estimations de la demande en eau (Leenhardt et Lemaire, 2002b). La profession agricole fait des propositions basées sur un ajustement date de semis/précocité variétale pour réduire les consommations en eau ou décaler cette consommation à une période moins critique. Des stratégies dites « d'évitement », basées sur le semis de variétés plus précoces semées tôt dans l'année, sont actuellement expérimentées dans le but de proposer des itinéraires techniques adaptés à des contraintes hydriques de plus en plus fréquentes en fin de cycle du maïs (Ehrhard et al., 2006; Lorgeou et al., 2006; Omnès, 2004).

**Encadré 1: Données écophysiologicalues sur l'impact de la date de semis et de la précocité variétale sur les besoins en eau du maïs**

La date de semis marque le début du cycle cultural. Ses effets sur le rendement du maïs sont bien connus : globalement, pour une même variété et pendant la période possible de semis, plus le maïs est semé tard, moins le rendement est important (Fleury, 1986). En conditionnant la place du cycle cultural dans le calendrier, la date de semis conditionne le

niveau de besoin en eau de plante et la période à laquelle surviennent ces besoins. Elle conditionne donc a priori la période où aura lieu l'irrigation et les doses d'eau apportées.

La précocité d'une variété détermine les dates des différentes phases du cycle de la plante une fois la date de semis donnée. Comme les vitesses de développement et les durées des phases de croissance du maïs sont des caractéristiques génétiques et sont bien représentées par la somme de degrés-jours en base 6, la précocité peut être traduite par un indicateur climatique, les sommes de températures. Cet indicateur climatique permet de mettre en relation le choix de précocité et l'offre climatique d'une région donnée (AGPM-TECHNIQUE, 2002; Darracq, 1996). Dans les catalogues de variétés, cet indicateur est donné pour deux phases du cycle de la plante : (1) du semis à la floraison femelle et (2) du semis à la maturité physiologique du grain. La durée semis - floraison dépend du nombre de feuilles de l'hybride. Les précocités diffèrent essentiellement par leur nombre de feuilles : les variétés dites « tardives » ont plus de feuilles (18 à 22) que les variétés dites « précoces » (15 à 17). Leur indice foliaire est donc plus important ce qui leur confère une efficacité d'interception du rayonnement plus grande permettant une plus forte captation du rayonnement. Il en découle d'une part une surface évapo-transpirative plus grande, mais également une biomasse (potentiel de rendement) plus importante. Les besoins en intrants (eau, azote) sont alors plus importants. Ainsi, plus la variété est tardive, plus ses besoins en eau sont élevés. Enfin, pour deux variétés de précocités différentes, semées à la même date et recevant les mêmes sommes de températures, la floraison a lieu plus tard pour la variété tardive. Comme c'est au moment de la floraison femelle que la plante est la plus sensible au stress, on peut supposer qu'il y aura un décalage temporel du pic de besoins en eau entre deux précocités différentes semées dans les mêmes conditions (Girardin P., 1998). L'ensemble de ces données physiologiques laisse prévoir que, au sein d'un périmètre irrigué, la demande en eau agricole dépend des précocités semées par les maïsiculteurs.

La densité de semis fait partie des choix techniques souvent directement lié à la variété ou à son groupe de précocité et à l'irrigation (Darracq, 1996). Plus une variété est tardive, moins sa densité est choisie élevée en théorie. La densité d'un maïs irrigué est généralement choisie supérieure à celle d'un maïs non irrigué. Quand le maïs est irrigué, une modulation de la densité peut avoir un effet sur les besoins en eau du peuplement et ainsi sur la conduite de l'irrigation.

### III.1.3 Considérer la sole de maïs grain comme une « unité de gestion »

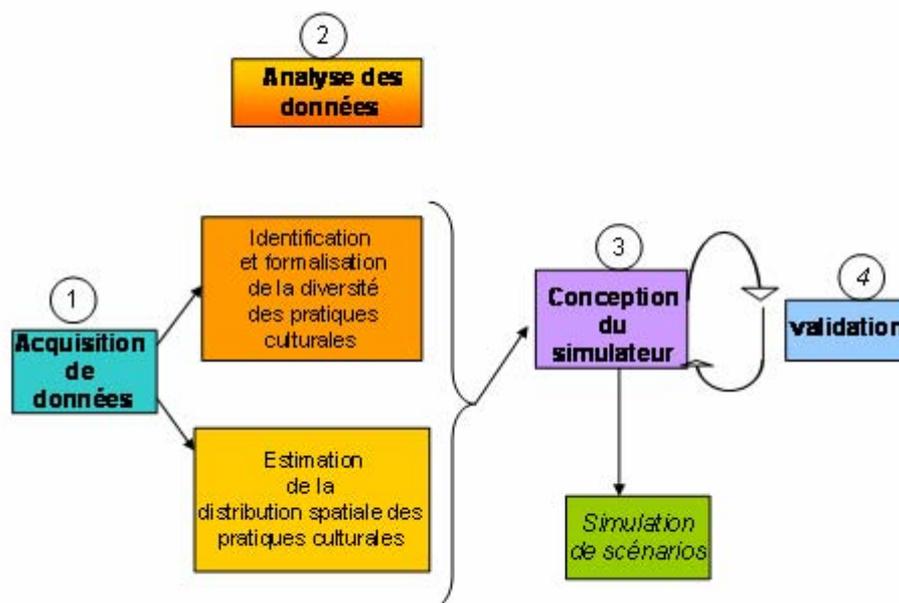
Pour décrire, à l'échelle régionale, les pratiques culturales de semis et d'irrigation au sein des systèmes de culture de maïs grain irrigué, je m'appuie sur les travaux de (Aubry et al., 1998a) portant sur la constitution des systèmes de culture et sur la gestion d'une sole dans l'exploitation. Je fais ainsi l'hypothèse que l'ensemble des parcelles de maïs grain irrigué (la sole) constitue une unité de gestion.

Cette hypothèse revient à considérer qu'il n'y a qu'un seul système de monoculture de maïs grain au sein de chaque exploitation agricole. Cela ne veut pas dire que je considère que toutes les parcelles reçoivent les mêmes opérations aux mêmes dates : dans la description des pratiques, je vais considérer des règles concernant la gestion différenciée des différentes parcelles (ordre des parcelles, modalités d'intervention identiques ou non etc.). Dans sa thèse, Soggiu (1999) montre que les maïsiculteurs pratiquent les mêmes itinéraires techniques sur les parcelles d'un même îlot de culture, c'est-à-dire un ensemble de parcelles contiguës, même si ces parcelles ont des formes ou des tailles différentes. Ainsi, selon ce travail, le maïsiculteur prend en compte les caractéristiques de l'îlot de culture plutôt que celles de chacune des parcelles de l'îlot. Je propose donc de déterminer des règles de gestion différenciée des îlots

de culture et non des parcelles. Par rapport à l'irrigation, cela revient à simplifier les différences de pratiques d'irrigation pouvant exister quand il y a plusieurs blocs d'irrigation (surface cultivée avec une culture, irriguée par un matériel et une même ressource) sur l'exploitation.

### III.2 Les grandes étapes du travail

Mon travail de thèse suit une démarche en quatre étapes (Figure 7). Il s'agit d'une démarche exploratoire : les résultats d'une étape conditionnent l'étape suivante.



**Figure 7: Les principales étapes de la thèse.**

La première étape est l'acquisition de données sur les pratiques culturelles et les exploitations agricoles. Les enquêtes et les données mobilisées sont présentées dans la partie Matériel et Méthodes. L'organisation temporelle des différentes enquêtes y est également présentée.

La seconde étape est l'analyse des données. Elle a un double objectif : identifier la diversité des pratiques culturelles des maïsiculteurs irrigants, de les formaliser à partir de variables pertinentes et rechercher comment estimer leur distribution spatiale.

→ Cette étape est présentée à travers les trois premiers chapitres de résultats.

La troisième étape est l'élaboration du modèle. Elle est basée sur les résultats de la deuxième étape et consiste en l'élaboration et l'implémentation informatique d'un algorithme permettant de représenter l'impact des pratiques de semis et de choix de précocité et des pratiques d'irrigation sur la demande en eau et d'estimer la répartition spatio-temporelle de la demande en eau régionale. Le modèle est conçu comme un ensemble de modules en cascade : les sorties d'un module créent les entrées du module suivant. Les choix de modélisation sont présentés dans la partie Matériel et Méthodes.

La quatrième étape est l'évaluation du modèle.

→ Les troisième et quatrième étapes sont présentées dans le quatrième chapitre de la partie Résultats.

La simulation de scénarios n'est pas traitée dans ma thèse mais je donne quelques pistes sur la structure des scénarios pouvant être simulés avec ce modèle dans la discussion générale de la thèse.

## IV. MATERIEL ET METHODES

### Résumé

Dans cette partie, je présente la zone d'étude, les enquêtes et les données mobilisées, les analyses de données utilisées et les choix de modélisation.

La zone d'étude est la zone de la Baise-Amont, un bassin versant irrigué de 500 km<sup>2</sup> situé dans le système Neste dans le sud-ouest de la France. C'est une zone agricole essentiellement tournée vers la production de maïs grain irrigué, qui, sans être fortement limitée en eau du fait d'un système de réservoirs et de canaux, connaît régulièrement des restrictions d'usage de l'eau.

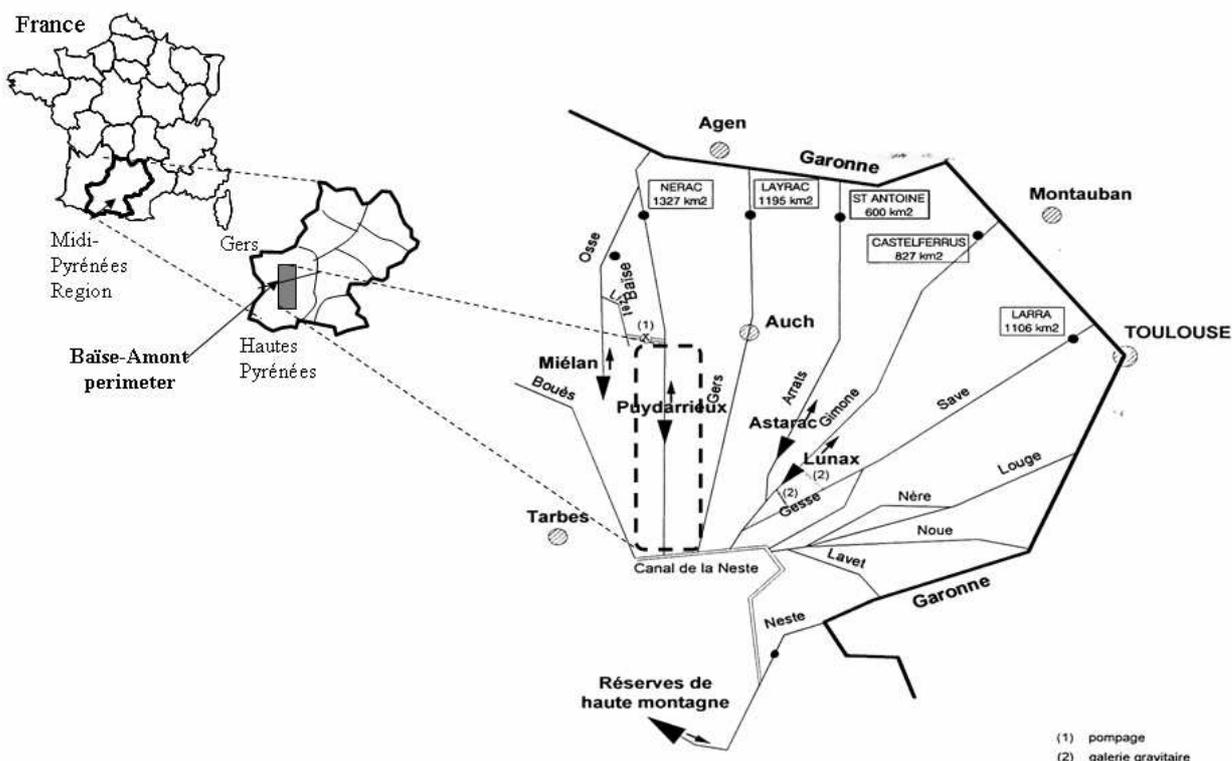
Plusieurs enquêtes ont été utilisées pour obtenir des données qui ont conduit à l'élaboration du modèle. Une enquête particulière a été menée pour la validation du modèle. Les enquêtes sont de deux types : des questionnaires par voie postale auprès de l'ensemble des irrigants de la zone d'étude et des entretiens auprès de groupes d'agriculteurs et d'organismes d'approvisionnement et de collecte de la zone. Par ailleurs, des données provenant de sources différentes (DATAGRESTE, METEO-France, CACG, expertise) ont été mobilisées pour compléter l'analyse des données d'enquêtes et permettre les simulations.

Pour identifier les pratiques culturelles, les liens entre elles et leur diversité tout en simplifiant cette dernière, les analyses de données sont essentiellement de type multivarié suivies par des classifications ascendantes hiérarchiques dans le but d'établir des typologies. Pour identifier des indicateurs permettant d'estimer la distribution des pratiques, des analyses multivariées, régressions linéaires multiples et des arbres de régression et de classification ont été mobilisés.

Les choix de modélisation portent sur le formalisme pour décrire les pratiques culturelles et sur les outils de simulation. Un formalisme à base de règles de décision du type « Si [indicateur][opérateur][seuil] Alors [action] » a été choisi.

#### IV.1 Le terrain d'étude

Le terrain d'application de ma recherche est un bassin versant de 572 km<sup>2</sup> en Midi-Pyrénées : le bassin versant de la Baïse Amont. Ce terrain a été choisi car c'est une unité de gestion pilote pour la Compagnie d'Aménagement des Coteaux de Gascogne (CACG): des travaux communs entre l'INRA, SCOT, METEO-France et la CACG visant à améliorer le modèle de gestion stratégique de la CACG ont été menés dans le cadre du projet ADEAUMIS en 2001 et 2002 (Leenhardt et al., 2004a; Leenhardt et al., 2004b). Des données sur la zone sont donc disponibles.



**Figure 8: Localisation de la zone de la Baïse Amont en France et au sein du système Neste.**

Ce bassin versant est un des bassins versants situés au sein du système Neste, vaste réseau hydrographique recouvrant 8000 km<sup>2</sup> géré par la CACG (Figure 8). Le canal de la Neste permet de dériver une partie des eaux de la rivière Neste réalimentée par des barrages de hautes montagnes au profit de la Gascogne dont les écoulements naturels sont quasi nuls en période estivale. Ce système de rivières réalimentées doit principalement satisfaire trois besoins : l'irrigation de 50 000 hectares, l'alimentation en eau potable pour environ 200 000 habitants et le soutien d'étiage des rivières (Hurand et Tardieu, 1998).

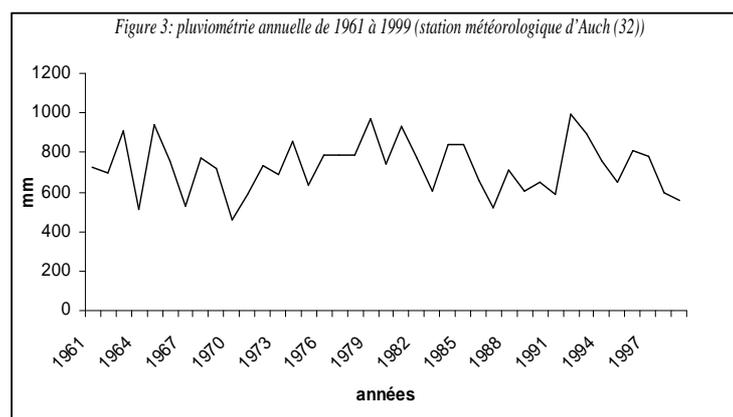
La zone de la Baïse Amont représente 10% en superficie de l'ensemble du système Neste géré par la CACG. Le réseau hydrographique est orienté Sud Nord ; les principaux axes (la Baïse Darré, la Baïsole, la petite Baïse et la grande Baïse) sont réalimentés depuis le Canal de la Neste et la retenue de Puydarieux sur la Baïsole (Figure 8)

On peut distinguer trois grands ensembles géomorphologiques au sein de la zone: une zone de piémont au sud correspondant au plateau de Lannemezan -région où prennent leur source les rivières de Gascogne, une zone d'alternance de vallées et de coteaux peu accidentés au centre et une zone de coteaux accidentés au nord (Penalver et Longueval, 1999).

Au sein de cette zone rurale, les principaux usages de l'eau sont l'irrigation et le soutien d'étiage. Il n'y a pas de préleveurs industriels, ni de prise d'alimentation en eau potable (AEP). Les usagers agricoles (ou irrigants) s'approvisionnent en eau à partir des rivières réalimentées gérées par la CACG et/ou à partir de retenues collinaires. Ceux contractant avec la CACG représentent la grande majorité des irrigants. Ils peuvent être regroupés en trois catégories de préleveurs (Trouvat et al., 2002):

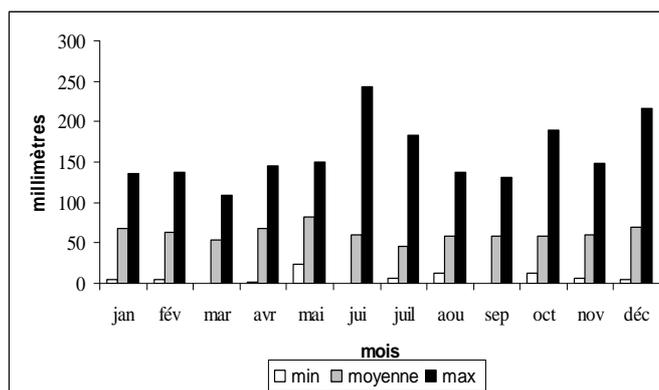
- irrigants individuels qui pompent directement dans une rivière réalimentée avec leur propre équipement. Ils disposent d'une convention de restitution et la facturation de leur consommation est forfaitaire.
- irrigants regroupés en association syndicale autorisée (ASA), prélevant depuis un réseau collectif sous pression. C'est l'ASA qui dispose d'une convention de restitution. Le coût de l'eau est ventilé par l'ASA entre chaque irrigant.
- irrigants prélevant depuis un réseau collectif géré par la CACG au titre de Concession d'état. Des compteurs sont installés à chaque borne de distribution et l'eau est facturée au prorata de la consommation réelle (en m<sup>3</sup>) ; les charges de fonctionnement du réseau sont incluses dans le coût de l'eau pour chaque irrigant. Pour chaque Concession, il existe un quota à ne pas dépasser sur l'ensemble de la Concession.

En 2002, 335 irrigants étaient raccordés à des réseaux en Concession d'état et 203 contrats étaient signés en convention de restitution.



**Figure 9: Pluviométrie annuelle de 1961 à 1999 (Auch (32)).**

Le bassin versant subit une importante variabilité climatique interannuelle. Sur une chronique de 39 ans sur la station d'Auch (32) située au nord de la zone, la pluviométrie annuelle varie de 556 à 995 mm, avec une moyenne de 727 mm (Figure 9). Cette moyenne est proche de la pluviométrie annuelle moyenne du système Neste entier (750 mm).



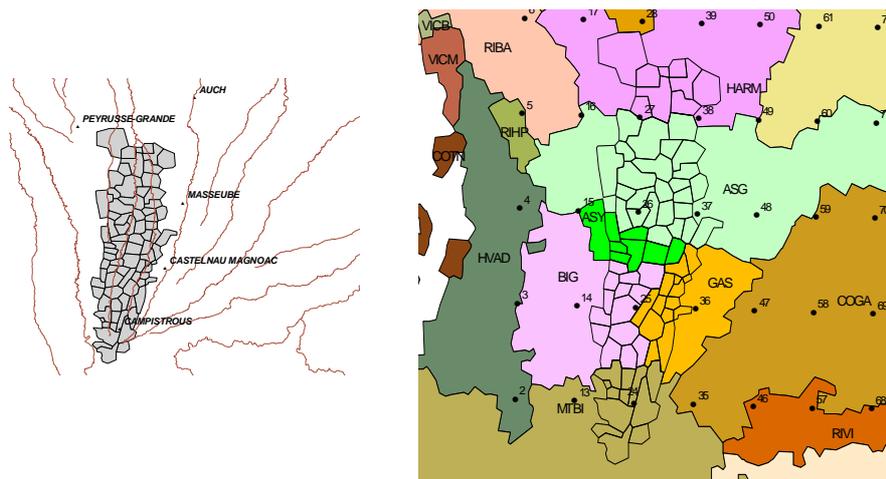
**Figure 10: Pluviométrie mensuelle (moyenne, max, min) sur une série climatique de 39 ans (Auch(32)).**

La pluviométrie mensuelle moyenne sur une série de 39 ans est de 50 mm mais elle présente une variabilité très importante : valeurs minimales proches de 0 ou nulles et valeurs maximales dépassant largement les 100 mm (Figure 10). Pendant les mois d'été, la pluviométrie moyenne est plus faible et présente une variabilité encore plus importante que pendant les autres mois de l'année.

La variabilité climatique est également spatiale. Dans la partie sud de la zone, le plateau de Lannemezan reçoit en moyenne 1200 mm chaque année soit près de 500 mm de plus en moyenne qu'au nord de la zone (Auch). L'analyse d'une série climatique de 32 ans sur trois stations climatiques situées sur un axe nord-sud au sein de la zone montre qu'en moyenne, la pluviométrie est plus importante de 90 mm au sud qu'au nord de janvier à juin. D'après une étude fréquentielle climatique réalisée à partir de données historiques de 1971 à 2001, la médiane des sommes de température en base 6 s'échelonnent de 1675 à 2200 °C j pour la période du 21 avril au 31 octobre du sud au nord de la zone (Lorgeou et Souverain, 2003).

Administrativement, la zone s'étend sur deux départements : le Gers et les Hautes-Pyrénées et est recoupée par 5 Petites Régions Agricoles (PRA) : Haut Armagnac (HARM), Astarac du Gers (ASG), Astarac des Hautes-Pyrénées (ASY), Coteaux de Bigorre (BIG), les Coteaux de Gascogne (GAS) (Figure 11).

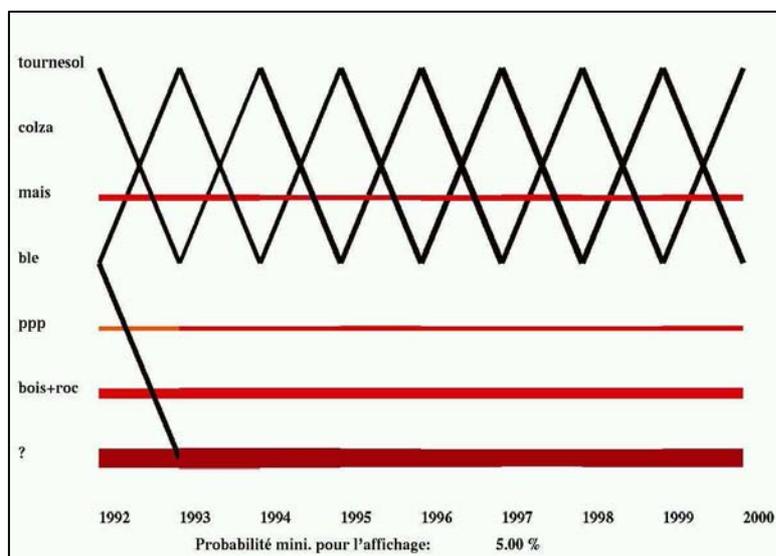
Les PRA sont des subdivisions des Régions Agricoles, unités définies par des critères d'homogénéité agro-pédo-climatique et respectant les limites administratives des départements (Klatzmann, 1955). La surface agricole utile (SAU) de la zone représente environ 35 500 ha. D'après une estimation réalisée à partir des données du recensement général agricole de 2000, 11 468 ha ont été irrigués au moins une fois en 2000 (soit 32% de la SAU) et 80% des surfaces irriguées étaient occupées par du maïs grain. Cela représentait environ 530 exploitations (Source : RA2000 (Agreste, 2002)).



**Figure 11: Présentation du découpage communal de la zone et des petites régions agricoles (PRA)**

Les deux systèmes de culture largement dominant sont la monoculture de maïs irrigué et une rotation blé/tournesol. (Figure 12 d'après Mari et Leenhardt, 2005 in (Leenhardt et al., 2005)). Concernant les productions irriguées, la zone est orientée vers la production de maïs grain. Les exploitations irrigant le maïs sont principalement de 2 types : « polyculture élevage » et « grande culture ».

On trouve principalement deux types de sols: des sols à dominante argilo-calcaire nommés « Terreforts » et des sols à dominante limoneuse plus ou moins hydromorphes selon la profondeur de la couche d'argile, nommés « Boulbènes ». Selon les exploitations agricoles, les deux types de sols peuvent être présents ou non, et en proportions très variables.



**Figure 12: Probabilités de passage d'une culture (ou groupe de cultures) à une autre.** Diagramme issu du programme HMM appliqué aux données Ter-Uti des départements du Gers et des Hautes-Pyrénées sur la période 1992-2000. Les cultures sont en ordonnées, les années en abscisse. Le symbole « ? » signifie « toutes les autres occupations du sol » et « ppp » prairie permanente. Les cultures apparaissent si leur probabilité d'existence est au minimum 5%. Les monocultures sont représentées en rouge, les rotations en noir.

## IV.2 Les données utilisées

La représentation des pratiques culturales à l'échelle régionale dépend des données auxquelles il est possible d'avoir accès et du traitement des données disponibles. A l'échelle régionale, les données sont essentiellement obtenues par l'intermédiaire d'enquêtes. Dans le

travail de thèse, des données ont été recueillies par des enquêtes sur le terrain d'application, mais aussi à partir de requêtes de bases de données provenant des services statistiques agricoles régionaux et départementaux ou à partir de données commerciales des organismes d'approvisionnement et de stockage.

Les données recueillies concernent les stratégies de conduite du semis et de l'irrigation ainsi que les éléments pouvant expliquer ces stratégies.

#### IV.2.1 Les données d'enquêtes

Deux types d'enquêtes ont été réalisés :

##### IV.2.1.1 **Des questionnaires par voie postale**

Ce type d'enquête a été envoyé en 2000, 2001, 2003 et 2005 à l'ensemble des irrigants contractant avec la CACG dans la zone, ce qui représente 92% des irrigants de la zone. Sont alors inclus tous types d'irrigants : particuliers ayant une borne pour leur jardin mais aussi agriculteurs ne produisant pas de maïs. En utilisant la liste de clients de la CACG, nous contactons donc une population plus importante que nécessaire mais nous ne recueillons pas de données sur les agriculteurs indépendants de la CACG, c'est-à-dire ceux qui utilisent l'eau d'une ressource privée de type lac collinaire.

Avec ce type d'enquêtes, la sélection des exploitations agricoles enquêtées ne dépend pas d'un mode d'échantillonnage particulier mais de la participation des agriculteurs. Le taux de retour permet d'évaluer cette participation et de définir la représentativité de l'enquête. Les questionnaires ont été conçus essentiellement avec des questions fermées afin de faciliter la participation des personnes enquêtées et l'analyse (Gouet, 1978). Les données recueillies par questionnaire peuvent être de nature variées, c'est-à-dire qu'elles peuvent permettre de recueillir des données factuelles mais aussi des données représentant un avis ou un ressenti. Néanmoins dans notre cas, nous n'avons récolté que des données factuelles.

Trois groupes de questionnaires ont été utilisés:

- Des questionnaires envoyés en 2000 et 2001 (avant ma thèse) pour recueillir des données sur les dates de semis des cultures d'été, les variétés et les surfaces semées à chaque date ainsi que le type d'exploitation (Grande culture ou Polyculture élevage), la main d'oeuvre et le nombre de vaches en cas d'élevage bovin allaitant (Leenhardt et Lemaire, 2002b). (Annexe 3). J'ai pu utiliser ces données.
- Un questionnaire envoyé en juin 2003 (Annexe 4). Issu des analyses des données des questionnaires précédents, son objectif était spécifique à la thèse : recueillir deux grands types de données. D'une part, pour le maïs grain, les dates de semis, et pour chaque date, la précocité de la variété semée, la densité de semis, le type de sol, l'emplacement topographique de la parcelle et la surface semée. D'autre part, des données permettant de décrire le système de production de l'exploitation: main d'œuvre, détail des productions végétales et animales, ressource en eau et matériel d'irrigation.
- Un questionnaire envoyé en 2005 (Annexe 5). Son objectif, également spécifique à la thèse, était de récolter un jeu de données de validation du modèle. Il a permis de recueillir trois types de données: des données sur le système de production des exploitations produisant du maïs grain irrigué, des données sur l'organisation du chantier de semis et des données concernant l'itinéraire technique du maïs grain irrigué.

Pour l'envoi des questionnaires 2003 et 2005, j'ai utilisé la liste des clients de la CACG dans la zone datant de 2003. Le questionnaire 2003 a été envoyé par la CACG elle-même et a

permis ainsi un transfert d'informations auprès des usagers sur les résultats des enquêtes 2000 et 2001 tandis que le questionnaire 2005 a été envoyé au nom de l'INRA. Etant donné le faible taux de retour pour ce dernier à l'automne 2005, le recueil des données de ce questionnaire s'est essentiellement fait par téléphone auprès des 55 agriculteurs ayant préalablement accepté de participer à l'enquête. Pour les appels téléphoniques, j'ai été aidée par quelques étudiants du DAA Système de Production, Environnement et Territoire de l'ENSAT.

#### **IV.2.1.2 Des entretiens**

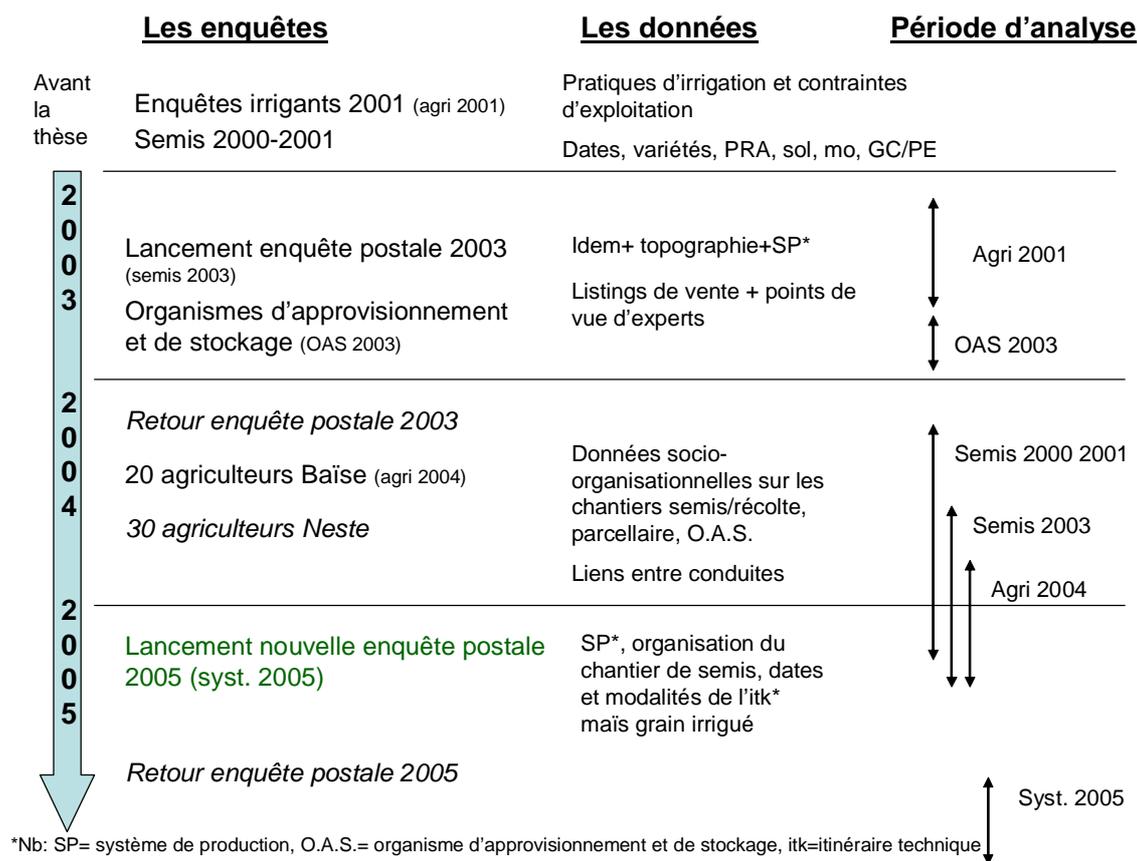
En sciences humaines, l'entretien s'inscrit dans une démarche méthodologique bien distincte de celle du questionnaire. C'est une méthode de production de données verbales quand on ne connaît pas la cohérence entre les informations recherchées, ceci auprès d'individus ou de groupes restreints (Blanchet et Gotman, 1992). Dans le cadre de ma thèse, les entretiens réalisés ont été essentiellement utilisés pour recueillir des données. Par exemple, les entretiens réalisés auprès des organismes d'approvisionnement et de stockage ont eu pour objectif d'identifier précisément leurs pratiques de conseil mais n'ont pas été analysés par des méthodes propres aux sciences humaines (analyse lexicale par exemple).

Trois séries d'entretiens ont été menées et analysées avant et au cours de la thèse :

- Un premier groupe d'entretiens basé sur des questionnaires semi-ouverts et ouverts mené en 2001 a été utilisé pour l'identification des pratiques d'irrigation et la recherche de clés de spatialisation de ces pratiques. Ces enquêtes sur l'irrigation, réalisées avant la thèse par trois étudiants dans le cadre d'un projet Pour et Sur le Développement Régional (Bergez, 2003), comportaient trois volets : un volet technico-agronomique, un volet économique et un volet sociologique.
- J'ai mené un deuxième groupe d'entretiens basés sur un questionnaire semi-ouvert en 2003 auprès de techniciens ou dirigeants d'organismes d'approvisionnement et de stockage afin de connaître l'organisation de la vente des semences de maïs grain, les conseils apportés aux maïsiculteurs et la connaissance experte des techniciens sur les pratiques des maïsiculteurs irrigants (Annexe 6). Des listings de vente des variétés de maïs de certaines coopératives ont été obtenus.
- Un troisième groupe d'enquêtes, auprès de 20 maïsiculteurs de la zone, a eu lieu en 2004 (Annexe 7). Les agriculteurs ont été choisis en fonction de leur localisation géographique, de leur organisme d'approvisionnement en semences et de leur adhésion ou non à une CUMA pour le semoir. Ces enquêtes m'ont permis d'avoir une meilleure connaissance de la zone, d'avoir accès à certaines justifications sur les pratiques et d'acquérir des données techniques sur l'organisation des chantiers de semis. J'ai mené cette enquête avec l'aide d'un stagiaire de licence de l'ENFA (Soulé, 2004) .

#### **IV.2.1.3 Le statut des différentes enquêtes et la temporalité de leur analyse**

La Figure 13 présente un résumé des différentes enquêtes analysées dans le temps de la thèse, les données recueillies et précise la temporalité des analyses menées.



**Figure 13: Les enquêtes menées et ou analysées pendant la thèse**

Concernant la conduite du semis, les données d'enquêtes postales de 2000 et 2001 (semis 2000 2001) et auprès des organismes d'approvisionnement et de stockage (OAS 2003) nous permettent d'émettre des hypothèses. Les données d'enquêtes de 2003 (semis 2003), complétées par les données d'enquêtes auprès d'agriculteurs en 2004 (agri 2004) permettent de valider ces hypothèses. Concernant la conduite de l'irrigation, les connaissances de mon équipe de recherche m'ont permis d'adopter une démarche déductive directement à partir des données d'enquêtes menées en 2001 (agri 2001). L'ensemble des analyses a permis de concevoir un modèle que j'ai implémenté informatiquement. L'enquête postale 2005 (syst. 2005) a permis de recueillir des données permettant d'estimer la qualité prédictive de ce modèle élaboré à partir des enquêtes précédentes.

#### IV.2.2 Les données non issues d'enquêtes réalisées dans le cadre de la thèse

Des données provenant d'autres sources d'information que les enquêtes ont également été mobilisées dans la démarche de thèse afin de :

- juger de la représentativité des données d'enquêtes ;
- analyser les données d'enquêtes;
- constituer des données d'entrée ou de validation du modèle.

Il s'agit principalement de quatre groupes de données : (i) les données concernant les exploitations agricoles provenant des services administratifs de statistiques agricoles (DATAGRESTE) et en particulier du recensement général agricole de 2000, (ii) des données météorologiques en point de grille provenant de METEO France et des caractéristiques pédologiques de la zone de la Baïse Amont provenant de la CACG ,(iii) de données

d'expertise recueillies notamment auprès de personnes travaillant sur l'irrigation du maïs à Arvalis-Institut du végétal et (iv) de données issues de simulation telle que l'estimation de la consommation en eau par le modèle ADEAUMIS utilisé par la CACG pour sa gestion stratégique.

### IV.3 Choix de modélisation

#### IV.3.1 Choix d'un formalisme pour décrire les pratiques culturelles

Pour décrire les pratiques culturelles et les simuler, parmi les formalismes possible (Encadré 2), nous avons choisi de les représenter sous forme de règles de décisions du type SI [indicateur][opérateur][seuil] ALORS [action][modalité d'action]. Le formalisme sous forme de règles de décision est particulièrement adapté à l'échelle régionale : il permet d'effectuer une première simplification dans la description des pratiques culturelles en simplifiant la diversité des calendriers culturels. En effet, les calendriers de l'ensemble des exploitations présentes au sein d'un territoire une année donnée sont le résultat de l'hétérogénéité du milieu (variabilité spatiale du climat, sol) et de la diversité des logiques d'action dans l'espace considéré. Dans le cas où le territoire présente une variabilité spatiale climatique, ce qui est généralement le cas quand on travaille à l'échelle régionale, une logique d'action donnée implique déjà une diversité de calendriers. Par exemple, pour une règle de décision basée sur un seuil de somme de température donné, le seuil n'est pas atteint à la même date partout dans le territoire. L'existence d'une diversité de logiques d'action (c'est-à-dire une diversité d'indicateurs, de seuils et de modalités d'action) peut augmenter la diversité des calendriers ou au contraire, provoquer une homogénéisation<sup>10</sup> des calendriers culturels.

#### **Encadré 2: les formalismes de représentation des pratiques culturelles**

Les pratiques culturelles peuvent être décrites de plusieurs manières. Elles peuvent être décrites par les dates et modalités des opérations techniques sans que le processus ayant conduit au choix de ces dates et modalités ne soit explicité. On décrit un calendrier d'actions. En général, cette représentation des pratiques culturelles est utilisée dans le cadre du diagnostic : on se situe après une campagne culturelle et connaissant l'itinéraire technique pratiqué, il est possible d'analyser a posteriori les conséquences de cet itinéraire technique (Kropff et al., 2001b; Kropff et al., 2001a). Les pratiques culturelles peuvent également être décrites par les logiques d'action menant au calendrier observable une année donnée (Papy, 1999; Sébillotte et Soler, 1990). Les logiques d'action sont représentées sous forme de règles de décision de type SI [indicateur][opérateur][seuil] ALORS [action][modalité d'action]. Ce formalisme, inspiré de la programmation informatique, permet de décrire le processus d'adaptation de l'agriculteur à l'évolution du contexte (évolution de l'état du sol, de la culture, des conditions météorologiques et autres éléments tel que la mise en place d'une restriction d'usage de l'eau par exemple). Il convient dans le cadre de la prédiction et de la conception de systèmes de culture. Si on cherche à représenter l'organisation des pratiques culturelles au sein de l'itinéraire technique, du système de culture ou du système de production, il devient nécessaire de prendre en compte la planification réalisée par les agriculteurs dans la description de la logique d'action. Sont alors représentées les règles d'enchaînement dans le temps des différentes interventions. Ces règles d'enchaînement

<sup>10</sup> Pour atteindre un objectif de date identique, pour le semis, l'irrigation, ou la récolte, les agriculteurs peuvent mobiliser des logiques d'action différentes.

peuvent être également des règles de décision du type SI...ALORS... SINON (Aubry et al., 1996) ou des règles du type REPETER ... TANT QUE...(Bergez et al., 2001); Elles peuvent être aussi des règles de priorité entre cultures et entre ateliers quand on cherche à représenter les interventions au sein du système de production (Attonaty et al., 1990).

Le semis peut être formalisé sous forme de règles de décision. Dans les travaux développés à l'échelle de l'exploitation agricole, on peut distinguer quatre types de règles: les règles de priorité de semis entre cultures, les règles portant sur la détermination des jours disponibles, les règles portant sur la détermination du nombre d'hectares semés par jour suivant l'organisation du chantier de semis et les règles de détermination des dates de semis (Leenhardt et Lemaire, 2002b; Papy et Servettaz, 1986; Papy et al., 1990; Reboul, 1965). Les règles de détermination des jours disponibles sont basées sur des indicateurs biophysiques permettant de décrire la possibilité ou non d'entrer dans les parcelles (bilan hydrique, pluviométrie des jours passés) et la connaissance de la période ou de la température à partir de laquelle la germination du maïs est possible (température ou date issue de l'expérience). Les règles de détermination du nombre d'hectares semés par jour sont basées sur des déterminants décrivant l'organisation du travail, les équipements et le risque climatique accepté par l'agriculteur : nombre d'heures utilisables par jour pour le chantier, durée des opérations, organisation du chantier (combien de tracteurs, quelle main d'œuvre, réalisation des opérations parcelle par parcelle ou non ?). La détermination des dates résulte de la combinaison des deux types de règles précédents.

→ Je propose de m'appuyer sur ces travaux pour représenter la stratégie de semis à l'échelle de la sole de maïs et en donner une représentation à l'échelle régionale.

Il n'existe pas à ma connaissance de travaux ayant développé et simulé des règles sur le choix de la précocité des variétés et de la densité de semis au sein des exploitations agricoles ou de la sole d'une culture. Des tests associant une date à une précocité sont réalisés à l'aide des modèles de culture afin d'évaluer leur impact sur les besoins en eau des plantes (exemple, (Debaeke et Aboudrare, 2004)) mais ils ne sont pas basés sur des règles de décision.

→ Je propose de développer des règles reliant l'organisation du semis au choix de la précocité des variétés semées et de la densité de semis. Je parlerai de « stratégie de semis et de choix de précocité » en considérant cette stratégie comme un ensemble de décisions.

L'irrigation peut être décrite sous forme d'un corps de règles à l'échelle de l'exploitation (Leroy et al., 1996; Leroy et al., 1997) et à l'échelle d'un bloc d'irrigation (Bergez et al., 2001; Bergez et al., 2002a). Dans une exploitation irrigante, on peut distinguer trois types de règles : des règles pour décider des priorités entre cultures irriguées, des règles de gestion du temps de travail et de l'usage de la ressource en eau (débit et matériel) et des règles de conduite (ou pilotage) de l'irrigation par culture pour décider du démarrage, de l'arrêt et de doses d'irrigation. Les règles de conduite de l'irrigation sont de la forme SI [indicateur][opérateur][seuil] ALORS [action][modalité d'action]. Différents indicateurs peuvent être utilisés : condition climatique, stade cultural, bilan hydrique, temps écoulé depuis la dernière irrigation, date calendaire, niveau de ressource en eau etc. L'action indique la dose d'irrigation nécessaire

→ Pour la représentation de l'irrigation, je propose d'utiliser la représentation de l'irrigation telle que formalisée par Bergez et al. (2001) et d'identifier les valeurs des paramètres des règles permettant de représenter les pratiques à l'échelle régionale. Je désignerai désormais l'ensemble des décisions de la conduite de l'irrigation sous le terme de « stratégie d'irrigation ». Pour la modélisation de cette opération technique, j'utilise un modèle pré-existant nommé MODERATO (cf. §3.2).

Stratégie de semis et de choix de précocité et stratégie d'irrigation sont ainsi les éléments décrivant l'itinéraire technique dans ce travail. Les liens entre les deux stratégies, autre que ceux liés à l'atteinte de différents stades cultureux, seront recherchés. La nature des décisions les décrivant est variable : elles peuvent être de nature « stratégique », comme celle concernant le choix de précocité, le choix de se préparer à semer, la durée des tours d'eau; ou de nature « tactique » comme celle concernant les dates de démarrage de l'irrigation et du semis, les arrêts de l'irrigation en cas de pluie etc.

#### IV.3.2 Choix d'un modèle permettant de simuler le développement du maïs

Afin d'estimer la demande en eau à partir d'une description des pratiques, nous avons choisi d'utiliser le modèle MODERATO (Bergez et al., 2001). C'est un modèle combinant un modèle dynamique biophysique de simulation d'une culture de maïs et un modèle de décision relatif à la conduite de l'irrigation. A partir de la description d'une situation pédoclimatique et d'un jeu de contraintes sur l'irrigation, de données sur le semis (date de semis, variété, densité) et de règles pour le fonctionnement des opérations culturales, MODERATO fournit les résultats du fonctionnement du système biophysique et en particulier la consommation en eau unitaire et un calendrier d'irrigation. Les contraintes sur l'irrigation sont de trois ordres : contraintes d'équipement, de ressource et contraintes dues à des restriction d'usage de l'eau ou à des contraintes organisationnelles. Il est possible d'estimer la demande en eau unitaire à partir du calendrier d'irrigation en ne fixant aucune restriction d'usage de l'eau.

Le modèle biophysique est paramétré sur un jeu de données important recouvrant une bonne partie de la région Midi-Pyrénées (Wallach et al., 2001). Le modèle décisionnel a été validé auprès d'irrigants du Tarn et de la zone de la Baïse Amont (Bergez, 2003).

L'utilisation de ce modèle permet d'utiliser une modélisation de la pratique d'irrigation préexistante en accord avec nos objectifs de simulation de règles de décision. Par agrégation des résultats de simulation, il permet d'estimer la demande régionale en eau.

### IV.4 Le type d'analyses menées

#### IV.4.1 Pour identifier les pratiques et simplifier leur diversité

Pour définir les stratégies et simplifier la diversité, je propose d'utiliser un modèle typologique. L'Encadré 3 présente les différents types de typologies. On peut constater qu'elles sont habituellement peu utilisées pour décrire la diversité des pratiques culturales ou des systèmes de culture. Empruntant le terme à Gibon (1999) qui l'applique à des sous-systèmes de l'exploitation agricole, je propose de procéder par « typologies modulaires » c'est-à-dire par typologies appliquées à des sous-systèmes de l'itinéraire technique et de rechercher les liens entre les sous-systèmes : la démarche est de rechercher des groupes de variables homogènes portant sur le semis, sur le choix de précocité, sur la densité de semis d'une part et des groupes de règles homogènes portant sur l'irrigation d'autre part puis de regrouper les groupes au sein d'une nouvelle typologie.

#### **Encadré 3: les typologies**

Pour représenter la diversité existant au sein d'un territoire, on utilise des modèles typologiques que l'on applique en général aux exploitations agricoles (Dobremez et Bousset, 1995). La réalisation d'une typologie d'exploitations ou d'autres objets est une démarche d'identification des principaux facteurs structurant la diversité. Les facteurs déterminent les ressemblances et les différences entre les exploitations ; leurs modes de combinaison doivent être explicités et peuvent être interprétés en terme de fonctionnement des exploitations. Les

typologies développées de manière systématique, comme certaines typologies d'exploitation permettant de décrire l'agriculture nationale (comme l'OTEX) ou régionale (comme la typologie SICOMORE en région Midi-Pyrénées), sont essentiellement utilisées pour décrire la diversité structurelle des exploitations. D'autres typologies, développées pour répondre à une question particulière, portent sur la diversité des fonctionnements d'exploitation. Elles incluent alors parfois certains éléments décrivant la catégorie de pratique culturale ou d'élevage (Cristofini et al., 1978; Girard, 2003; Perrot et Landais, 1993). Les typologies portant directement sur les systèmes de culture ou les itinéraires techniques sont rares. Elles ne sont pas développées de manière systématique mais sont en général établies dans le cadre de travaux de modélisation « ponctuels » comme par exemple dans les travaux de (Mignolet et al., 2001; Mignolet et al., 2004). Ces typologies sont issues de l'observation du terrain ou de données d'expertise et portent sur une intervention technique opérée sur plusieurs cultures (Mignolet et al., 2004). L'intervention technique est décrite comme un mode de gestion sans description de règles de décision ou des interrelations existant avec d'autres interventions.

Pour établir les typologies et identifier les variables les plus discriminantes de la diversité des pratiques, j'ai utilisé les analyses statistiques multidimensionnelles : analyses en composante principale (ACP), analyse des correspondances multiples (ACM) suivies de classification ascendantes hiérarchiques (CAH) (Fenelon, 1981; Venables et Ripley, 2002).

#### IV.4.2 Pour rechercher des indicateurs permettant d'estimer la distribution spatiale des pratiques culturales et définir des scénarios

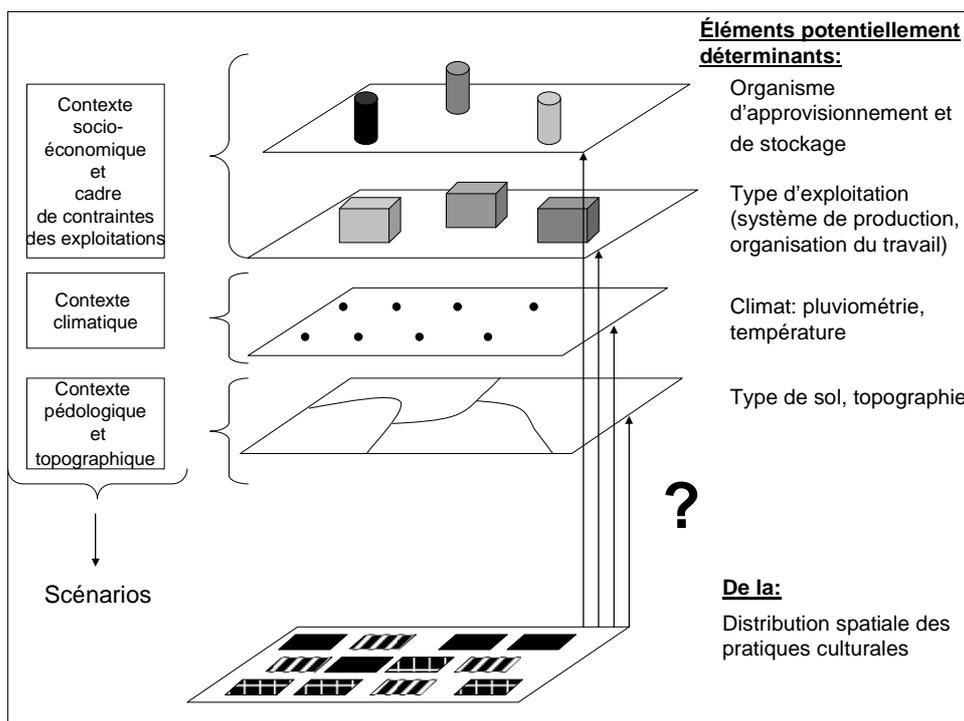
La recherche d'indicateurs est réalisée parmi des données géoréférencées ou pouvant être géoréférencées. Il s'agit par exemple de données recensées par des enquêtes administratives agricoles. Le géoréférencement peut être plus ou moins lâche ; le RGA<sup>11</sup> par exemple, avec un géoréférencement communal, couvre exhaustivement la zone. Les types de sol, la zone topographique des parcelles ou encore une coopérative peuvent être géoréférencées à l'aide de cartes ou de la délimitation d'un bassin de collecte.

Cette recherche a un double objectif :

- Le premier objectif est de rechercher des données facilement accessibles à l'échelle régionale permettant de déterminer la distribution spatiale des pratiques. Rappelons que pour estimer la demande régionale en eau d'irrigation, nous avons besoin de localiser ou d'estimer des proportions de pratiques dans les contextes pédoclimatiques existant dans la zone. Pour cela, le principe a été de rechercher des liens statistiques ou mécanistes, selon les possibilités, entre les variables décrivant les pratiques culturales et des variables décrivant les exploitations agricole mais aussi leur environnement (contexte pédoclimatique, topographie et organisme d'approvisionnement et de collecte)
- Le second objectif est de rechercher des données faisant le lien entre le contexte stratégique des exploitations et les pratiques culturales afin de simuler l'impact de scénarios décrivant l'évolution des exploitations irrigantes sur les pratiques culturales et par suite, sur la demande régionale en eau d'irrigation. La Figure 14 présente sous forme de « couches d'informations » le type de données analysées afin de déterminer les indicateurs. Il s'agit du type de sol et de la topographie, du climat, de données décrivant les systèmes de production et du type d'organisme d'approvisionnement et de stockage. Les scénarios ne sont pas fixés a priori : selon les indicateurs identifiés, il sera

<sup>11</sup> Recensement général agricole

possible de connaître les variables contextuelles qui pourront être utilisées pour construire ou traduire les scénarios à simuler pour estimer la demande en eau d'irrigation.



**Figure 14: Représentation des différents niveaux des variables explicatives de la distribution des pratiques culturelles explorées**

Pour rechercher des liens statistiques entre les données potentiellement déterminantes et les pratiques, j'ai utilisé les analyses multivariées (ACM), les régressions linéaires multiples, et les arbres de classification et de régression (CART). Cette dernière méthode est présentée dans l' Encadré 4.

#### **Encadré 4: la méthode des arbres de régression et de classification (CART)**

Les démarches à base d'arbres de classification CART (pour les variables qualitatives) ou de régression (pour les variables continues) sont des méthodes de modélisation non paramétriques qui coupent de manière récursive l'espace multidimensionnel défini par des variables indépendantes en zones aussi homogènes que possibles par rapport à une variable que l'on cherche à expliquer. Le résultat est une structure hiérarchique binaire appelé un arbre de décision. Cet arbre est défini par des « branches » et des « feuilles » qui contiennent les règles permettant d'expliquer les relations entre la variable à expliquer et les variables potentiellement discriminantes et, quand l'arbre est prédictif, de classer de nouveaux cas (Vayssières et Allen-Diaz, 2000). L'avantage de cette méthode est d'une part qu'elle ne requiert pas la vérification d'hypothèses particulières sur la distribution de la variable à expliquer, que des données de nature diverses peuvent être utilisées et qu'elle n'impose pas la linéarité des relations entre variables (Speybroeck et al., 2004), d'autre part qu'elle permet d'établir des règles de prédiction sur un espace d'une donnée pas facilement accessible. Ainsi cette méthode est utilisée depuis longtemps en médecine et plus récemment en écologie (prédiction de la répartition des espèces en fonction de caractéristiques environnementales d'une région (Glenn De Ath et Fabricius, 2000; Glenn De Ath, 2002) ou de la productivité des prairies (Zhang et al., ), en économie agricole (prédiction du maintien ou de l'abandon de l'élevage par des immigrants urbains dans une région d'Afrique central marquée par des conflits (Speybroeck et al., 2004) et en pédologie (prédiction des caractéristiques des sols pour établir une carte des sols d'une région à partir de quelques relevés ponctuels sur le

terrain (Scull et al., 2005)). Pour savoir si un arbre de décision est prédictif ou non (dans ce dernier cas, le résultat est très dépendant du jeu de données), on utilise généralement un jeu de données de validation. Quand le nombre de données collectées est insuffisant pour être scindé en un jeu de données d'apprentissage et un jeu de données de validation, il est possible d'utiliser la méthode de validation croisée qui consiste à diviser le jeu de données d'apprentissage en échantillons de 10 (par défaut) sous échantillons tirés au hasard. L'arbre est prédictif s'il existe un nombre de feuilles ou nœuds où l'erreur de prédiction présente un minimum. Si l'erreur de prédiction présente un minimum pour un nombre de feuilles ou nœuds correspondant à l'arbre complet, l'arbre obtenu n'a pas de propriétés prédictives ; il est seulement explicatif des relations entre variables au sein du jeu de donnée d'apprentissage (Glen De Ath et Fabricius , 2000).

## V. RÉSULTATS

Les résultats de la thèse sont présentés en quatre chapitres. Les trois premiers chapitres portent sur (i) l'identification et l'analyse des pratiques d'irrigation et des pratiques de semis et de choix de précocité et (ii) la recherche d'une méthode de détermination de la distribution spatiale des pratiques. Le quatrième chapitre présente le modèle établi à partir des résultats présentés dans les trois premiers chapitres ainsi que son évaluation.

### Résumé

Le premier chapitre porte sur l'identification de stratégies d'irrigation et la recherche d'indicateurs permettant d'estimer leur distribution spatiale. La stratégie d'irrigation est décrite par des indicateurs et modalités d'action d'un ensemble de règles de décision établi par Bergez et al. (2001).

Deux classes de stratégies d'irrigation sont obtenues. Les variables discriminantes définissant ces deux classes sont : la durée du tour d'eau (j), la dose d'eau par jour (mm/j) et la présence ou non d'un arrêt entre deux tours d'eau (o/n). Les variables décrivant le démarrage, le retour en cas de pluie et l'arrêt définitif de l'irrigation présentent une importante variabilité au sein de chaque classe. Dans la zone de la Baïse-Amont, on ne trouve qu'une des 2 classes. Il s'agit de la stratégie d'irrigation type définie par : une durée de tour d'eau supérieure à 6 jours, une dose journalière inférieure à 5mm et un arrêt entre les deux tours d'eau.

Il n'apparaît pas possible de directement prédire les classes de stratégie à partir des typologies décrivant la structure des exploitations. Aucune des méthodes statistiques testées n'a été concluante. Par contre, il est possible de prédire une variable des stratégies, la durée des tours d'eau, à partir de la capacité théorique d'irrigation calculée pour l'exploitation. Comme la durée du tour d'eau est la variable la plus discriminante des stratégies, la capacité d'irrigation pourrait donc être un indicateur permettant de déterminer la distribution spatiale des stratégies d'irrigation à l'échelle régionale.

\*\*\*

Le second chapitre porte sur l'identification de la diversité des pratiques de semis et de choix de précocité des maïsiculteurs de la zone de la Baïse. La démarche repose sur l'utilisation de trois types d'information sur ces pratiques : les recommandations des instituts techniques et conseillers, les pratiques effectives (connues grâce à des enquêtes postales) et des données d'experts.

Les données factuelles issues des enquêtes postales montrent que les associations {précocité, date de semis} au sein du périmètre irrigué sont très variées une année donnée. La variabilité interannuelle des proportions de ces associations n'est pas négligeable. L'analyse comparée des trois groupes de données permet (i) d'identifier une diversité de périodes de démarrage des semis et de répartition des groupes de précocité entre les petites régions agricoles qui serait due à la variabilité spatiale du climat et (ii) une diversité de conduites du semis et des choix de précocité entre exploitations agricoles qui serait due à des organisations de chantier et des stratégies de production variées. Les variables permettant de décrire la diversité des conduites entre exploitation sont : le nombre de groupes de précocité semés et leur ordre de semis, et la vitesse du chantier de semis. Ces trois variables forment des combinaisons de pratiques pouvant être mise en relation avec des stratégies de production et d'organisation du chantier de récolte.

\*\*\*

Le troisième chapitre porte sur la recherche d'indicateurs géo-référencés (ou géo-référençables) permettant localiser ces pratiques de semis et de choix de précocité au sein de la zone de la Baise.

Pour prédire les périodes de démarrage des chantier de semis et les proportions des groupes de précocité semés en un lieu donné, nous avons recherché des critères pédoclimatiques et topographiques. De fait, le calcul du nombre de jours disponibles pour le semis en différents points sur un axe nord-sud dans la zone a permis de valider l'hypothèse d'impact du gradient climatique sur l'échelonnement des périodes de démarrage des semis. Les proportions de groupes de précocité au sein des petites régions agricoles varient, quant à elles, en fonction du type de sol ou de l'emplacement topographique des parcelles.

Pour prédire la distribution spatiale des combinaisons de pratiques au sein de la zone, nous avons recherché des indicateurs parmi les contraintes d'exploitation. Une approche statistique a permis de déterminer 3 classes de stratégies de semis et de précocité ainsi qu'un arbre de classification permettant de prédire les stratégies de façon probabiliste en fonction de 4 variables simples décrivant l'exploitation. Une deuxième approche, qualitative, a permis d'identifier les déterminants de deux variables discriminantes des chantiers de semis et de choix de précocité : le débit de chantier et le nombre de groupes de précocité. Le nombre important de ces déterminants et le fait que certains déterminants dépendent de critères subjectifs, propres à l'agriculteur, expliquent l'impossibilité de prédire les stratégies de semis et de choix de précocité de façon déterministe à l'échelle régionale. L'ensemble de ces résultats a permis de proposer une méthode d'estimation spatiale de pratiques de semis et de choix de précocité.

\*\*\*

Le quatrième chapitre porte sur l'élaboration et l'évaluation du modèle d'estimation de la distribution spatio-temporelle des prélèvements d'eau par irrigation. Ce modèle prend en compte la distribution spatiale des pratiques des agriculteurs (semis, choix de précocité, irrigation) en s'appuyant sur des critères géographiques et sur des caractéristiques de leur exploitation.

Le modèle est constitué de deux parties : la première, nommée SIMITKO permet d'estimer les quadruplets {date de semis, précocité, densité, surface} de chaque agriculteur du périmètre irrigué. Elle est composée de quatre modules. Le premier module estime les jours disponibles pour le semis dans la zone climatique de l'agriculteur, le second estime la date de démarrage de l'agriculteur en fonction des jours disponibles et de sa surface de maïs grain. Un troisième module estime la stratégie de semis et de choix de précocité de l'agriculteur en fonction de la SAU, de la surface irriguée, de la surface de maïs grain et de la présence d'un atelier d'élevage ou non et enfin le quatrième estime les dates de semis suivant celles de démarrage, puis la précocité, la surface semée et la densité de semis pour chaque date en fonction de la date de démarrage, des jours disponibles et de la stratégie. Cette partie fait appel à des règles probabilistes, ce qui lui confère une nature stochastique. La seconde partie est basée sur un modèle préexistant nommé MODERATO (Bergez et al., 2001). Ce modèle simule une stratégie d'irrigation pour chaque quadruplet {date de semis, précocité, densité, surface}, de manière déterministe, et permet l'estimation de la distribution temporelle de la demande en eau d'irrigation. Les simulations étant réalisées pour l'ensemble des quadruplets des agriculteurs du périmètre, on peut obtenir une représentation spatiale de la dynamique temporelle de la demande en eau, et ce, en termes probabilistes.

L'évaluation du modèle porte d'une part sur l'estimation des pratiques de semis et précocité (quadruplets) pour l'ensemble des agriculteurs. Pour cela, le modèle a été appliqué sur un échantillon de 46 maïsiculteurs irrigants de la zone d'étude, dont les caractéristiques

ont été obtenues par enquête postale. Le paramétrage des règles de décision d'irrigation adopté est celui utilisé par le gestionnaire de la ressource en eau (CACG) dans le modèle ADEAUMIS (Leenhardt et Trouvat , 2004). L'analyse montre que la distribution des surfaces semées dans le temps est bien simulée mais que les proportions des variétés demi-tardives et très tardives sont surévaluées. L'évaluation porte d'autre part sur le volume d'eau total consommé sur la zone d'étude et sur sa distribution temporelle. Pour cela, nous avons fait tourner le modèle avec les données concernant les 500 irrigants de la zone, identifiés à partir du RGA 2000. Nous utilisons les données de relevés de consommations sur la zone, réalisées par la CACG en 2005 comme référence. Nous avons également pu comparer l'estimation réalisée avec notre modèle à celle obtenue par le gestionnaire avec un modèle moins complet dans la prise en compte de la diversité des pratiques.

## **V.1 Article 1: Assessing the irrigation strategies over a wide geographical area from structural data about farming systems.**

Maton, L.<sup>1,\*</sup>, Leenhardt, D.<sup>1</sup>, Goulard, M.<sup>2</sup>, Bergez, J.-E.<sup>1</sup>

Published in *Agricultural Systems*, 2005, 86: 293-311

1 : INRA, UMR 1248 ARCHE, BP27, 31326 Castanet Tolosan Cedex, France

2 : INRA, Unité de Biométrie et Intelligence Artificielle, BP27, 31326 Castanet Tolosan Cedex, France

\* Corresponding author :

INRA, Unité d'agronomie, BP27, 31326 Castanet Tolosan Cedex, France

Tel : 00-33-5-61-28-50-26 ; Fax : 00-33-5-61-73-55-37 ; e-mail : maton@toulouse.inra.fr

### **V.1.1 Abstract**

Accurate estimation of regional water demand by agriculture, mainly consumed by farmers for irrigation, is a key requirement for water management. It depends on the farmers' irrigation practices which itself depend on the farmers' irrigation strategies. Describing irrigation strategies over a region is rather difficult due to the large number and the diversity of farmers. We seek whether it is possible to characterise irrigation strategies from easily accessible farm characteristics data at the regional scale. For that purpose, we investigated the relationships between maize irrigation strategies and three farming sub-systems: the production system, the water resource system and the irrigation equipment system.

Based on a 56-farmers survey of maize irrigation strategies carried out in two different areas in south-western France, we firstly created typologies from the three farming sub-systems and from irrigation strategies and, in a second step, analysed the links between the different typologies. Multivariate analyses, cluster analyses, linear regressions and regression trees were used for that purpose.

Only two types of irrigation strategies were found that could not be fully explained by the three sub-systems typologies. However, the theoretical irrigation capacity explains a part of the irrigation strategies. Such data can be obtained at a wide geographical scale from administrative data bases.

Strategic management of irrigation is similar amongst farmers in a given area while more operational actions differ from farmer to farmer. Standardisation of strategies due to county-based advice is then discussed.

### V.1.2 Key words

Water management, Regional scale, Farming sub-systems, Irrigation strategy, Maize, Multivariate analysis.

### V.1.3 Introduction

One of the greatest challenges for the coming decades will be to increase food production to feed the steadily growing world population. A large proportion of that increase will have to come from intensified agricultural systems supported by irrigation (FAO, 2002). Where irrigated agriculture is developed, water used for irrigation can represent more than 90% of water consumption during the dry season (e.g. Hurand and Tardieu, 1998). In an ever increasing number of countries, existing resources are already fully exploited (Smith, 2000; FAO, 2002). Even where water is plentiful, water demand for purposes other than agriculture (drinking water, leisure, industry etc) is increasing and can become a source of conflict between different components of the society (Ramonet, 2002). Planning and management of water resources have thus become a very important issue everywhere in the world. Accurate estimation of irrigation demand by agriculture at large scale is then a key need for more precise water management.

The most common procedures for water management are based on Decision Support Systems (Fontane, 1995; Pereira et al., 1995). When water management concerns a large scale, models and Geographical Information System-based approaches can be used to predict water demand for agriculture (Knox et al., 1996; Hartkamp et al., 1999). One can distinguish (i) models which provide an estimation based on plant water requirements (Herrero et al., 1999 ; Mateos et al., 2002; Weatherhead and Knox, 2002) and (ii) models which estimate irrigation demand taking into account farmers' practices (Weatherhead and Knox, 2002; Leenhardt et al., 2004a). Simple latter types are based on former types but introduce an empirical coefficient which accounts for irrigation practices (CACG, 2001).

However, assuming constant management practices over a region can lead to substantial errors especially for prediction or diagnostic purposes (Yun, 2003). Taking into account individual irrigation practices to predict water demand implies to identify irrigation practices over a large area and to represent them in a model. Irrigation practices could be obtained by observations and exhaustive surveys of the farmers, but at the regional scale such surveys are not suitable (Biarnès et al., 2004). Administrative agricultural statistics provide little information on cultural practices (Mignolet et al., 2004). So far, no method exists which could help in determining irrigation practices over large areas (Leenhardt et al., 2004a, 2004b). Alternative methods are then required.

Irrigation is a complex operation, based on technical and agronomic knowledge (Bergez et al., 2001), on sociological factors (Salles, 2003) and can be the result of a negotiating process between irrigators (Barreteau, 1998). We choose to focus on a representation of irrigation practices based on agronomic factors. For a farmer, irrigation practices are the result, a given year, of the application of strategic decisions about the water amount or the flow for the irrigated area and decisions about the time to start or to end irrigation (Mircovitch, 1999; Bergez et al., 2001). These strategic choices and decisions have been formalised by a set of decision rules called "irrigation strategy" by Bergez et al. (2001, 2002) in a bio-decisional tool called MODERATO.

This paper proposes a method to assess the diversity of irrigation strategies over a region. Since irrigators develop different irrigation strategies according to their farming system and hydraulic context (Sébillotte and Soler, 1990; Leroy, 1996; McGregor et al., 2001), links

between some characteristics of the farming systems and irrigation strategies could be sought. To be useful for regional applications, the relationships to be established should link irrigation strategies to easily accessible data on farming systems. As regional administrative data-bases are based on structural data about farming systems, we focus on such data.

Due to the diversity of the farming systems within a region (Sébillotte, 1996; Rounsevell et al., 2002), typologies will be used (Dobremez and Bousset, 1995). This approach was already used in some works (Butault, 1985; Mainie, 1971; Bonneville et al., 1989; Landais et al., 1989) but none specifically on irrigation strategies.

The present paper is organised in three parts. We first present the study area and the statistical approach used to build the typologies and to investigate the relationships between farming systems and irrigation strategies. In a second part, we present the typologies and the statistical relationships obtained. Finally, we discuss the relevance of the typologies and the standardisation of irrigation strategies and draw conclusions about the possibility of identifying and characterising the different irrigation strategies from farming system data over a region.

#### **V.1.4 Materials and methods**

##### **V.1.4.1 Study area**

The study area is part of the French administrative Midi-Pyrénées region. The data set used in this study refers to two different zones: the Agout [A] (43.50°N, 1.00°W) and the Baïse [B] (43.20°N, 0.24°W) valleys. The former intersects the departments of Tarn and Haute-Garonne and the latter the departments of Gers and Hautes-Pyrénées. They are equidistant from the Atlantic Ocean and the Mediterranean Sea.

The two zones are naturally climatic water deficient except during periods of heavy rainfall from January to June. In summer, rainfall is low (94 mm in July and August on average for A and B over a 21-year series) and extremely irregular both from year to year and from month to month (ranging from 9 to 160 mm over a 21-year series in July and August). Two main types of soil are found in the area: a loamy soil locally called « Boulbènes » with a water holding capacity ranging from 50 to 140 mm and a clay soil locally called « Terreforts » with a water holding capacity ranging from 70 to 120 mm (AGPM-TECHNIQUE, 2001). In the two zones, “Terreforts” represent a third of the surface area and “Boulbènes” a two-third of the surface area (Bourgeat et al., 1987; Jarrier, 2002).

The two zones are maize-oriented production areas and the main crop areas are quite similar for cereals, industrial crop, fodder, pasture and fallow (Tableau 1). The main differences lie in the proportions of oil crops. Usually maize is irrigated and this irrigated maize covers on average 80% of the irrigated area in B and 60% in A (Agrete, 2003). Regarding water resources for irrigation, B is part of the hydraulic system called the « Neste system » where rivers and reservoirs are recharged with water from the high mountains, while A is an irrigated zone fed by the Tarn and Agout rivers. Farmers get water from these resources either by direct pumping from rivers or from pressurised collective networks. Within both A and B there are also farmers who irrigate (partly or totally) from small private hill reservoirs.

##### **V.1.4.2 Statistical analysis approach**

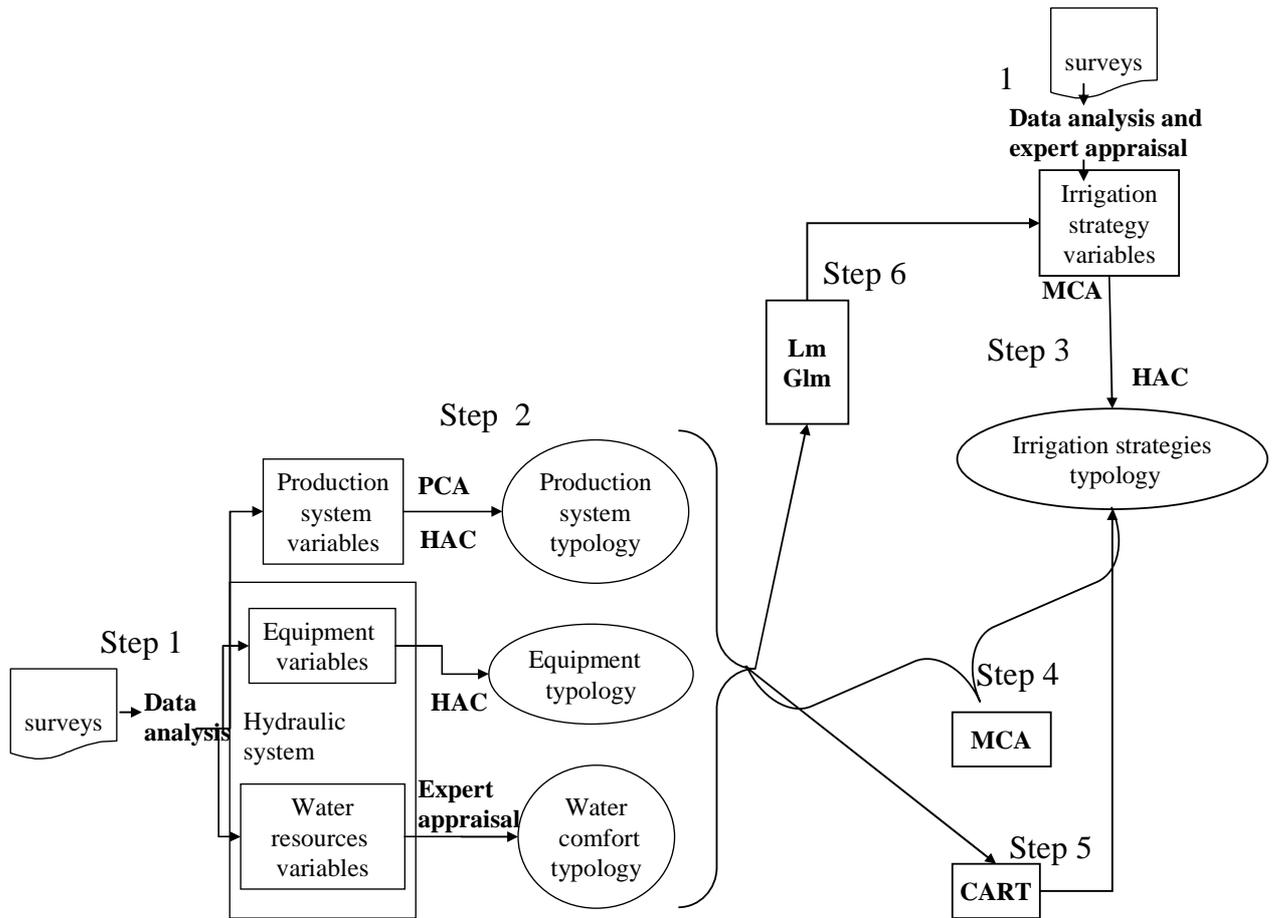
Five surveys (Clavé, 2001; Mielniczek, 2001; Rouffaud, 2001; Spessotto, 2001; Bertran de Balanda, 2002) were carried out in 2001 on 56 farmers (32 in A and 24 in B) in order to

describe and to understand farmers' irrigation strategies. All surveyed farmers grew irrigated maize. The survey had three main sections. The first was about the production system : history of the farm, data about labour, production, area of each crop, irrigated or not, farm economic size etc. This section was also intended to identify production system constraints for each farmer. A second section focused on the irrigation system : the farmer described the history of his system, features of farm water resources and specification of irrigation equipment. The last section was on the irrigation strategies in order to understand how the farmer manages maize irrigation. The irrigation strategy is defined by decision rules which are in the form "if some conditions are reached, then an action is decided". The conditions are described by indicators based on climate and soil properties (temperature, potential evapotranspiration and precipitation), by threshold values and operators. Thus, irrigation strategy is defined whatever the pedo-climatic scenarios and is then valid whatever the year and the location. Irrigation strategies differ from each other by the thresholds and the variable used to trigger the decision. Then, the aim of the survey was to obtain indicators, thresholds and quantities describing the irrigation management. Some 70 variables of the farming system were available for the 56 farmers.

**Tableau 2: Proportion of the departmental agricultural area in use for the main crops for the four departments of the study areas (Agreste, 2003). For the cereal data, the percentage of the maize area in the cereal is given (in italics).**

	% of the agricultural area in use			
	Haute-Garonne for Agout zone	Tarn	Gers for Baise zone	Haute-Pyrénées
Cereals	47.5	32.1	45.9	38.0
<i>% maize / cereals</i>	<i>25%</i>	<i>15%</i>	<i>37%</i>	<i>84%</i>
Oil crops	22.5	11.2	19.0	0.9
Dried	1.9	0.8	1.7	0.0
vegetables and proteinaceous				
Industrial crop	0.1	0.7	0.5	0.1
Fodder	13.0	24.3	12.1	18.0
Pasture	16.3	22.8	5.6	36.2
Fallow	8.7	4.5	9.8	5.1
% of irrigated maize in irrigated surface area	60%		80%	

Firstly, we sorted these variables into three sub-systems describing the farming system (Figure 15, step 1): the production system [PS], the equipment system for irrigation [ES] and the water resource system [TIC], the last two describing the hydraulic system. Due to the small number of farmers compared to the number of variables, we chose to create types for each sub-system rather than to consider data for individual farms (Figure 15: General diagram of the analysis approach. PCA: Principal Component Analysis; HAC: Hierarchical Ascendant Classification; MCA: Multiple Correspondences Analysis; Lm: Linear model; Glm: Generalised linear modelling; CART: Classification and Regression. step 2). The same approach was used for the irrigation strategies (Figure 15, step 3).



**Figure 15: General diagram of the analysis approach. PCA: Principal Component Analysis; HAC: Hierarchical Ascendant Classification; MCA: Multiple Correspondences Analysis; Lm: Linear model; Gln: Generalised linear modelling; CART: Classification and Regression.**

Different methods exist to determine the criteria to be used to construct types. There are two main families : i) the « positivist method » where types are created without any prior knowledge and using in most cases statistical methods (Caballero, 2001; Mignolet et al., 2001; Köbrich et al., 2003) and ii) the « constructivist method » where types are built from assumptions based on expert knowledge (Perrot and Landais, 1993; Landais, 1998; Girard et al., 2001). We chose « the positivist method » because we were able to use a large database of farming systems and irrigation strategies from the survey. The statistical method used for type creation was multivariate analysis according to the five-step procedure as proposed by Köbrich et al. (2003): (i) determination of the specific theoretical framework for type creation, (ii) collection and selection of variables, (iii) factor analyses, (iv) cluster analyses and (v) validation. These five steps are described below:

(i) Assuming that farmers' strategies are linked to the farm constraints brings to consider a farm as a system divided into interrelated sub-systems.

(ii) To select the variables to be used in the typologies, we followed the methodology proposed by Fenelon (1981) and Köbrich et al. (2003). Criteria of missing data, variation, relevance, and presence of correlation were used to determine if a particular variable should be used in the type creation. Regarding missing values, when less than five records were missing for a given variable, they were replaced by the calculated average over the rest of the population. Information about water resources availability could be synthesised by the Theoretical Irrigation Capacity (Lacroix, pers. comm.; Polge and Kéravec, 1997). TIC allows to compare the farmer's actual flow rate for an irrigation campaign to the flow rate required to

irrigate a crop without any water stress 8 years over 10. Since we did not have access to the actual equipment flow, we used the theoretical equipment flow rate based on limiting resource flow rate for a use of 24h per day. TIC is calculated as:

$$\text{TIC} = (\text{theoretical equipment flow rate} / \text{irrigated area}) * 24 * 0.1$$

( mm/ day)                      (m3/ h)                      (ha)

Irrigation strategies were described by variables based on the decision rules described by Bergez et al. (2001, 2002). The four rules are : a rule to decide when to start the main irrigation season (“starting rule”), a rule to decide when to start subsequent cycles of irrigation (“returning rule”), a rule to delay irrigation due to precipitation (“delaying rule”) and a rule to decide when to stop the irrigation season (“ending rule”).

iii) To reduce the number of variables and thus the dimensionality of the problem, Principal Component Analysis [PCA] on quantitative variables and Multiple Correspondences Analysis [MCA] on qualitative variables were performed. The number of factors from the PCA or MCA to be included in the cluster analysis is based on the criterion known as “rule of the elbow” when checking the eigen values.

iv) Typologies are then created using a Hierarchical Ascendant Clustering [HAC]. Its principle is based on the computation of similarity between any pair of observations. It identifies individuals with similar characteristics and forms clusters by minimising the variance inside each cluster. Expertise was used to determine the number of classes from the hierarchical tree (dendrogram).

v) For validation, we chose to ensure that the groups are realistic by focusing on the distributions of the types across the two zones.

Secondly, the links between the typologies were studied by using three statistical methods: i) Multivariate Correspondences Analysis (Figure 15, step 4) ; ii) Classification And Regression Tree [CART] (Figure 15, step 5) and iii) Linear model [Lm] and Generalised linear model [Glm] (Figure 15, step 6). By using the first two methods, we studied the linear relationships between the typologies. The multivariate correspondences analysis was applied in several studies dealing with the relationships between farm structure and practices like landscape activities (Kristensen, 2003). The relationships between the farm sub-systems typologies and irrigation strategie typology were studied by displaying the irrigation types as supplementary variables. We used a Linear model in order to determine linear relationships directly between sub-system typologies and irrigation strategy variables. The Linear model was used for irrigation strategy quantitative variables and a Generalised linear model was used for binary and multi-modal variables. Tests of deviance (qualitative and binary variables) or Fisher test (quantitative variables) indicate whether or not a given sub-system explains the considered irrigation strategy variable ( $P < 0.01$ ). Results were confirmed by using a goodness of fit test. For the multi-modal variables, influence of each sub-system category on the model was independently tested using the Akaike criteria (Burnham and Anderson, 2000). Finally a non-linear method called Classification and Regression Tree (Breiman et al., 1984) was tested in order to visualise the most discriminating sub-system types. The different statistical analyses were performed with S-plus (Venables and Ripley, 1999).

## V.1.5 Results

### V.1.5.1 Data used for the analyses

Thirty of the original 70 variables were kept. For the production system, 10 variables were kept: area for each type of crop (field crops, fodder crops, special crops and fallow) while differentiating between irrigated or unirrigated areas, livestock, on-farm labour, setting-up date and sales revenue. Regarding soil, surveys revealed i) a high soil variability within the irrigated fields for a given farm and ii) an unprecised knowledge of the soil type by the farmer. Soil variables were then removed from the analysis.

For equipment system, 4 variables were kept: proportion of area that can be irrigated by a total sprinkler cover system, by an integral sprinkler cover system, by travelling gun sprinklers and central pivots.

Theoretical Irrigation Capacity was calculated for each farmer and distributed within a 3-class classification given by experts and valid for the two zones (Lacroix, pers. comm.): if  $TIC \leq 4 \text{ mm d}^{-1}$ , the irrigation resource is limiting; if  $4 \text{ mm d}^{-1} < TIC \leq 5 \text{ mm d}^{-1}$ , the irrigation resource is adequate and if  $TIC > 5 \text{ mm d}^{-1}$ , the irrigation resource is more than adequate.

**Tableau 3 : Expert analysis to determine the different classes for the starting and ending irrigation rules. \* These classes are defined by the use of a criterion from the previous and next classes (e.g. starting at number of leaves equals to 9 or when advised to do so by advisor).**

Data	Meaning [Coding]
Starting before 20 June Number of leaves < 10	Starting irrigation early [STA1]
*	Starting irrigation rather early [STA2]
Starting event based on tensiometric data Starting event based on irrigation warnings	Starting irrigation in time [STA3]
*	Starting irrigation rather late[STA4]
Starting after 5 July Number of leaves > 14 After fertilization Starting by imitating neighbour « In a hurry »	Starting irrigation late[STA5]
Ending before 25 August Ending at milky pasty maize grain	Ending irrigation early [END1]
*	Ending irrigation rather early [END2]
Appearance of the black spot on the grain Ending at hard pasty maize grain	Ending irrigation in time [END3]
*	Ending irrigation rather late [END4]
Ending after 10 September Grain maturity Imitation of the neighbour	Ending irrigation late [END5]

For the irrigation strategy variables, data concerning irrigation starting and ending rules were not directly used for the typology because farmers often quoted subjective indicators like

« by imitating the neighbours », « in a hurry », « responding to irrigation warnings », etc. So data were analysed and encoded with the help of experts (Lacroix and Bergez, pers. comm.) according to a temporal axis divided into five classes (Tableau 3): early, rather early, in time, rather late, late. For some irrigators, it was impossible to determine the classes; for those we created a sixth class “undetermined”. For the “returning rule”, we used 2 quantitative variables (the duration of the irrigation cycle and the amount of irrigation water per day) and one binary variable (“Does the farmer wait between two consecutive irrigation cycles?” (“YES/NO”). For the “delaying rule”, we differentiated the farmers' behaviour by considering the amount of rainfall (R) causing a delay in the irrigation cycle and the amount of rainfall causing a 1-day withholding of irrigation (D). It resulted in a 6-mode variable (Tableau 4). The thresholds for each class are based on the median value for the different variables (D and R). Finally, we retained another variable of interest: “Does the farmer use an initial amount of water smaller than the routine amount (YES/NO)?” Figure 16 gives a representation of the variability for each irrigation variable.

**Tableau 4 : Elements to determine the classes REA for the delaying rule according to (i) the amount of rainfall causing a 1-day withholding of irrigation (D) and (ii) the amount of rainfall causing a delay in the irrigation cycle (R). (D=5.7 mm and R=10 mm are the median values from the surveyed farmers)**

	<i>D</i> ≤ 5.7 mm	<i>D</i> > 5.7 mm
<i>R</i> ≤ 10 mm	<i>REA1</i>	<i>REA3</i>
<i>R</i> > 10 mm	<i>REA2</i>	<i>REA4</i>
<i>Behaviour not specified or not quantified : REA5</i>		
<i>Rainfall is not a perturbing factor : the irrigation cycle is not stopped : REA6</i>		

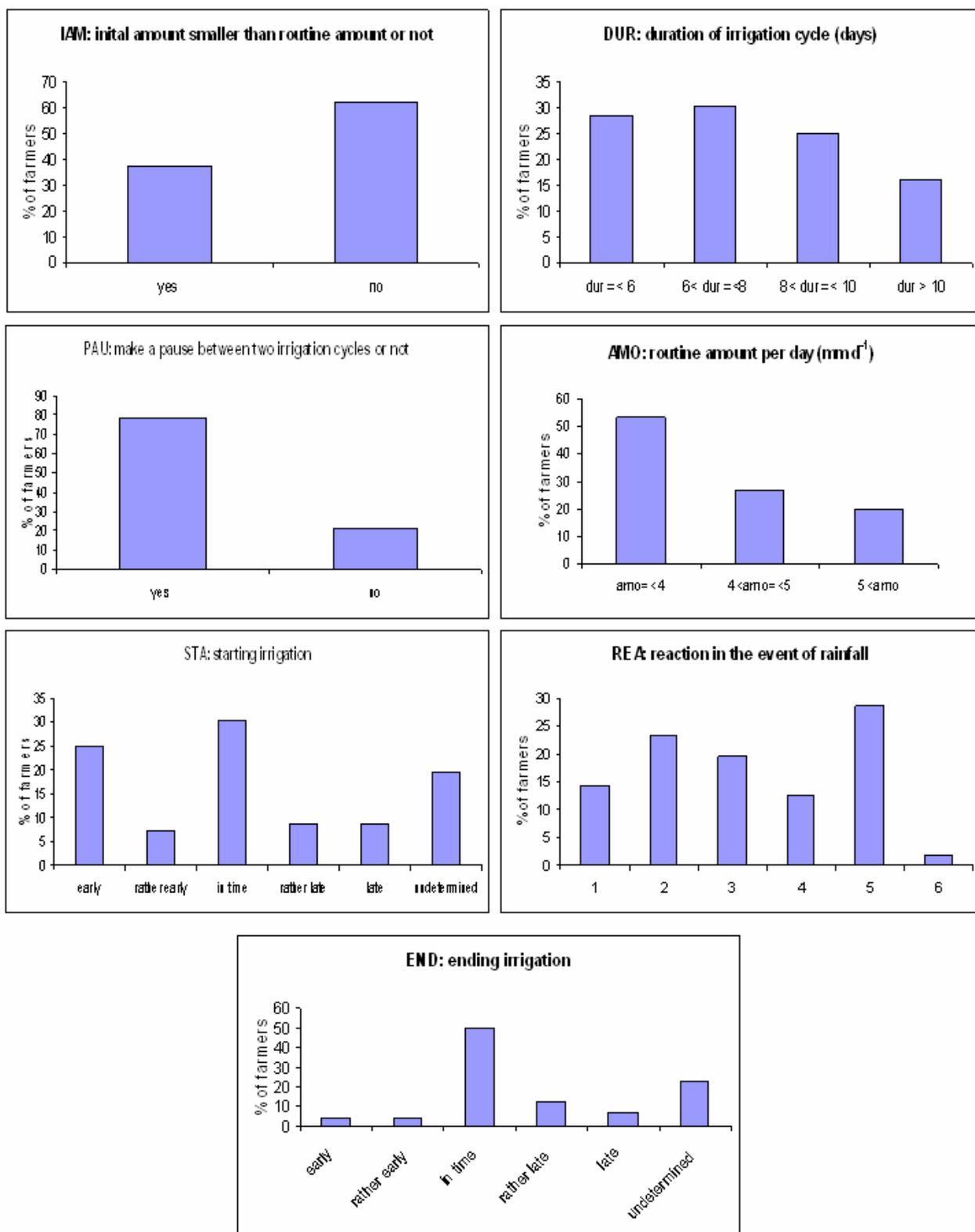


Figure 16: Histograms of the irrigation strategy variables. X-axis represents the different classes (either discrete or continuous, see main text for description), Y-axis represent the proportion over the surveyed population. For the modalities of the variable REA (Reaction in the event of rainfall), see Tableau 4

### V.1.5.2 The four typologies

For the production system typology, the first four factors of the PCA explain 63% of the total variance. By classification we obtained a 8-cluster typology (from PS1 to PS8) with two farms unclassified (PS7 and PS8). Tableau 5 gives an explanation of all the classes using the original variables. Types are mainly explained by i) the proportion of irrigated field crops, ii) the other crops and iii) livestock. The proportion of irrigated field crops varies from nearly 5% to 90%.

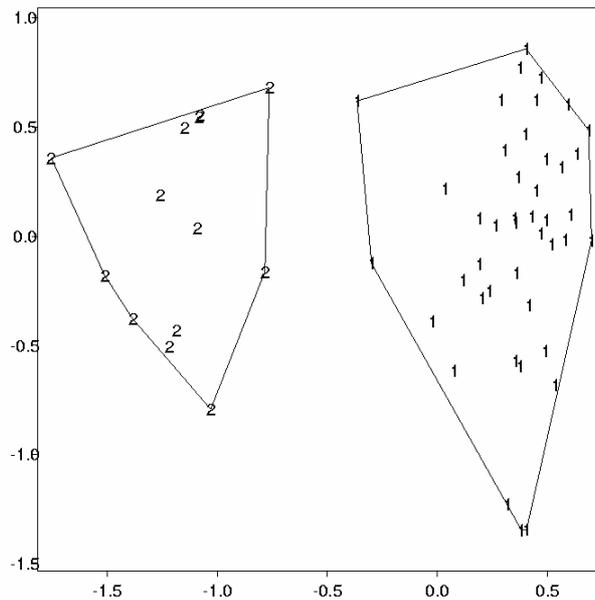
**Tableau 5: Description of the production systems types using the original explanatory variables. PS7 and PS8 represent a single individual.**

	PS 1	PS 2	PS 3	PS 4	PS 5	PS 6	PS7	PS8
% of farmers	12.5%	27%	14%	25%	3.5%	14%	2%	2%
Main productions	Irrigated special and field crops	Non irrigated field crops	Irrigated field crops	Field crops	Irrigated fodder crops	Non irrigated fodder crops	Irrigated special crops	Non irrigated fodder crops
	-	-	-	Livestock	Livestock	Livestock	-	Livestock
Socio-economical characteristics	Highest turnover Low labour Medium set-up	Medium turnover Lowest labour Medium set-up	Highest turnover Middle labour Most recent set-up	Lowest turnover Small Farm Oldest set-up	Lowest turnover High labour Most recent set-up	Medium turnover Middle labour Medium set-up	Very high turnover High labour Very young farmer	Very high turnover High labour Very young farmer

For the equipment system typology, the classification performed directly on the equipment variables (given the small number of explanatory variables) gave a 4-cluster typology (from ES1 to ES4). Class ES1 brings together farmers using almost exclusively travelling gun sprinklers (70%). The three other classes gather together farmers using the different types of equipment: travelling gun sprinklers and central pivot in class ES2 (16%). central pivots and integral sprinkler cover in class ES3 (3%) and travelling gun sprinklers with integral sprinkler cover in class ES4 (11%).

For TIC typology, the 56 surveyed farmers were sorted into the 3 classes of the theoretical irrigation capacity. Twelve farmers (22%) are in the class TIC1, 26 (46%) in the class TIC2 and 18 (32%) in the class TIC3.

For irrigation strategies typology, the classification on the first five factors from the MCA gives a two-class typology (IS1 and IS2). These two classes are completely explained by the first factor (Figure 17) which separates farmers according to the 3 variables describing the “returning rule”: i) the duration of the irrigation cycle; ii) the irrigation amount per day and iii) a pause or not between two irrigation cycles. IS1 brings together farmers with an irrigation cycle longer than 6 days, less than 5 mm of water amount per day and who stop between two irrigation cycles while IS2 brings together farmers with an irrigation cycle shorter than 6 days, more than 5 mm of water amount per day and who do not stop between two irrigation cycles. IS1 represents 77% of the farmers.



**Figure 17 : Projection of the individuals on the first two factors from the MCA on the irrigation variables (factor 1 in X-axis and factor 2 in Y-axis). “1” and “2” means that individuals belong to IS1 and IS2 respectively.**

### **V.1.5.3 Explaining the irrigation strategies typology by the farm sub-systems typologies**

Results on the first factorial plane from the Multiple Correspondences Analysis (Figure 15, Step 4) are presented in Figure 18. The first factor represents a gradient of Theoretical Irrigation Capacity. IS1 and IS2 are distributed along this axis. Sub-systems ES3, PS7, PS8 and TIC3 are linked to IS2. TIC1, TIC2 and ES1 are linked to IS1.

Results from Classification And Regression Tree (Figure 15, step 5) are given in Figure 19. Production System is the first discriminating variable. Farmers belonging to PS2, PS7 and PS8 are segregated from the others according to their class of TIC: if TIC is adequate or more than adequate (TIC2 and TIC3), the probability that farmers belong to IS2 is 57%. This classification tree can only be used as an explanatory tool but not as a predictive tool (we cannot classify a new farmer) because cross validation failed.

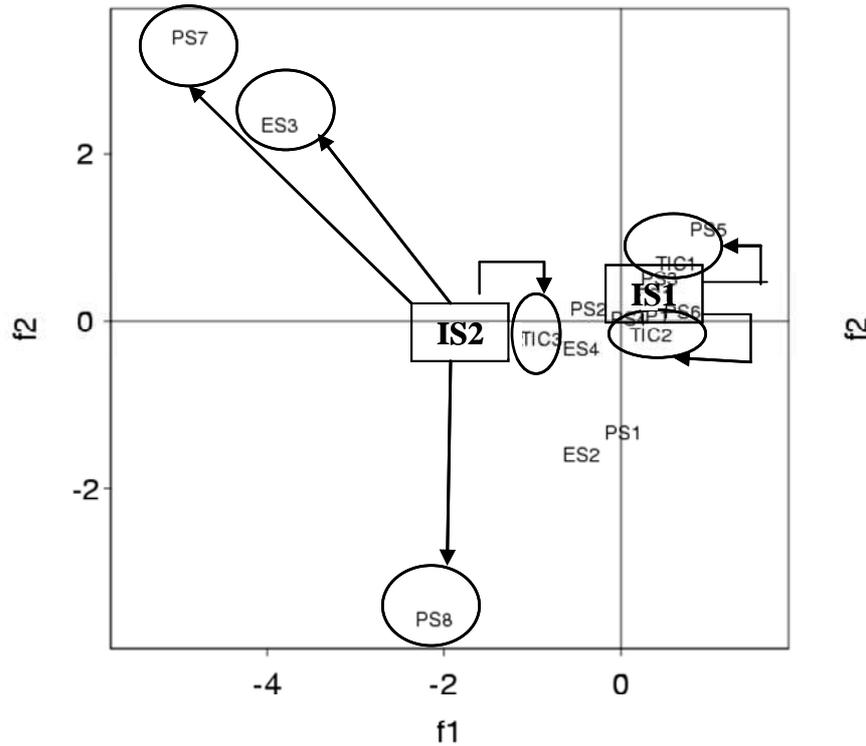


Figure 18 : Plot of first factorial plane (f1\*f2) of irrigation strategies groups (IS1, IS2) and farming sub-systems. Sub-systems linked to Irrigation Strategy 2 (IS2) are underlined (link shown by an arrow); TIC1 , TIC2 and ES1 closed to IS1 are the only well represented variables.

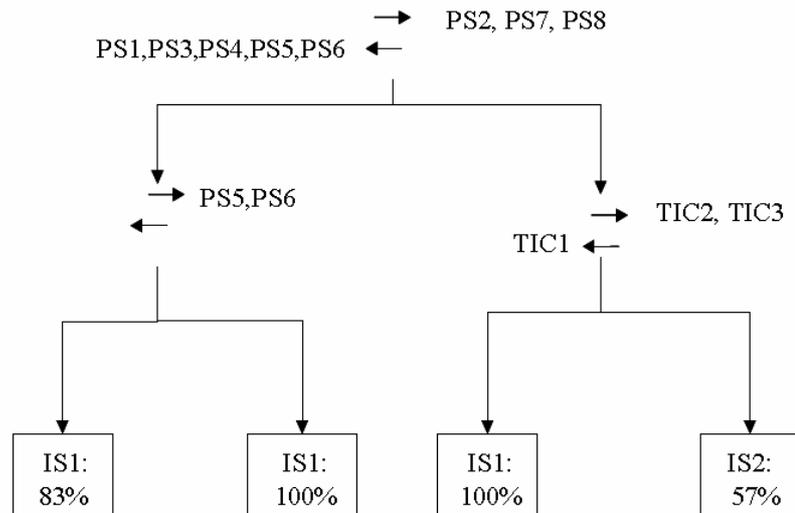


Figure 19: Results from the optimal classification tree. Depending on their Production System (PS), Equipment System (ES) and Theoretical Irrigation Capacity (TIC), farmers belong to a given class of Irrigation Strategy (IS). For example, if farmer belongs to PS2, PS7 or PS8 and then, if its TIC is adequate (TIC2) or more than adequate (TIC3), the farmer use the irrigation strategy IS2 with a probability of 57%.

Results from Linear modelling and Generalised linear modelling (Figure 15, step 6) show that: i) TIC is an explanatory typology for the duration of the irrigation cycle but not for the daily water amount; ii) none of the typologies (PS, ES and TIC) explains the differences regarding the initial water amount; iii) TIC explains the differences regarding the pause between two irrigation cycles; iv) PS, ES and TIC explain individually the three multi-modal variables the reaction in the event of rainfall, the start of the irrigation and the end of the irrigation. The Akaike Test indicates that PS typology better explains the three multi-modal variables than the two others typologies (ES and TIC).

Results did not allow the irrigation strategy to be deduced directly from data on production systems or equipment systems but this can be done from the theoretical irrigation capacity: i) Linear model results gave a linear relationship between the duration of the irrigation cycle and the theoretical irrigation capacity; ii) if the calculated duration is more than 6 days, the irrigator uses IS1, otherwise he uses IS2.

### V.1.6 Discussion

The purpose of the study was to investigate the variability of irrigation strategies over a large area and to determine whether structural data on farming systems could allow to determine irrigation strategies. Irrigation strategies were described through a decisional model. This decision modelling, coupled with crop modelling, allows estimating the effects of irrigation strategy on water demand and yield. This bio-decisional modelling allows to take into account spatio-temporal climatic variability.

**Tableau 6: Percentage of farms in each county in the different Production Systems (PS), Equipment Systems (ES) and Theoretical irrigation capacity (TIC) classes.**

	PS1	PS2	PS3	PS4	PS5	PS6	PS7	PS8
Agout zone	15.6	40.6	9.4	18.8	3.1	6.3	3.1	3.1
Baïse zone	8.3	8.3	20.8	33.4	4.2	25	0	0
	ES1	ES2	ES3	ES4				
Agout zone	56	22	6	16				
Baïse zone	88	8	0	4				
	TIC1	TIC2	TIC3					
Agout zone	3	50	47					
Baïse zone	56	42	2					

The three sub-system typologies PS, ES and TIC show a real diversity of farming systems and some types being more present in A or B zones (Tableau 6). Production systems, characterised by the highest proportion of irrigated field crops and non irrigated fodder crops (PS3, PS6) are more concentrated in B while those with special crops and the highest proportion of non irrigated field crops (PS1, PS2) are well represented in A. Socio-economical variables (revenue from sales, labour, installation date) are not discriminating because they are linked to other variables: revenue from sales is linked to irrigated field crops and unirrigated special crops (like grapes); setting date and labour are linked to irrigated special crops (like tobacco). The opposition between farms with breeding stock and farms

with field crops is well known by experts and appears in the French OTEX (Butault, 1985; Agreste, 2003). The fact that the youngest farmers produce irrigated special crops (tobacco) can be related to the promotion of this new production by local agreements (France Agricole, 2003). Equipment Systems is more diversified in A than in B, where 88% of farmers use mainly travelling gun sprinklers (Tableau 6). This can be explained by the topography, zone A being a flat area while B a hilly one. A large circular and flat area is necessary for central pivot systems whereas travelling gun sprinklers are very versatile and total or integral sprinkler covers are well suited to small areas. Regarding TIC typology, the proportion of TIC3 (more than adequate irrigation capacity) is higher in A (47%) than in B (2%) while for TIC1 (unadequate irrigation capacity) it is the opposite (Tableau 6). This uneven distribution can be linked to the unequal distribution of the equipment system: centre pivot and integral or total sprinkler covers, more frequent in A, allow a larger irrigation capacity than the travelling gun sprinklers, which are dominant in B.

Only two irrigation strategy classes have been found, IS1 and IS2 representing 77% and 23% of the farmers, respectively. This variability appears rather limited (only two classes) compared to the diversity of the modalities of the irrigation variables (Figure 16). Class IS2 associates farmers with rather “intensive practices” (a large amount of water per day and a short irrigation cycle without any stop) while farmers in IS1 have more “extensive practices”. Regarding farmers’ behaviour in the case of rainfall and how they manage the beginning and the end of the irrigation season, some tendencies within the two groups can be discerned, but all the classes are represented in each IS class. The fact that these three multi-modal variables are not fully discriminating is due to a limitation of such a classification method (Dobremez and Bousset, 1995). Consequently, the two IS classes are badly explained by using simultaneously all variables.

The small number of IS classes may also be due to the use of standard answers to the survey. Farmers from the two zones receive county-based advice from agricultural county advisors, co-operative agribusinesses, local agricultural newspapers and warning bulletins. All this information contributes to standardise maize irrigation guidance. Differences between the two ISs result mainly from the variables corresponding to the returning rule which is a more strategic choice for farmers: the water amount is often the first thing to be determined because it is linked to the equipment system just as the duration of the irrigation cycle which also depends on the general farm organisation (Mircovich, 1999). The other variables are more related to operational irrigation; they are more intuitive and correspond to answers to contextual and risky situations for the farmers creating an important variability. Such variability is in agreement with a study conducted on the Baïse zone which showed that irrigation strategies and decision rules vary because of sociological and economical factors (Salles, 2003).

All interviewed farmers from B belong to IS1 while, in A, 41% belong to IS2 and 59% to IS1. Then, there is only one irrigation strategy in B. This can be due to a potential impact of the institutional context. Actually, B belongs to the Neste system. Since 1965, farmers from this zone have received training for collective access to water and this may lead to standardisation of irrigation management. Weber (1998) points out that the groups of farmers who irrigate from the collective networks of CACG<sup>12</sup> are homogeneous because they were advised and trained using the same references specified for the Neste system. Farmers in A do not have the same collective water management background as in B and their management is more varied. It can thus be assumed that the hydraulic and institutional context explain the

---

<sup>12</sup> Compagnie d'Aménagement des Coteaux de Gascogne, water provider for the Neste System.

difference between the two zones and that the variability of the irrigation strategies mainly depends on the characteristics of the regions.

The linear relationship found between the theoretical irrigation capacity and a part of the irrigation strategy is well suited to the regional scale because such information is available each year from the farmer's administrative declaration on his irrigation and production system. In our study case, the range of the theoretical irrigation capacity classification thresholds has been established for two similar zones regarding soil and climatic data. For large areas where soils types and climate would be more differentiated, thresholds discriminating the levels of TIC should be adapted.

Regarding the part of the irrigation strategy not explained by any of the sub-system variables (the decision rules for starting and ending irrigation or reacting after rainfall), several ways of estimation would be possible: i) using an average value over the region (as performed in ADEAUMIS by Leenhardt et al. (2004a, 2004b); ii) using a stochastic approach by drawing thresholds from our survey; iii) improving the rules by increasing the number of surveyed farmers. For this latter option, it would be of particular interest to study whether irrigation decisions are linked to previous technical choices like sowing date or maize earliness.

#### V.1.7 Conclusion

Back to our initial question regarding regional irrigation demand, our results suggest that using a typology based on the theoretical irrigation capacity is a way of determining a part of irrigation strategy over a large scale which could thus provide some key to map irrigation strategies.

Assessing the irrigation strategies over large areas from administrative data bases raises the problem of the loss of accuracy common to studies on scale changes (Leenhardt et al., 1994). As the irrigation represented as a set of decision rules can be modelled coupled with a crop model, the loss of accuracy could be minimised thanks to the progress in spatialisation of crop models (Faivre et al., 2004): use of spatialised meteorological data (from several meteorological stations or from interpolation techniques), improvement of the adequacy between crop models outputs and evaluation data and more generally, use of up/down scaling methods.

#### V.1.8 Acknowledgements

This study was partly funded by the DADP program from INRA (Recherches Pour et Sur le Développement Régional). The authors thank Bernard Lacroix for his expertise, Hervé Cardot for his advice on statistical analyses and David Abert for the first draft of the analyses.

**V.2 Article 2 : Identification de la diversité des pratiques culturelles des agriculteurs à l'échelle régionale. Application aux pratiques de choix de précocité et de semis des maïsiculteurs de la zone de la Baise-Amont dans le sud-ouest de la France**

Maton, L.<sup>1,\*</sup>, Leenhardt, D.<sup>1</sup>, Bergez, J.-E.<sup>1</sup>

1 : INRA I.N.R.A. - Centre de Recherches de Toulouse  
UMR 1248 ARCHE (AgRosystèmes Cultivés & HERbagers)  
Equipe MAGE (Modélisation Appliquée à la Gestion des ressources Environnementales sur un territoire)  
BP 52627 - F 31326 Castanet Tolosan Cedex

Titre court: Identification de la diversité de pratiques de choix de précocité et de semis des maïsiculteurs d'un périmètre irrigué

Titre anglais: How do they choose their maize precocity and when do they sow it?  
Identifying the agricultural practices diversity of the maize growers from a large irrigated perimeter in the south-western France

Article soumis à Cahiers d'Agriculture, Novembre 2005.

\* Corresponding author:

Tel : 00-33-5-61-28-50-30 ; Fax : 00-33-5-61-73-55-37 ; e-mail : [maton@toulouse.inra.fr](mailto:maton@toulouse.inra.fr)

---

Laure MATON, doctorante en agronomie  
Delphine Leenhardt, chargée de recherches  
Bergez Jacques-Eric, chargé de recherches

## Résumé

Cet article a pour objectif d'identifier la diversité des pratiques des maïsiculteurs d'un périmètre irrigué du sud-ouest de la France quant à leurs choix de précocité et leurs pratiques de semis. Ces deux éléments de l'itinéraire technique du maïs irrigué pourraient être des éléments clefs de la gestion de l'irrigation par les maïsiculteurs.

A l'échelle régionale, l'identification de la diversité des pratiques culturelles nécessite des développements méthodologiques particuliers. Dans notre étude, la démarche repose sur l'utilisation de trois types de données pour un terrain d'application situé dans le sud-ouest de la France: des données représentant des pratiques recommandées, des données d'expert utilisées dans un modèle d'estimation des dates de semis et des données factuelles (calendriers) issues d'enquêtes postales.

L'analyse des données factuelles montre que les associations {précocité, date de semis} sont très variées une année donnée au sein du périmètre irrigué. La variabilité interannuelle des proportions de ces associations n'est pas négligeable. L'analyse comparée des trois groupes de données permet d'identifier une diversité pouvant être expliquée par la variabilité spatiale du climat. Il s'agit d'une diversité des périodes de démarrage des semis et du groupe de précocité majoritaire en surface dans chaque petite région agricole. Elle permet également d'identifier une diversité de conduites du semis et des choix de précocité entre exploitations agricoles qui serait due à des organisations de chantier et des stratégies de production variées. Les variables permettant de décrire la diversité des conduites entre exploitation sont identifiées. Il s'agit du nombre de groupes de précocité semés dans la sole, de leur ordre de semis, de leur répartition en surface et de la vitesse du chantier de semis. Ces variables forment des combinaisons de pratiques.

La discussion porte sur la méthode utilisée pour identifier la diversité des pratiques culturelles à l'échelle d'un vaste territoire et sur la possibilité de mettre les combinaisons de pratiques identifiées en relation avec des stratégies de production et d'organisation du chantier de récolte.

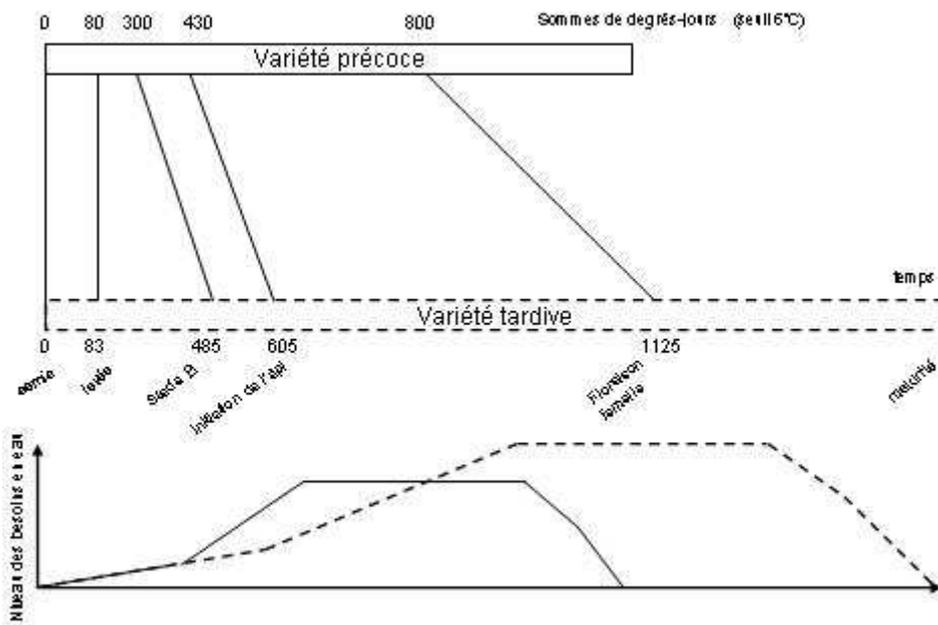
Mots clés : pratiques culturelles, échelle régionale, précocité, dates de semis, demande en eau

## V.2.1 Introduction

La précocité d'un hybride est un critère de choix variétal extrêmement important pour les maïsiculteurs car elle influence la rentabilité de la culture. Etant donnée la nature hybride des semences de maïs en Europe, les agriculteurs doivent se réapprovisionner en semences chaque année. C'est un choix de début de campagne réalisé au moment où l'agriculteur fixe ses objectifs de production (Nolot et Debaeke, 2003).

Face aux contraintes croissantes pesant sur l'irrigation du maïs, de nouvelles stratégies variétales consistant à semer des variétés plus précoces apparaissent. Le choix de précocité devient, pour certains agriculteurs, un élément clef de la gestion de l'irrigation (France agricole, 2005).

La précocité d'une variété de maïs détermine la longueur du cycle de la plante et explique en partie le niveau des besoins en eau de la plante (Girardin, 1998). En France, des expérimentations sont actuellement menées pour estimer la diminution de besoins en eau pouvant être induite par le semis de variétés plus précoces. La date de semis conditionne le positionnement des périodes de besoins en eau de la plante pendant la campagne d'irrigation. L'étalement des semis d'une culture au sein d'un périmètre irrigué peut permettre de réduire le pic de demande en eau (Oweis et Hachum, 2001). La précocité des variétés et les dates de semis doivent donc être considérées conjointement dans une perspective de diminution de la demande en eau et/ou de décalage du pic de demande en eau, que ce soit à l'échelle de la parcelle, de l'exploitation ou d'une région.



**Figure 20 : Présentation des différences physiologiques (besoins en sommes de degrés jours des différentes phases du développement de la plante et niveau de besoin en eau) entre une variété précoce et une variété tardive (d'après Girardin (1998))**

Dans la perspective d'estimer la demande en eau d'irrigation à l'échelle régionale en tenant compte de la précocité des variétés semées et des dates de semis au sein d'un périmètre irrigué, cet article a pour objectif d'identifier la diversité des pratiques de semis et de choix de

précocité des maïsiculteurs d'un grand périmètre irrigué du sud ouest de la France. Par choix de précocité, nous entendons les types de précocité que l'agriculteur choisi de semer et la façon dont il les répartit dans sa sole au cours du chantier de semis. Par pratique de semis, nous entendons la façon dont l'agriculteur gère son chantier de semis.

A l'échelle locale, l'identification de la diversité des pratiques se fait par enquête exhaustive auprès des agriculteurs (Leroy et al., 1992; Ondersteijn et al., 2003; Sébillotte et Servettaz, 1989). Ces enquêtes permettent d'identifier finement les contraintes des agriculteurs et leurs critères de décision. La diversité des pratiques peut être évaluée à partir de ces données. A l'échelle régionale, la démarche de caractérisation de la diversité des pratiques est différente. On cherche à la quantifier. Les travaux nécessitant une représentation des pratiques culturelles réalisées au sein d'un territoire donnent une description des itinéraires techniques et de leurs proportions à partir d'avis d'expert ou à partir de recommandations des instituts techniques (Mignolet et al., 2004). Les statistiques agricoles contiennent peu d'informations sur les pratiques des agriculteurs et aucune sur les décisions des agriculteurs. La diversité décrite porte essentiellement sur la structure des exploitations agricoles. Des enquêtes «Pratiques culturelles» sont réalisées par le SCEES (en 1994 et 2001 pour les deux dernières) mais le principe réside dans le recueil des interventions culturelles pour une parcelle - déterminée par sondage- par exploitation agricole enquêtée. Cela ne permet pas d'identifier la diversité des gestions globales de la sole d'une culture donnée. Ainsi, à partir de quelles données et avec quelle méthode identifier la diversité des pratiques culturelles sur un territoire ?

Nous proposons de rechercher la diversité des pratiques à partir de la confrontation de plusieurs sources de données : des tendances identifiées à partir de recommandations d'experts locaux des pratiques, des données factuelles sur les modalités des pratiques recueillies par enquête postale et des données d'expertise utilisées dans un modèle estimant les dates de semis des cultures d'été à l'échelle régionale. L'analyse des interviews des experts, présentée dans une première partie, fournit des connaissances générales sur la zone et oriente l'analyse des données factuelles quantitatives. La mobilisation de données d'expertise utilisées dans un modèle permet de comparer les pratiques réelles à des pratiques issues de l'expertise. Cette démarche s'inspire de travaux ayant montré l'intérêt des modèles agronomiques pour l'analyse des pratiques des agriculteurs (Nesme et al., 2005). L'analyse des données factuelles est présentée ensuite à trois niveaux : la zone entière, la petite région agricole, et l'exploitation agricole. Nous inspirant du concept d'itinéraire technique qui stipule l'existence d'une cohérence entre les actes techniques (Meynard et al., 2001), nous analysons les liens entre les choix de précocité et les pratiques de semis en nous demandant comment le choix de certaines précocités conditionne dans les faits les dates de semis ou inversement et si ces liens varient d'un agriculteur à l'autre. La dernière partie permet de conclure sur la diversité des pratiques et la possibilité d'accéder à une représentation des pratiques réelles des agriculteurs à partir de notre démarche.

## V.2.2 Matériel et méthodes

### V.2.2.1 **La zone d'étude**

Le terrain d'application de cette étude est un périmètre irrigué de 500 km<sup>2</sup> en Midi-Pyrénées: le bassin versant de la Baïse-Amont. Il est situé au sein du système Neste, vaste réseau d'alimentation d'eau géré par la Compagnie d'Aménagement des Coteaux de Gascogne (CACG). Il s'étend sur deux départements: le Gers et les Hautes-Pyrénées et est recoupé par 5 Petites Régions Agricoles (PRA). Les PRA sont des subdivisions des Régions

Agricoles, unités définies par des critères d'homogénéité agro-climatique et économique, et respectant les limites administratives des départements (Klatzmann, 1955).

Le bassin versant subit une importante variabilité climatique interannuelle. La pluviométrie présente une forte variabilité interannuelle. Pour les mois correspondant à la période des semis des cultures d'été (mars-juin), la pluviométrie moyenne est de 265 mm et peut varier entre 25 mm au minimum et 650 mm au maximum. Le bassin versant est soumis à un gradient climatique Nord-Sud: l'analyse d'une série climatique de 32 ans sur trois stations climatiques situées sur un axe nord sud entre Auch et la zone nord du département des Hautes-Pyrénées montre qu'en moyenne, la pluviométrie est moins importante de 30 mm au nord de la zone qu'au sud en avril-mai. Il existe également un gradient de température: la médiane des sommes de température en base 6 s'échelonne de 2125 à 1675 °C j du nord au sud pour la période du 21 avril au 15 octobre, de 2275 à 1900°C j pour la période du 21 avril au 31 octobre (Figure 21), d'après l'atlas agroclimatique du maïs (ARVALIS-Institut du végétal et METEO-FRANCE, 2003)).

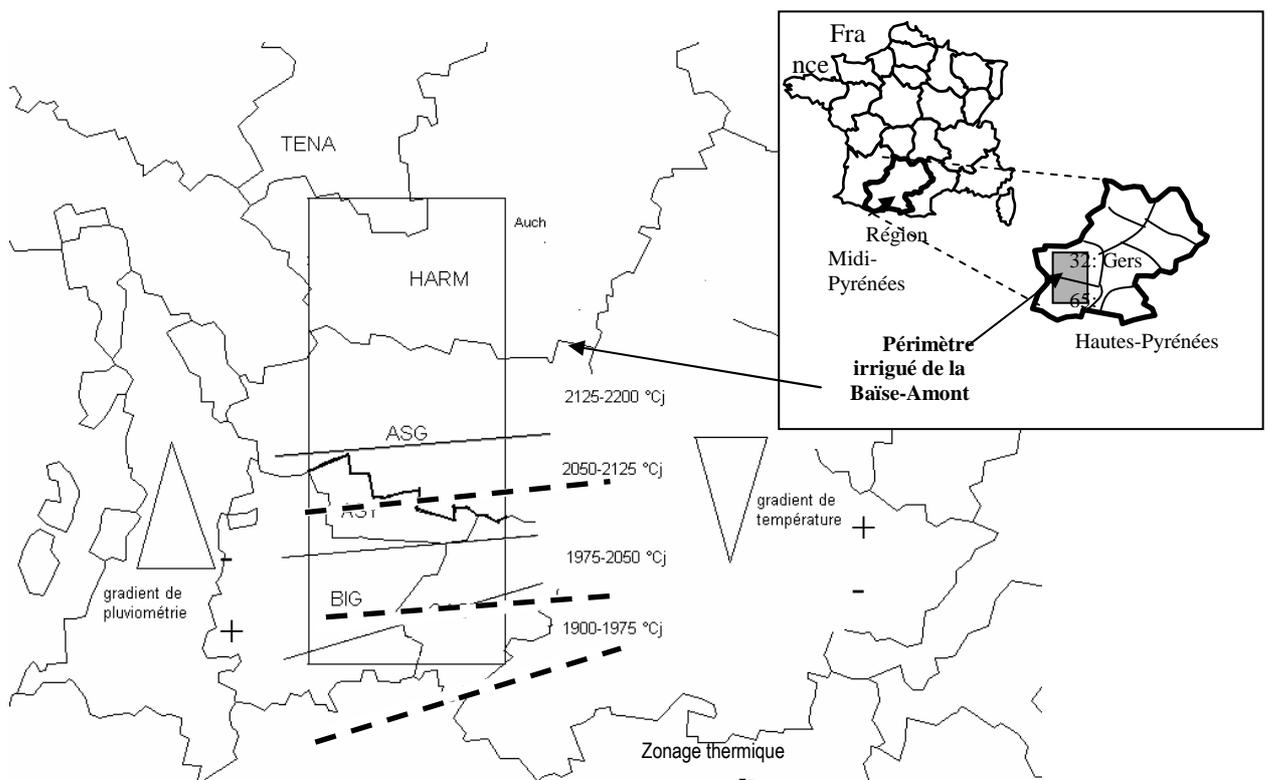
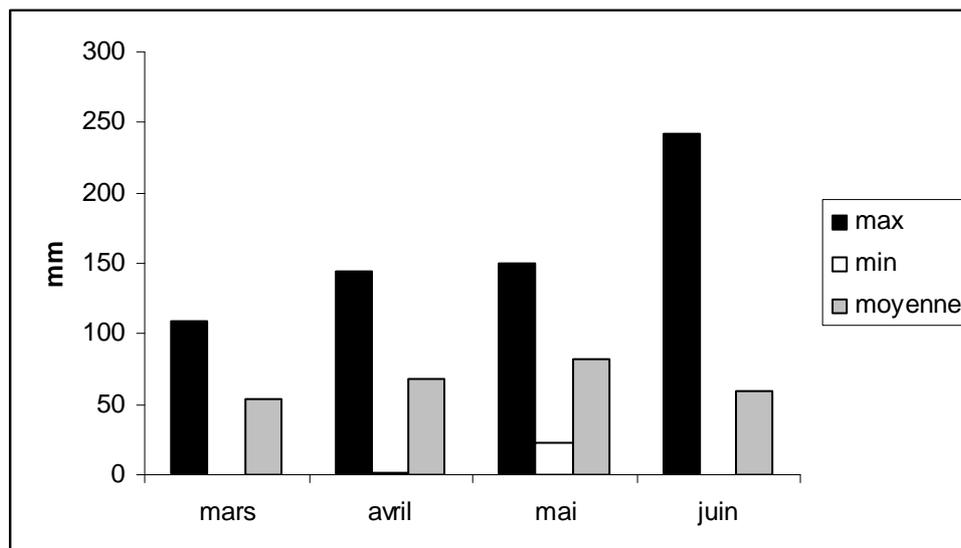


Figure 21 : Présentation de la zone d'étude (schématisée par le cadre rectangulaire). Les limites des PRA sont représentées par des lignes continues, le zonage climatique (pluviométrie et températures) par des traits discontinus.



**Figure 22 : Pluviométrie mensuelle (moyenne, maximale et minimale) d'une série climatique de 39 ans pour les mois de mars, avril, mai et juin (station d'Auch, 32 – 1961 à 1999)**

On peut distinguer trois grands ensembles géomorphologiques: une zone de piémont au sud, une zone d'alternance de vallées et de coteaux et une zone de plaine au nord. On trouve principalement des sols à dominante argilo-calcaire nommés « Terrefort » et des sols à dominante limoneuse plus ou moins hydromorphes selon la profondeur de la couche d'argile, nommés « Boulbène ».

La surface agricole utile (SAU) du périmètre représente environ 35500 ha. D'après une estimation réalisée à partir des données du recensement général agricole de 2000, 530 exploitations, représentant 11468 ha, ont irrigué au moins une fois en 2000 (soit 32% de la SAU) et 80% des surfaces irriguées étaient occupées par du maïs grain (Agreste, 2002). Les exploitations sont principalement de 2 types : « polyculture élevage » et « grande culture ».

#### **V.2.2.2 Les données utilisées pour identifier la diversité des choix de précocité et des pratiques de semis des agriculteurs**

Nous disposons de données climatiques (pluviométrie journalière de la station climatique d'Auch (32) pour les années 2000 et 2001) et de trois sources d'information sur les pratiques des maïsiculteurs.

##### *V.2.2.2.1 Des données qualitatives sur les pratiques culturales recommandées*

Des données qualitatives ont été recueillies en 2003 par interview auprès des 3 conseillers de coopératives situées dans la zone et d'un conseiller d'un négoce. Peu de négoce de la zone sont à la fois distributeurs et stockeurs. Celui qui a été interviewé est bien implanté dans la zone. Le choix des variétés des maïsiculteurs est en effet très influencé par les distributeurs (Darracq, 1996). Les distributeurs peuvent être des coopératives d'approvisionnement et de collecte, des établissements privés, des distributeurs indépendants et les semenciers eux-mêmes. Les établissements d'approvisionnement et de collecte, coopératifs ou privés, sont souvent les premiers prescripteurs auprès des agriculteurs (Guichard, com. pers.). Leur activité de collecte s'accompagnant de celle de stockage et de vente, ils sont partie prenante dans l'activité du producteur. De plus, ils sont amenés à établir des cahiers des charges que les agriculteurs doivent ensuite respecter. Ils développent donc de plus en plus l'activité de conseil. Les conseillers technico-commerciaux d'organismes d'approvisionnement et de

stockage (O.A.S.) ont donc été considérés comme « experts locaux » des pratiques des agriculteurs en matière de choix de précocité. Cette enquête a permis de: (i) recueillir des données qualitatives sur les stratégies commerciales des organismes distributeurs et stockeurs et les choix de précocité des agriculteurs; (ii) obtenir les quantités de semences des différentes variétés vendues par une des trois coopératives ; (iii) contextualiser les données quantitatives et orienter leur analyse. Les conseillers ont en effet présenté les pratiques qu'ils recommandent et permis d'identifier des facteurs déterminants des pratiques.

*V.2.2.2.2 Des données quantitatives sur les modalités des pratiques réelles au cours de deux années.*

Des données quantitatives, obtenues par enquêtes postales réalisées en 2000 et 2001. Un questionnaire a été envoyé auprès des 439 irrigants du périmètre contractant avec la CACG. Les questionnaires portaient sur l'ensemble des cultures d'été, les variétés et les dates de semis correspondantes ainsi que le type de sol majoritaire (terrefort ou boubène) sur la parcelle pour chaque date de semis. Les enquêtes spécifiaient enfin la surface semée à chaque date de semis, ce qui a permis le calcul de la surface en maïs grain irrigué sur chaque exploitation. Pour caractériser l'exploitation, le type d'exploitation (polyculture-élevage ou grande culture) et la main d'œuvre avait été demandé mais trop peu de fiches renseignant la main d'œuvre, cette donnée n'a pu être incluse dans l'analyse.

Les taux de retour des enquêtes postales ont été de 45% en 2000 et 21% en 2001 et 158 et 67 questionnaires ont pu être exploités respectivement pour 2000 et 2001 (soit des taux respectifs de 36% et 15%).

Seules les données concernant le maïs grain irrigué ont été utilisées. Un prétraitement sur les données brutes a été réalisé. Les variétés de maïs renseignées par les agriculteurs ont été traduites en groupe de précocité (Tableau 7). Des variables décrivant le choix de précocité de l'agriculteur et l'organisation du chantier de semis ont été créées à partir des données concernant le maïs :

Pour le chantier de semis, il s'agit de trois variables basées sur la déclaration des dates de semis par les agriculteurs : (i) le nombre de jours de semis, (ii) la date du premier jour de semis et (iii) la durée du chantier (nombre de jours entre la première et la dernière date de semis déclarées par l'agriculteur).

Pour le choix de précocité, il s'agit: (i) du nombre de groupes de précocités utilisés, (ii) du groupe de précocité majoritaire, (iii) de la proportion des différents groupes de précocité dans la sole.

**Tableau 7: Caractéristiques de différents groupes de précocité (d'après l'AGPM- technique, 2003)**

	Très tardif (tT)	Tardif (T)	Demi tardif (1/2T)	Demi précoce (1/2P)	Précoce (P)	Très Précoce (tP)
Dénomination	E2	E1	D	C	B	A
Besoins en degrés jours du semis à la récolte (32% de teneur en eau du grain)	2200-2005	2000-1930	1925-1880	1875-1775	1775 – 1655	1650 – 1555
Indices de précocité	600-700	480-580	390-460	290-380	220-280	< 210

Quarante-huit maïsiculteurs ont répondu à la fois en 2000 et 2001. La comparaison de leurs réponses permet d'analyser la variation interannuelle des choix de précocité et du chantier de semis. Elle permet notamment d'analyser le changement de type de précocité et de nombre de groupes de précocité dans la sole. Nous avons considéré comme stable des valeurs (nombre de jours et surface) ne variant pas de plus de 20% entre 2000 et 2001.

L'analyse des enquêtes postales est basée sur les outils statistiques classiques d'analyse de données. Nous comparons les liens entre semis et choix de précocité conseillés par les O.A.S. et les données recueillies par enquête postale. Nous supposons que cette comparaison permet de quantifier la diversité des pratiques et peut permettre de mettre en évidence des stratégies particulières.

#### *V.2.2.2.3 Un modèle estimant les dates de semis des cultures d'été à partir d'une représentation de l'organisation du chantier*

Un modèle d'estimation de la distribution des dates de semis des cultures d'été à l'échelle régionale a été calibré pour la zone d'étude (Leenhardt et Lemaire, 2002b). Ce modèle, appelé SIMSEM, est basé sur (i) une typologie d'exploitation locale permettant de connaître les cultures d'été semées, les types de sol, la main d'œuvre et le nombre de vaches pour chaque type d'exploitation et le nombre d'exploitations par type (ii) un modèle de bilan hydrique pour le sol permettant de déterminer les jours disponibles pour le semis calibré par rapport aux dates de semis habituelles et (iii) des données d'expertise spécifiques à la région d'étude sur l'organisation du chantier. Ces données d'expertise ont permis de définir les dates à partir desquelles les cultures d'été sont semées ainsi qu'un ordre de priorité entre cultures. Concernant l'organisation du chantier de semis, le nombre d'heure par hectare a été défini selon le type de sol. Le nombre d'heures de travail par jour et le nombre d'heures concurrentes en fonction du nombre de vaches pour les exploitations en polyculture élevage ont également été fixés. Un calcul utilisant ces données ainsi que celles issues de la typologie permet l'estimation du nombre de jours nécessaires pour le semis des cultures d'été. Ces jours nécessaires sont enfin déterminés en fonction des jours disponibles établis par le modèle de bilan hydrique avec des données climatiques en point de grille affectées à chaque PRA. Une distribution des dates de semis est ainsi donnée pour une année donnée pour chaque PRA.

Le modèle a été testé grâce aux données d'enquête postale 2000 complètes présentées ci-dessus. La comparaison des dates simulées et observées est présentée par Leenhardt et

Lemaire (1998). L'estimation est bonne pour deux PRA (ASG et GAS). Une discussion sur les sources d'erreur pour les 3 autres PRA est présentée dans l'article. Concernant la représentation de l'organisation du chantier, la non représentation de chantiers concurrents tel que l'application de fongicides sur les céréales est évoquée.

Dans notre étude, afin d'identifier la diversité des pratiques, le nombre de jours de semis estimé à partir des règles de SIMSEM est comparé au nombre de jours de semis déclarés par les agriculteurs en 2000.

#### V.2.2.2.4 Représentativité des échantillons

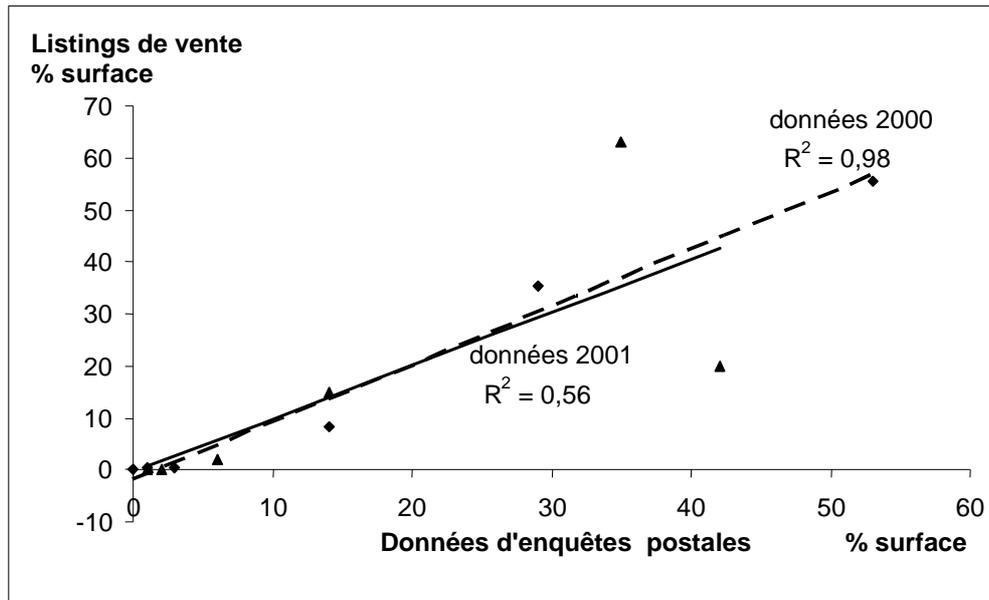
L'échantillon de 2000 compte 158 agriculteurs, représentant 4735 ha de maïs grain, soit 44% des surfaces en maïs grain de la zone d'étude (d'après Agreste, 2002). L'échantillon de 2001 compte 67 agriculteurs représentant 1904 hectares, soit 18% des surfaces en maïs grain de la zone. Les surfaces en maïs des agriculteurs ayant répondu les deux années représentent 1320 ha de maïs grain en 2000 et 1354 ha en 2001.

Nous avons classé les agriculteurs au sein des 5 PRA. Le tableau 2 présente: (i) la répartition des agriculteurs des deux échantillons au sein de chaque PRA comparée aux données du RGA 2000 sur l'ensemble des maïsiculteurs irrigants de la zone; (ii) la part de surface irriguée en maïs de chaque PRA d'après le RGA 2000 et les parts de surface en maïs des échantillons pour chaque PRA. Les deux échantillons sont correctement stratifiés par rapport à la surface en maïs grain irrigué dans chaque PRA et au nombre d'agriculteurs dans chaque PRA ( $R^2=0.99$  pour 2000 et 2001 pour les deux critères).

**Tableau 8 : Répartition des agriculteurs ayant répondu à l'enquête et des surfaces de maïs irrigué dans chaque PRA. Le tableau présente les données exhaustives pour la zone puis les données calculées à partir des retours d'enquêtes**

PRA	Données exhaustives (données RGA 2000 - 500 individus)			Données calculées à partir des enquêtes 2000 (158 agriculteurs) et 2001 (67 agriculteurs)			
	% de maïsiculteurs irrigants	% de SAU	% de surface de maïs irrigué (grain et semence)	% de maïsiculteurs irrigants		% de surface de maïs grain irrigué	
				2000	2001	2000	2001
HARM (27%)	11	14	7	13	18	8	11
ASG (34%)	54	56	64	58,5	54,5	69	64
ASY (18%)	10	7	12	11,5	11	8	11
BIG (12%)	18	14	12	12,5	12	11	10
GAS (9%)	9	9	5	4,5	4,5	4	4

En comparant les données du listing de vente d'une coopérative bien implantée dans la PRA ASG aux données d'enquêtes postales, nous pouvons apprécier la cohérence des deux types de données. En considérant une densité moyenne de 80000 pl ha<sup>-1</sup>, la surface couverte par chaque groupe de précocité a été estimée. Les données des deux sources d'information sont bien corrélées en 2000 ( $R^2= 0.98$ ) (Figure 23). En 2001, la corrélation est moins bonne ( $R^2= 0.56$ ). La taille plus réduite de l'échantillon peut expliquer cette moins bonne représentativité.



**Figure 23 : Comparaison des pourcentages de surface (ha) pour chaque type de précocité pour les données d'enquête postale et les données du listing de vente d'une des coopératives**

### V.2.3 Modes d'intervention des organismes d'approvisionnement et de stockage dans les choix de précocité des variétés des maïsiculteurs de la zone de la Baïse

#### V.2.3.1 La proposition commerciale des O.A.S.

En fonction de leurs résultats commerciaux et des résultats des essais d'ARVALIS-Institut du végétal, les coopératives établissent une gamme de vente de précocités qui est présentée aux agriculteurs à partir de janvier. L'achat des variétés auprès des semenciers a lieu de novembre à février et un réapprovisionnement peut se faire jusqu'à mi-mars environ. En 2003, les 3 coopératives enquêtées ont proposé des gammes d'indices tardifs proches les unes des autres (480-600, 450-520 et 450-580) correspondant à au moins 2 groupes de précocité. Ces gammes représentent une vingtaine de variétés. Le négoce enquêté a proposé une gamme de variétés de précocité E2 à C.

La proposition commerciale aux agriculteurs, réalisée à partir de la gamme de vente, est personnalisée. Elle tient compte du climat local, de la nature des sols de l'exploitation (« s'ils se réchauffent vite ou non ») et des contraintes au moment de la récolte. Elle tient également compte des connaissances accumulées au cours du temps (rendement, résultats économiques) et des dates de semis « habituelles » de l'agriculteur. Certains technico-commerciaux considèrent que les agriculteurs ne tiennent compte de leurs conseils que pour 80-90 % de leur sole en maïs et gardent ainsi une surface pour faire des essais indépendamment de leur distributeur habituel.

ARVALIS-Institut du végétal a établi que 8 années sur 10 dans la zone, la date conditionnant le changement de précocité vers une variété plus précoce est le 15 mai (Lorgeou et Souverain, 2003). Les agriculteurs ont la possibilité d'échanger leurs variétés contre des variétés plus précoces s'ils connaissent des difficultés pour semer dans les périodes préconisées. Contrairement au négoce qui semble permettre des échanges importants, les coopératives ont mentionné la difficulté d'échanger plus de 10% des commandes.

### V.2.3.2 Les conseils des O.A.S.

Les conseils des O.A.S. concernent à la fois le nombre de groupes de précocité, les types de précocités et leur ordre de semis dans le temps.

#### V.2.3.2.1 *Le nombre de groupe de précocité*

Les distributeurs enquêtés incitent les maïsiculteurs à semer plusieurs indices de précocités au sein de leur sole. Ils estiment en effet que les maïsiculteurs ont souvent tendance à souhaiter semer les variétés les plus tardives étant donné leur potentiel de rendement élevé alors que le potentiel de sommes de température ne le permet pas. Les technico-commerciaux enquêtés parlent «d'étalement des risques». Certains distributeurs considèrent que le nombre de groupes de précocité doit être proportionnel à la surface à semer alors que d'autres estiment qu'il dépend surtout du temps mis à semer étant donné que les exploitations aux plus grandes surfaces ont souvent les moyens matériels et humains pour semer rapidement. Plus le chantier de semis est étalé, plus le nombre de groupes de précocité semés doit être important. Par contre, les distributeurs ne prennent pas en compte la localisation de l'exploitation dans le conseil du nombre de précocité.

#### V.2.3.2.2 *Le type de précocité*

Le conseil sur les types de précocité est directement lié aux dates de semis habituelles de l'agriculteur. Des bulletins d'information sur les dates limites de semis pour chaque groupe de précocité sont régulièrement distribués et ce conseil est organisé par zone climatique. Le négoce distribue par exemple des documents «variétés et dates de semis» en distinguant la zone de coteaux (au nord de la zone de la Baïse et correspondant aux PRA HARM et ASG) et la zone de piémont (au sud-ouest correspondant à la PRA BIG). Ainsi, au nord de la zone, des variétés E1 et E2 sont proposées tandis que les variétés D et C sont préconisées dans la zone de piémont où le semis aurait lieu plus tardivement. Cependant, depuis que le contexte économique est moins favorable au maïs et que les progrès en amélioration génétique le permettent, les variétés du groupe demi-tardif sont de plus en plus proposées quelques que soient les dates de semis habituelles de l'agriculteur. Selon les coopératives, ces variétés, dont le rendement est proche de celui des variétés E1, permettent (i) une sécurisation du potentiel de rendement même en cas de semis retardé, (ii) une baisse des coûts de séchage - qui représentaient 17% des charges du maïs en 2003 selon ARVALIS-Institut du végétal - car l'humidité du grain à la récolte est comparativement plus faible que pour une variété tardive et (iii) l'assurance que le chantier de récolte se déroule dans de bonnes conditions car, étant plus précoce, les jours disponibles pour la récolte sont plus nombreux.

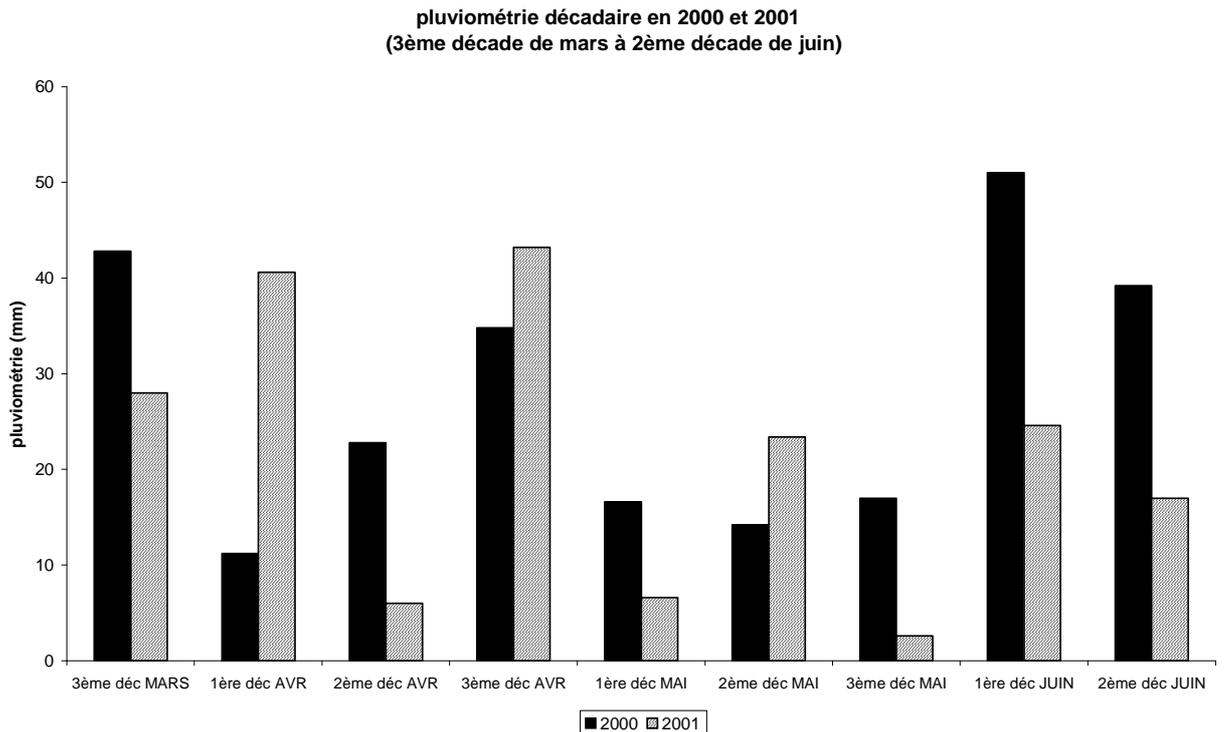
#### V.2.3.2.3 *L'ordre de semis des précocités au sein de la sole de maïs*

Les distributeurs conseillent de semer les variétés E2 en début de période de semis, puis les E1, les demi-tardives et ensuite les variétés plus précoces. Ils signalent que les parcelles en sol «terrefort» sont semées avant les parcelles en sol «boulbène» qui se ressuient moins vite. Ils mentionnent que quelques agriculteurs, minoritaires dans la zone de la Baïse, cherchent à vendre une partie de leur production au marché de soudure. Ce marché qui a lieu fin août début septembre incite donc à semer tôt des variétés de type précoce.

## V.2.4 Les pratiques des maïsiculteurs

### V.2.4.1 La pluviométrie en 2000 et 2001

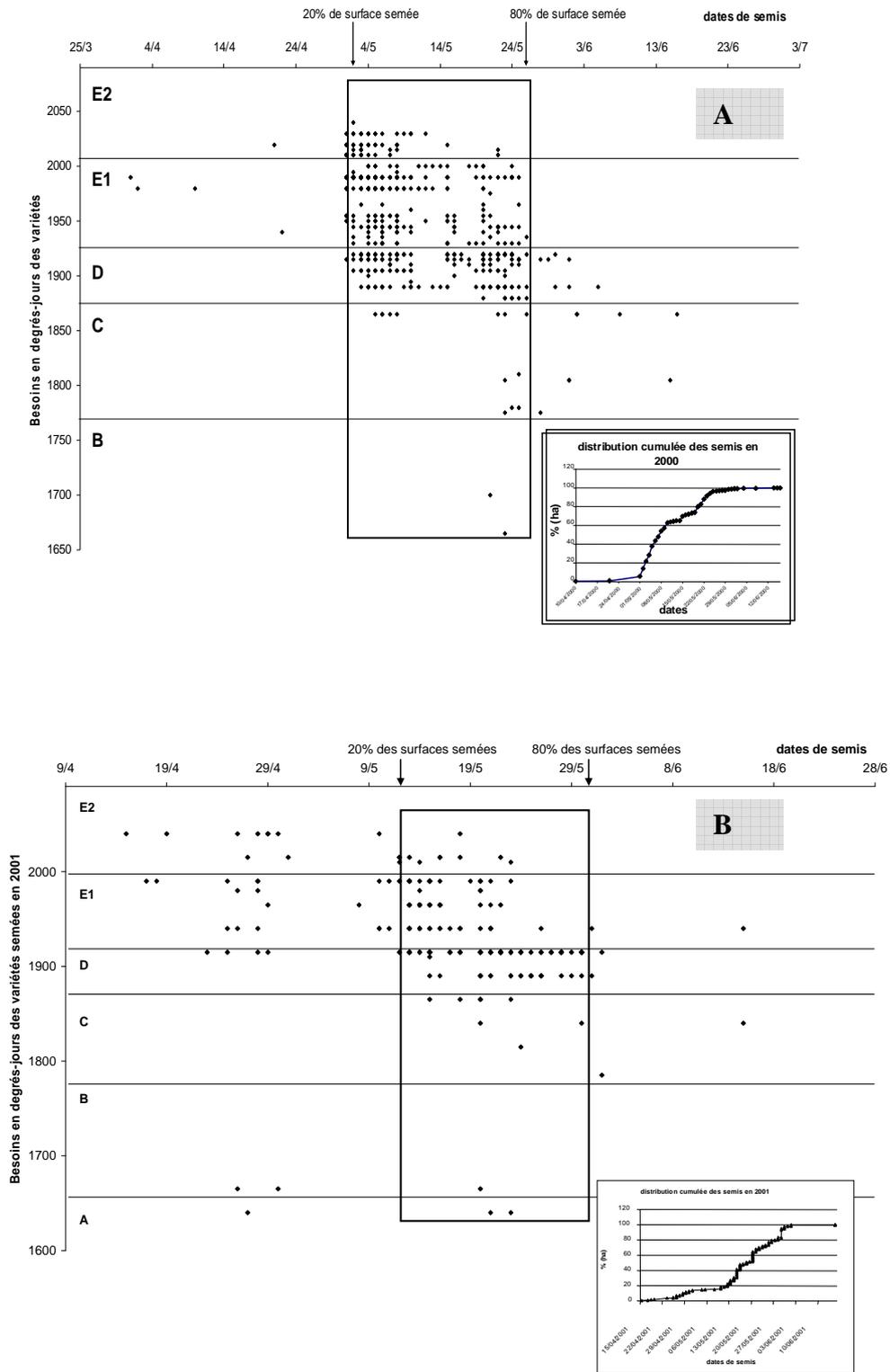
L'hiver 2000 a été moins pluvieux que celui de 2001 (respectivement 65 mm et 140 mm du 1er janvier au 15 mars). Les deux années sont caractérisées par des printemps pluvieux, ayant favorisé des semis tardifs (Arvalis-Institut du végétal, 2001; Arvalis-Institut du végétal, 2002). Cependant, de début avril à fin mai, période habituelle des semis, le régime de pluie a été différent entre 2000 et 2001 (Figure 24): en 2000, on ne distingue pas de décade où la pluviométrie est inférieure à 10 mm alors qu'en 2001, les 2èmes décades d'avril, 1<sup>ère</sup> de mai et 3<sup>ème</sup> de mai se caractérisent par une pluviométrie inférieure à 10 mm.



**Figure 24: Pluviométrie décadaire en 2000 et 2001 de la 3ème décade de mars à la 2ème décade de juin.**

### V.2.4.2 Les précocités semées et les dates de semis dans la zone de la Baïse en 2000 et 2001

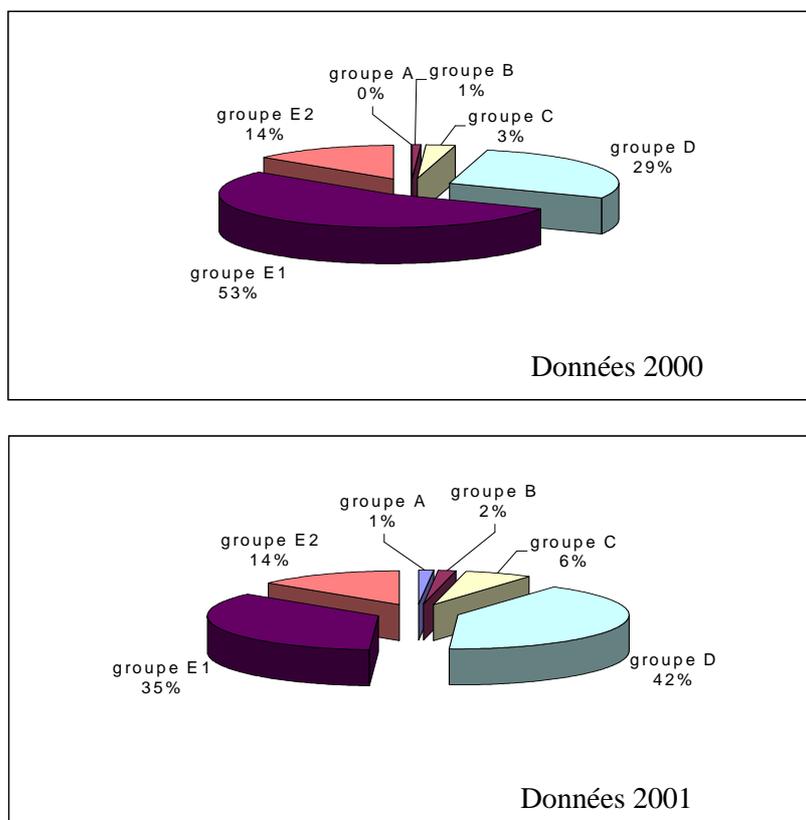
Les dates de semis s'étalent du 1<sup>er</sup> avril au 16 juin en 2000 et du 15 avril au 15 juin en 2001. Les dates d'atteinte des 50% de surface semée dans la zone sont, en 2000, le 6 mai et en 2001, le 20 mai. Vingt pourcent des surfaces sont semées le 2 mai en 2000 et le 12 mai en 2001. Quatre-vingt pourcent des surfaces sont semées le 26 mai en 2000 et le 1er juin en 2001 (Figure 25).



**Figure 25: Besoins en sommes de température des variétés semées en fonction des dates de semis a : échantillon 2000 b : échantillon 2001. Les dates où 20 et 80% des surfaces sont semées sont données par la distribution cumulée des semis, présentée pour chaque année dans les encadrés**

La majorité des surfaces sont semées avec des précocités des groupes E2, E1 et D. Cela représente 97% de la surface semée en maïs en 2000 et 91% en 2001 (Figure 26). La

proportion de certaines variétés varie cependant de manière non négligeable d'une année à l'autre: entre 2000 et 2001, l'observation globale de l'assolement montre un transfert de plus de 10% des surfaces en E1 vers des surfaces en D. Par contre, les surfaces semées avec des variétés E2 ne varient pas.



**Figure 26 : Part des différentes précocités en 2000 et 2001 (données enquêtes postales)**

On retrouve donc la tendance consistant à semer des variétés de moins en moins tardives au fur et à mesure que la période de semis avance mais l'échelonnement des fins de semis est faible. Par exemple, en 2000, les variétés E2 sont semées jusqu'au 22 mai, les E1 jusqu'au 26 mai, les D jusqu'au 5 juin et les C jusqu'au 15 juin (Figure 25).

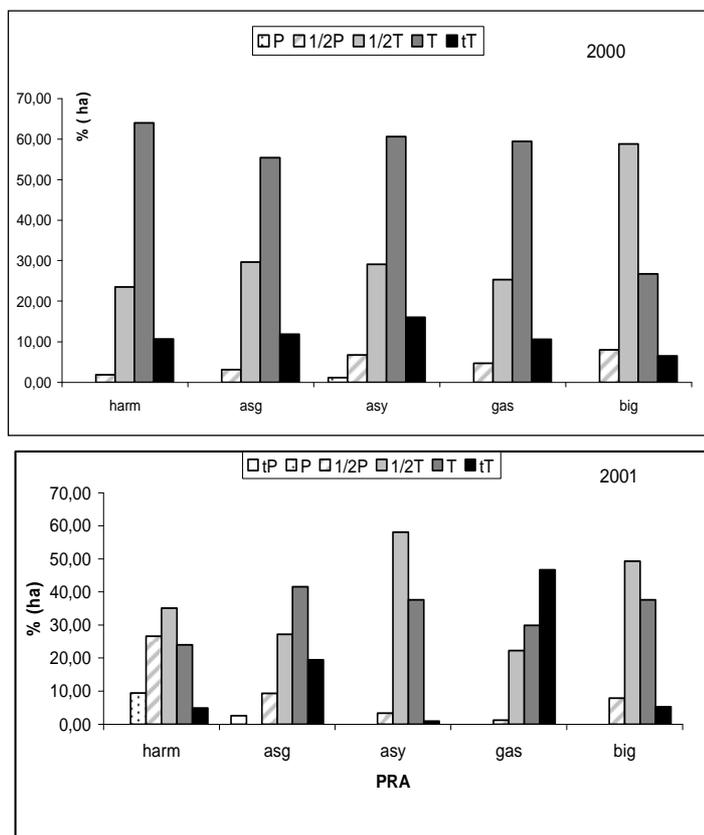
Ainsi, pendant la période où la majorité des semis est réalisée (matérialisée par un cadre sur les Figure 25 a) et b)) on observe que différents types de précocité se superposent. On observe alors une grande diversité de couples {date, précocité}.

#### V.2.4.3 Choix de précocité et de semis dans chaque petite région agricole

Dans chaque PRA, (a) la précocité majoritaire en surface, (b) les dates où 20% de surface est semée dans chaque PRA, (c) la date d'atteinte des 50% de surface semée, (d) les dates où 20% des surfaces en brouillon et en terrefort sont semées, ainsi que (e) le nombre de groupes de précocité en moyenne au sein des exploitations dans chaque PRA. Les dates où 20% des surfaces est semée permettent de caractériser la période de démarrage des semis dans chaque PRA. Le calcul du pourcentage de surface semée pour chaque date permet de définir la dynamique des semis (f). Une représentation schématique des zonages obtenus par analyse de ces différents éléments est présentée sur la Figure 28.

(a) : en 2000, la distribution des différents groupes de précocité est semblable dans les 4 PRA HARM, ASG, ASY et GAS (les variétés E1 prédominent) tandis que dans BIG, les variétés D prédominent (Figure 27). En 2001, les distributions des groupes de précocité sont

plus variables d'une PRA à l'autre (Figure 27). Sur les deux années, c'est dans HARM et ASG que l'on trouve le plus d'agriculteurs ayant privilégié des variétés E2; dans ASY, la majorité a privilégié les variétés E1 et D; enfin, dans BIG et GAS, ce sont les variétés D qui ont été semées majoritairement. Il y a ensuite une part non négligeable d'agriculteurs semant des variétés D quelle que soient leur PRA et quelques agriculteurs privilégiant des variétés précoces au sein de leur sole, notamment dans HARM en 2001. Le zonage en fonction des précocités majoritaires dans chaque zone est donné Figure 28 a.



**Figure 27: Pourcentage (ha) de chaque groupe de précocité dans les 5 PRA classées du nord au sud (données 2000 et 2001)**

(b) : les dates où 20% des surfaces sont semées peuvent atteindre une différence entre PRA de 3 semaines en 2000 et 2 semaines en 2001 entre les PRA. HARM, ASG et BIG ont des démarrages de semis échelonnés dans le même ordre les deux années: HARM puis ASG puis BIG. Les agriculteurs dans GAS commencent à semer avant ceux de ASY les deux années mais leur positionnement par rapport aux trois autres PRA est variable d'une année à l'autre.

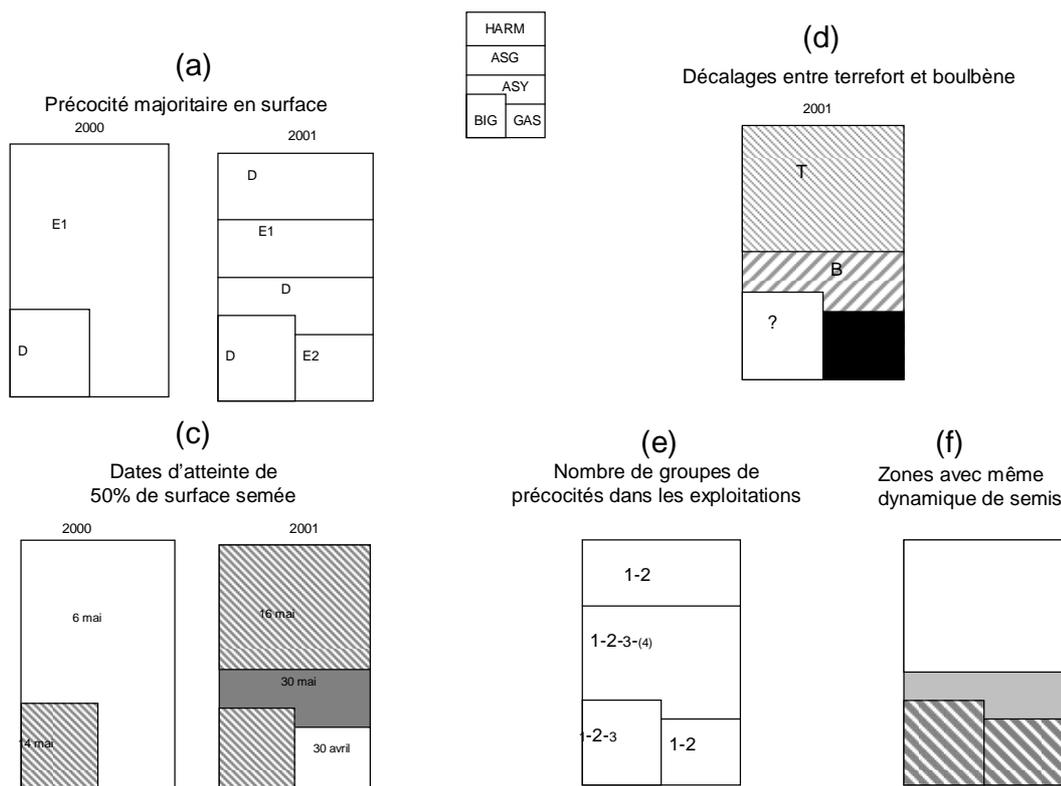
(c) : les dates d'atteinte des 50% de surface semée montrent que les semis ne sont pas réalisés à la même vitesse dans toutes les PRA et que cette dynamique présente une importante variabilité interannuelle. En 2000, les 4 PRA HARM, ASG, ASY et GAS atteignent ce stade à la même date (6 mai) et BIG l'atteint plus tard (le 14 mai). En 2001, GAS atteint ce stade en premier (le 30 avril), puis viennent HARM, ASG et BIG (le 16 mai) puis enfin ASG (le 30 mai) (Figure 28 c).

(d) : en 2000, il n'y a pas de décalage marqué entre le démarrage du semis des sols en brouillon et des sols en terrefort alors qu'en 2001, ce décalage est par contre bien prononcé (15 jours). Notons que le décalage ne suit pas le même ordre d'une PRA à l'autre : dans HARM et ASG, les semis démarrent sur des parcelles en terrefort (T) ; dans ASY, ils démarrent sur des parcelles en brouillon (B) (Figure 28 d).

(e) : dans HARM, 95% des agriculteurs sèment 1 ou 2 groupes de précocité en 2000 et 2001. Dans ASG et ASY, les proportions des agriculteurs semant respectivement 1, 2, 3 groupes de précocité sont assez bien équilibrés. C'est dans ces deux PRA que l'on trouve la majorité des agriculteurs ayant semé 3 et 4 groupes de précocité. Dans BIG, les deux années, les agriculteurs semant 2 groupes de précocité sont significativement plus nombreux (environ 60% les deux années) que ceux n'en semant qu'un ou plus de 2. Enfin, dans GAS, les agriculteurs ont semé un ou deux groupes de précocité les deux années (Figure 28 e). Etant donné que, d'après les distributeurs, le nombre de précocité semé relèverait d'un objectif d'« étalement des risques », on peut se demander si le nombre plus élevé de groupes de précocité semé par les agriculteurs dans ASG et ASY révèle de conditions climatiques de semis et de production plus « risquées » que dans les autres PRA.

(f) : l'analyse des pentes des dynamiques de semis (% de surface semée en fonction du temps) de chaque PRA permet de regrouper en 2000 (i) HARM et ASG et (ii) BIG et GAS tandis que ASY a une dynamique qui lui est propre (Figure 28 f). On peut supposer que les PRA regroupées sont soumises à la même pluviométrie et que les types de sol y sont présents dans des proportions comparables.

L'analyse par PRA permet de faire des zonages de « pratiques » moyennes à l'échelle des PRA. A cette échelle, on observe une certaine cohérence entre les données décrivant les pratiques de choix de précocité et celles décrivant le semis. Les zonages effectués en fonction du type de précocité majoritaire dans la PRA et de la date où 50% des surface sont semées dans chaque PRA peuvent être mis en correspondance (Figure 28 a et c) : en 2000, la zone où la précocité tardive a majoritairement été semé correspond à celle où 50% des surfaces ont été semées le 6 mai et celle où la variété demi tardive a été semée correspond à la zone où 50% des surface ont été semées le 14 mai. En 2001, la mise en correspondance des deux zonages est moins complète car même si 50% de surfaces ont été semés à la même date dans HARM et ASG, deux précocités différentes y sont majoritairement semées. Les zonages correspondent bien pour ASY et GAS. La cohérence se retrouve également dans l'évolution d'une année à l'autre. Dans ASY par exemple, où les semis ont commencé et se réalisent globalement plus tardivement en 2001 qu'en 2000, la précocité majoritaire est passée de tardive à demi tardive. Le zonage en fonction des décalages de vitesse de semi entre les deux types de sol en 2001 peut être mis en relation avec le zonage effectué en fonction des dynamiques de semis : les PRA où les terreforts sont semés avant les boubènes présentent les mêmes dynamiques de semis : ASY dans laquelle les boubènes sont semés en premier présente une dynamique qui lui est propre. Il n'est pas possible de conclure pour BIG et GAS. Enfin le zonage effectué en fonction du nombre moyen de précocité semé dans les exploitations dans chaque PRA ne peut être mis en relation avec un autre zonage. On ne peut donc conclure sur l'aspect déterminant de conditions climatiques « risquées ».



**Figure 28: Présentation des zonages obtenus par analyse (a) des précocités majoritaires (c) des dates où 50% de la surface est semée, (d) du décalage de vitesse de semis entre broubène et terrefort, (e) du nombre de précocité au sein des exploitations et (f) des dynamiques de semis**

#### V.2.4.4 Choix de précocité et de semis au sein de la sole de maïs des agriculteurs de la zone

##### V.2.4.4.1 Le nombre et le type des groupes de précocités semés au sein de la sole

Les maïsiculteurs du périmètre irrigué ont semé de 1 à 4 et de 1 à 3 précocités différentes dans leur exploitation (Tableau 9). Quarante-sept et 40% des agriculteurs n'ont semé qu'un groupe de précocité en 2000 et 2001. Dans ce cas, ce sont en majorité, des variétés E1 en 2000 et D en 2001. Certains maïsiculteurs ont cependant semé des variétés E2 et B. Parmi les agriculteurs ayant semé plusieurs groupes de précocité - plus de 50% des agriculteurs enquêtés- ceux en ayant semé 2 prédominent. Les associations de deux groupes de précocité sont variées mais l'association E1/D est la plus fréquente les deux années. Parmi ceux semant trois groupes de précocités, la moitié utilise l'association E2/E1/D tandis que l'autre moitié intègre au moins une variété de type précoce dans l'association.

La part des différents groupes de précocité dans la sole varie beaucoup d'un agriculteur à l'autre, indépendamment de la surface de la sole. Certains agriculteurs sèment chaque groupe de précocité sur une surface équivalente tandis que d'autres sèment un des groupes de précocité largement majoritairement sur leur sole.

La période de semis de l'agriculteur pourrait expliquer le type de précocité semé majoritairement dans la sole mais l'analyse conjointe du type de précocité majoritaire dans la

sole et de la date médiane du chantier de semis ne permet pas de mettre clairement en évidence un lien entre les deux.

En ce qui concerne l'influence de la surface de maïs et de la durée du chantier sur le nombre de groupes de précocité, les tendances dégagées à partir du discours des conseillers techniques sont confirmées par les moyennes : les moyennes des surfaces en maïs semées avec 1, 2 puis 3 précocités ainsi que les durées de chantier sont croissantes. Par contre, les écart-types montrent une importante variabilité (Tableau 10). Par exemple, 2 groupes de précocité ont été semés sur des surfaces de maïs de 6 à 178 ha en 2000 et de 11 à 98 ha en 2001. Soixante hectares semble être une valeur seuil au delà de laquelle les agriculteurs ont systématiquement semé plusieurs groupes de précocité.

**Tableau 9 : Nombre de groupes de précocité et types d'association de précocité semés par les agriculteurs. Le nombre et le pourcentage d'agriculteur sont donnés pour chaque association de groupes de précocité identifiée, en 2000 et 2001**

Nombre de groupes de précocité	Nombre d'agriculteurs		Groupes de précocité							
			E2	E1	D	C	B	A		
			« tardives »			« précoces »				
1	2000	73 (47%)	2 (3%)	42 (58%)	26 (35%)	3 (4%)	0			
	2001	27 (40%)	1 (4%)	8 (30%)	14 (52%)	2 (7%)	1 (4%)			
2	2000	59 (37%)	7 (12%)							
						39 (66%)				
						1 (1.7%)				
			7 (12%)							
					1 (2%)					
					2 (3%)					
					1 (2%)					
	2001	30 (45%)	5 (18%)							
						12(40%)				
						2 (7%)				
			4 (14%)							
					3 (11%)					
						1 (4%)				
					2 (7%)					
			1 (4%)							
3	2000	21 (13%)	13 (62%)							
			1 (5%)							
	2001	10 (15%)	7 (33%)							
			5 (50%)							
			1(10 %)							
			1(10 %)							
					1(10%)					
		1(10 %)								
		1(10%)								
4	2000	4 (2%)	3 (75%)							
	2001	0				1 (25%)				

**Tableau 10: Surface de maïs grain et durée de chantier de semis selon le nombre de groupe de précocité semé.**

	Surface de maïs grain (ha) (moyenne et écart-type)		Durée du chantier de semis (nombre de jours) (moyenne et écart-type)	
	2000	2001	2000	2001
1 groupe de précocité	17 (+/- 13)	20 (+/- 13)	3 (+/- 5)	5 (+/-7)
2 groupes de précocité	29 (+/- 26)	28 (+/- 26)	13 (+/- 9)	15 (+/-9)
3 groupes de précocité	45 (+/- 43)	26 (+/-43)	18 (+/-8)	25 (+/-10)
4 groupes de précocité	34 (+/- 18)	-	21 (+/-8)	-

Concernant la durée du chantier, une, deux et trois semaines sont les durées moyennes des chantiers pour les agriculteurs semant respectivement un, deux et trois groupes de précocités dans leur sole maïs, de même que pour la surface en maïs, les écart-types révèlent une importante variabilité. Par exemple, en 2000, parmi les 76 agriculteurs semant 2 groupes de précocités, 45% sèment en moins de 8 jours et 45% sèment en plus de 15 jours.

La présence de deux types de sol dans la sole de maïs pourrait être un facteur influençant le choix du nombre de précocité: parmi les agriculteurs ayant déclaré les deux types de sol, 82% sèment plusieurs groupes de précocité alors que parmi ceux ayant déclaré un seul type de sol, 57% en sèment plusieurs. Une tendance se dégage mais elle devrait être vérifiée.

#### V.2.4.4.2 L'ordre de semis des groupes de précocités

On distingue trois groupes d'agriculteurs :

- Des agriculteurs (76% et 48% respectivement en 2000 et 2001) semant plusieurs groupes de précocité de la variété la plus tardive à la moins tardive pendant plusieurs jours.
- Des agriculteurs (6% les deux années) commençant par semer les variétés les plus précoces; dans ce cas là, les variétés sont D, C ou B. Notons que parmi les agriculteurs semant des variétés de type précoces (C, B, A) dans leur sole, tous n'ont pas cette stratégie: 50% les sèment en fin de chantier bien après les autres variétés et 40% les sèment au milieu du chantier de semis.
- Des agriculteur (18 et 46% en 2000 et 2001) n'ayant pas d'ordre de semis apparemment défini. Dans ce dernier cas, ce sont essentiellement des agriculteurs semant trois groupes de précocité différents.

La proportion d'agriculteurs des groupes 1 et 3 varie d'une année à l'autre. On peut supposer que le groupe 1, correspondant à la pratique décrite et conseillée par les distributeurs, traduit une stratégie ne pouvant être systématiquement suivie. Etant donné l'augmentation de la proportion du groupe 3 en 2001, le passage d'un semis ordonné à un semis sans ordre apparent pourrait être causé par de mauvaises conditions de semis. Le groupe 2 peut également traduire une stratégie, d'autant plus que ces agriculteurs présentent des caractéristiques communes : excepté un agriculteur dont la surface en maïs atteint 30 ha, tous ont une dizaine d'hectares de maïs et la majorité sont éleveurs.

Le type de sol (nécessitant une reprise ou non au printemps) n'est pas apparu déterminant de l'ordre de semis des groupes de précocité dans la sole. De plus, les agriculteurs ne commencent pas systématiquement à semer sur leurs sols terrefort.

#### V.2.4.4.3 *Le nombre de jours de semis*

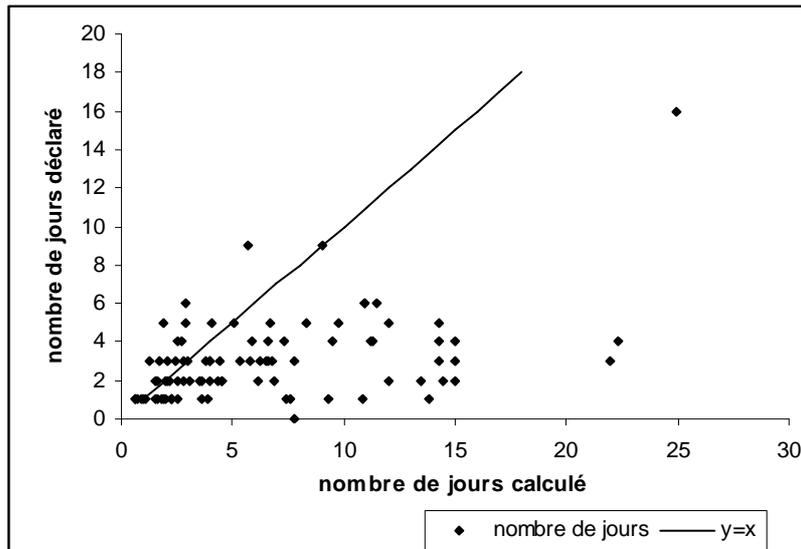
Le nombre de jours de semis varie entre 1 et 16 jours en 2000 et 1 et 13 jours en 2001, avec une large majorité d'agriculteurs ayant semé en moins de 7 jours les deux années. Pour la plupart des agriculteurs, la durée du chantier est bien supérieure au nombre de jours de semis; il y a en effet eu des arrêts en cas de pluie ou en raison de contraintes propres à l'exploitation.

Le nombre de jours de semis de chaque agriculteur a été calculé à partir des surfaces de maïs déclarées par les agriculteurs et des données moyennes d'expertise utilisées pour SIMSEM, c'est-à-dire: le nombre d'hectares semés en moyenne par heure selon le type de sol (3h/ha pour les boulbènes, 1.5 ha/ha pour les terrefort), le nombre d'heures de travail maximum par jour (12h/j), et le nombre d'heures concurrentes du chantier de semis en cas de présence d'un atelier de vaches laitières (4.5h/j pour 30 vaches). La main d'œuvre disponible pour le semis a été fixée à 1 pour les agriculteurs dont la donnée manquait.

Globalement, la corrélation entre données estimées et données observées est faible ( $R^2=0.20$ ). Le nombre de jours de semis calculé est supérieur à celui déclaré (Figure 29). La majorité des agriculteurs ont déclaré un nombre de jours de semis inférieur à 7 jours alors que le nombre de jours calculé peut atteindre 15 à 25 jours dans le cas de grandes surfaces.

Pour expliquer cet écart, plusieurs hypothèses peuvent être avancées :

- La simplification des règles concernant le nombre d'heures de semis par jour par manque d'informations sur la main d'œuvre et un nombre d'heures de travail maximum par jour fixe de 12h impliquerait une sous-estimation du nombre d'hectares pouvant être semés par jour.
- Comme d'une part, les agriculteurs ont déclaré les dates de semis effectives et non celles de préparation du sol, et que d'autre part, le nombre d'heure par hectare utilisé dans SIMSEM comprend le temps de préparation du sol, le nombre de jours estimé surestimerait le nombre de jours de semis effectif.
- Les agriculteurs auraient déclaré moins de dates de semis que leur nombre de dates de semis réelles
- Les types de sol déclarés par les agriculteurs et les types de sol issus de l'expertise ne correspondraient pas toujours.



**Figure 29 : Comparaison du nombre de jours estimé à partir des données de SIMSEM et du nombre de jours observé ( déclaré par les agriculteurs dans l'enquête postale 2000)**

Concernant la première hypothèse, des éléments de réponse la confirmant peuvent être apportés. En effet, le nombre de jours de semis déclarés par les agriculteurs est très peu corrélé à la surface à semer : pour des surfaces de maïs croissantes, le nombre de jours de semis maximum augmente mais le nombre de jours de semis minimum reste égal à 1 jour jusqu'à 56 ha en 2000 et 35 ha en 2001. De plus, les agriculteurs ayant semé de grandes surfaces de maïs (supérieures à 60 ha) n'ont pas utilisé significativement plus de jours de semis que les autres. Cette variabilité peut être due à des interruptions dues à la pluie et/ou à une réelle diversité des moyens techniques et humains pour semer au sein de la population d'agriculteurs du périmètre irrigué.

#### **V.2.4.5 Analyse des données des agriculteurs ayant répondu en 2000 et 2001**

Afin d'identifier les logiques d'adaptation des agriculteurs d'une année à l'autre, la variabilité interannuelle des choix de précocité et de semis des agriculteurs ayant répondu les deux années a été réalisée.

##### *V.2.4.5.1 Le nombre de groupes de précocité*

Pour 60% des agriculteurs, le nombre de groupes de précocité, les surfaces en maïs et la durée du chantier n'ont pas varié entre 2000 et 2001 (Figure 30 et Figure 31). Pour eux, il n'y a pas de tendance particulière pour le démarrage des semis : certains ont commencé plus tôt en 2001 qu'en 2000, d'autres plus tard.

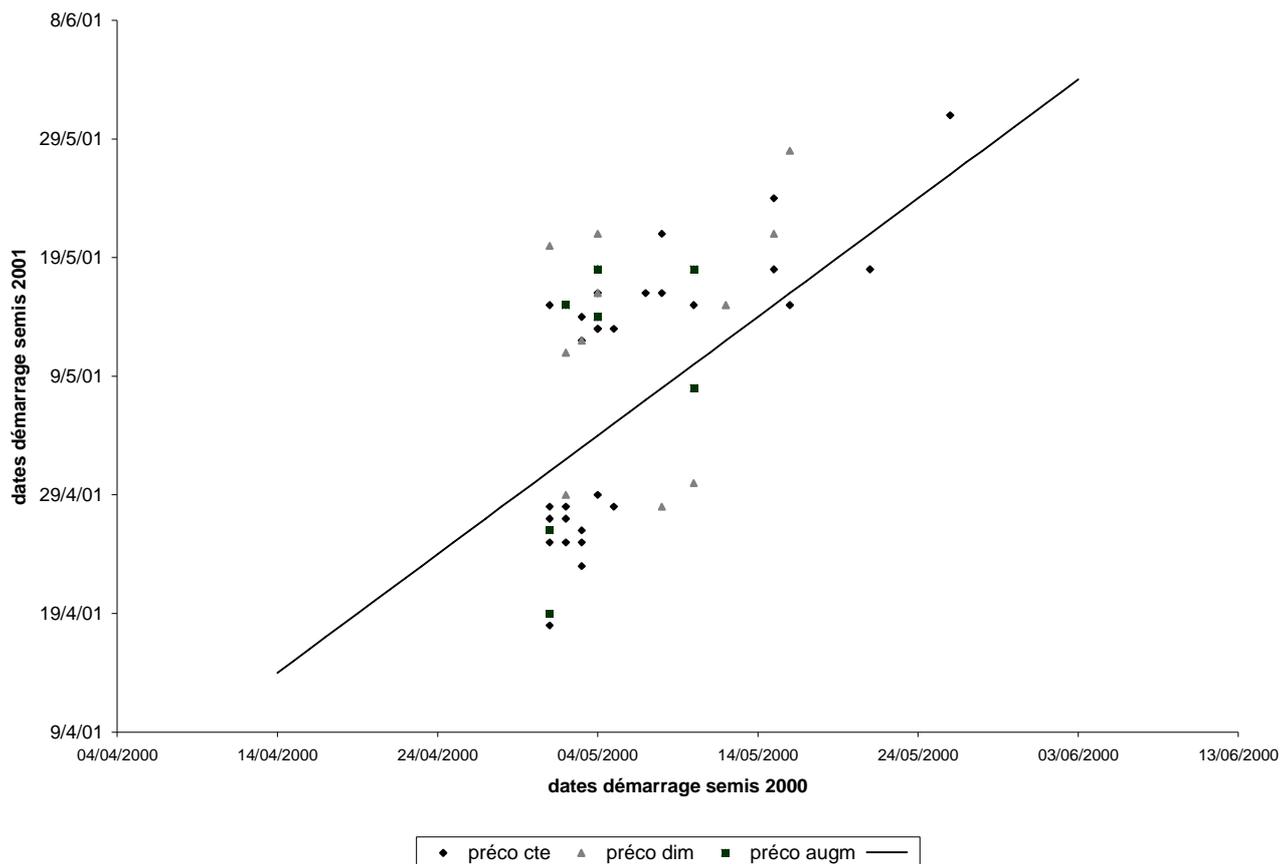


Figure 30: Comparaison des données des agriculteurs ayant répondu en 2000 et 2001 : les dates de démarrage des semis

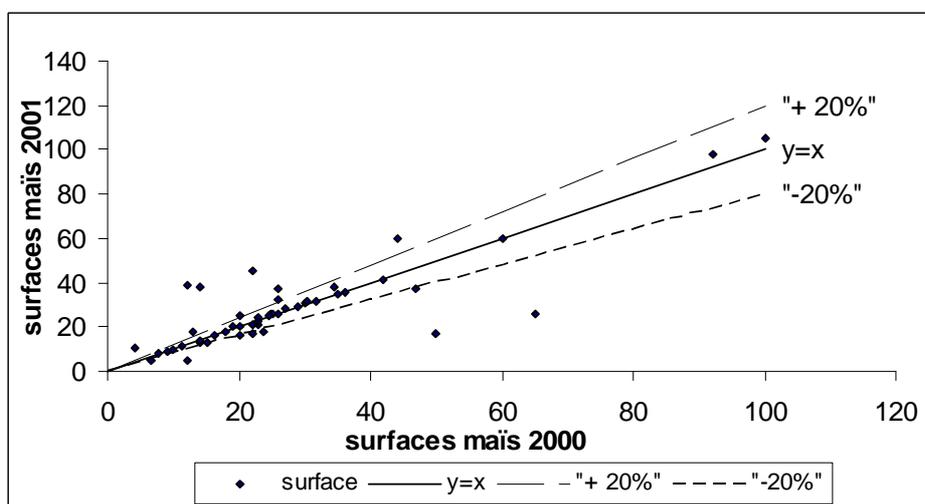


Figure 31: Comparaison des données des agriculteurs ayant répondu en 2000 et 2001 : les surface de maïs grain

Parmi les 40% ayant modifié leur nombre de précocité, 30% ont diminué ce nombre et 10% l'ont augmenté entre 2000 et 2001. Pour eux, la surface en maïs, la durée du chantier et/ou le nombre de jours de semis ont nettement variés entre les deux années. La majorité des agriculteurs ayant diminué leur nombre de groupes de précocité ont démarré les semis plus tard en 2001 qu'en 2000 alors qu'il n'y a pas de tendance particulière pour ceux ayant augmenté leur nombre de groupes de précocités. La variation de la surface à semer et un

retard des semis par rapport à l'année précédente, apparaissent donc comme éléments expliquant une diminution du nombre de groupes de précocité entre les deux années.

#### V.2.4.5.2 *Le type de précocité majoritaire*

Concernant le type de précocité majoritaire dans la sole, on peut distinguer trois groupes d'agriculteurs: ceux qui ont diminué l'indice de précocité en 2001 par rapport à 2000 (25%), ceux qui l'ont gardé identique (60%) et ceux qui l'ont augmenté (15%). La mise en relation des changements d'indice de précocité et des décalages de démarrage de semis entre les deux années pour chaque agriculteur montre qu'il est difficile d'identifier une « règle » (Figure 30). Par exemple, parmi les 12 agriculteurs ayant diminué l'indice de précocité, 9 agriculteurs ont semé plus tard en 2001 et 3 agriculteurs ont semé plus tôt. D'après nos données, le décalage de semis ne devient un facteur de changement de précocité systématique qu'à partir de 15 jours de différence d'une année à l'autre. Notons que les agriculteurs ayant diminué le nombre de précocité de 2 ou 3 à 1 groupe ont alors semé des variétés D.

#### V.2.4.5.3 *L'ordre de semis des groupes de précocité*

Vingt-sept pourcent des agriculteurs ont soit semé à une seule date, soit utilisé une seule précocité les deux années. Parmi les autres agriculteurs, semant différents groupes de précocité de manière échelonnée, 66% ont changé d'ordre de semis des groupes de précocité. Deux facteurs sont apparus comme potentiellement explicatifs : le type d'exploitation et la localisation. Ce groupe est en effet composé principalement d'agriculteurs du type « polyculture-élevage » et se trouve majoritairement dans la PRA ASY. Notons que ASY a été caractérisée par la présence prépondérante de boubènes et des semis significativement retardés en 2001.

### V.2.5 Discussion Conclusion

L'objectif de cet article était d'identifier la diversité des pratiques de choix de précocité et de semis des maïsiculteurs d'un vaste périmètre irrigué à partir de données d'enquêtes postales, de données d'experts locaux sur les choix de précocité et de données d'expertise utilisées dans un modèle d'estimation des dates de semis des cultures d'été.

#### V.2.5.1 **La diversité de pratiques identifiée**

A l'échelle du territoire étudié, l'étalement des dates de semis est important. Les variétés des groupes tardifs prédominent mais leurs proportions au sein du territoire varient entre les deux années étudiées. On observe une importante diversité des combinaisons date de semis/précocité.

A l'échelle de la PRA, la diversité des combinaisons date de semis/précocité subsiste mais des liens sont apparus entre le type de précocité majoritaire dans la PRA et la date médiane des semis dans la PRA. Les zonages réalisés en fonction des pratiques peuvent être reliés à la variabilité spatiale du climat évoqué par les distributeurs. L'influence du climat est visible à cette échelle : en 2000, le zonage permet de supposer que le périmètre irrigué présente une certaine homogénéité de pratiques. En 2001, le zonage permet de supposer le contraire. La distribution des pluies par décade les deux années (Figure 24) permet de supposer qu'en 2000, les semis n'ont pu commencer que très tardivement dans le périmètre alors qu'en 2001, grâce la présence de décades moins pluvieuses en avril, les semis ont pu commencer plus tôt. Cela traduirait le fait que quand les semis sont très tardifs, les agriculteurs ont moins de choix sur

leurs dates de semis et leurs précocités alors qu'en cas contraire, des pratiques plus diversifiées sont réalisées.

A l'échelle de la sole, la comparaison des données d'enquêtes et des tendances identifiées à partir des entretiens auprès des distributeurs permet de conclure à une diversité non négligeable des pratiques. On peut en effet distinguer plusieurs modes de conduite du nombre de précocité semé et du chantier de semis (les pourcentages respectifs du nombre d'agriculteurs et de la surface que représente chaque mode de conduite sont donnés pour l'année 2000) :

- i. semis de plusieurs précocités pendant un chantier étalé (40 et 60%)
- ii. semis de plusieurs précocités pendant un chantier court (26 et 19%)
- iii. semis d'une seule précocité pendant un chantier court (28 et 18%)
- iv. semis d'une précocité pendant un chantier long (5 et 2%).

### **V.2.5.2 Retour sur la méthode**

La méthodologie basée sur la comparaison des données issues de recommandations et d'expertise et des données factuelles recueillies par enquête postale nous a permis d'identifier une diversité des pratiques au sein d'une grande zone géographique et d'en donner une structuration : les dynamiques de semis et le type de précocité majoritaire à l'échelle des PRA seraient influencés par la variabilité spatiale du climat ; le nombre de groupes de précocité, leur distribution au sein de la sole et le nombre de jours de semis dépendraient plus directement des contraintes d'exploitation. Elle permet d'analyser les liens entre les pratiques de semis et les choix de précocité.

Les pratiques décrites par les experts locaux sont apparues comme des pratiques moyennes ou majoritaires ou au contraire, des pratiques nettement marginales mais bien identifiées car correspondant à une stratégie particulière (cas du semis de variétés précoces en début de chantier de semis afin de fournir le marché de soudure). La confrontation des différentes sources de données a permis de identifier des variables permettant de caractériser la diversité des pratiques; cette caractérisation doit maintenant être validée à l'aide de nouvelles enquêtes et d'une méthode déductive.

Cette méthodologie présente des limites pour l'analyse de la variabilité interannuelle des pratiques et des déterminants des pratiques. Nous pouvons difficilement évaluer ce qui relève, dans les combinaisons de pratiques identifiées, des choix stratégiques et des décisions tactiques :

- Pour les dates de semis, les données d'expertise utilisées dans le modèle SIMSEM donnent des indications sur les déterminants mais la comparaison pour chaque agriculteur du nombre de jours estimé à partir de ces données et du nombre de jours déclaré permet de supposer l'existence d'une diversité plus importante de main d'oeuvre disponible pour le semis et/ou de temps de travail par jour entre exploitations ou que ces données ne suffisent pas à expliquer les pratiques.

Pour les choix de précocité, ceux issus des recommandations des O.A.S sont expliqués par la taille de la sole, la durée du chantier de semis et les contraintes d'organisation du chantier de récolte. Or l'analyse des données des enquêtes postales montre que la surface de la sole et la durée du chantier ne suffisent pas à expliquer ce choix. A partir de nos données, il est difficile de conclure quant à l'aspect déterminant du type d'exploitation et des types de sol. Seule une hypothèse sur l'impact de la présence ou l'absence de deux types de sols dans la sole sur le nombre de précocité a pu être émise. Etant donné l'existence de différents types de

boulbènes en fonction de leur localisation topographique et de la proximité de certains brouillards de coteaux et de terreforts (Penalver et Longueval, 1999), la simple dénomination « brouillène /terrefort » peut parfois prêter à confusion. Ainsi, pour étudier l'impact des types de sol, une caractérisation topographique serait nécessaire. Concernant la distribution des précocités dans le temps, nous avons pu distinguer trois modes de conduite parmi les agriculteurs semant plusieurs précocités, dont deux apparaissent comme liées à des choix stratégiques : le semis des variétés les plus tardives au moins tardives et le semis de variétés précoces en début de période de semis. La première pratique est largement majoritaire; elle correspond aux préconisations des distributeurs, c'est-à-dire, la recherche d'une adéquation entre le potentiel de température local et le besoin en degrés-jours des variétés semées. Celle consistant à semer tôt des variétés précoces pourrait correspondre à un objectif de production et de vente particulier évoqué par les experts locaux : l'alimentation du marché de soudure. L'effet de l'organisation de la récolte n'a pas pu être analysé. Seules des connaissances écophysiologiques permettent de faire des hypothèses : comme selon les modes de conduites du nombre de groupes de précocité et du chantier de semis l'atteinte de la maturité du grain peut être regroupée autour d'une même date (modes i et iii) ou étalée (modes ii et iv), ces modes de conduites correspondent peut être à des objectifs d'étalement ou de regroupement de la récolte. Le fait de ne pas avoir accès aux justifications que donneraient les agriculteurs eux-mêmes de leurs décisions techniques empêche de conclure. L'influence des distributeurs n'a pas pu être analysée sur les données 2000 et 2001. On constate cependant qu'ils offrent tous des gammes de précocité comparables dans la zone. La seule différence identifiée concerne les marges de manœuvre en cas de semis trop retardés : les coopératives paraissent plus contraintes que les négoce dans leur gestion des changements de précocité.

### **V.2.5.3 Perspectives par rapport à la demande en eau**

Au sein du périmètre irrigué, il existe une diversité de pratiques qui serait due à la variabilité spatiale du climat et à des contraintes d'exploitation variées.

Dans la perspective d'une réflexion sur l'évolution de la demande en eau, on peut se demander si les pratiques impliquent des niveaux de consommation en eau différents et si elles sont très contraintes. Les pratiques de choix de précocité varient essentiellement par rapport au nombre de groupes de précocité semé et à leur répartition dans la sole. Selon les connaissances physiologiques, la présence de différents groupes de précocité dans la sole semés pendant un chantier étalé ou d'un seul groupe de précocité semé au cours d'un chantier étalé impliqueraient des besoins en eau différents. On peut alors se demander si les combinaisons de pratiques impliquent des conduites différenciées de l'irrigation et ainsi des demandes en eau d'irrigation différentes? Par exemple les agriculteurs tiennent-ils compte systématiquement de l'hétérogénéité des stades du maïs dans leur sole au moment du déclenchement de l'irrigation ou de son arrêt ?

L'analyse menée sur des données pour les années 2000 et 2001 permet de supposer que les démarrages de semis et les types de précocité semés sont contraints par le climat. Le nombre de groupes de précocité et leur répartition dans le temps sont-ils très dépendants de contraintes d'exploitation? Ou au contraire les marges de manœuvre sont-elles suffisamment grandes pour envisager des changements de pratiques ou une augmentation de certaines pratiques moins demandeuses en eau d'irrigation ?

Dans la perspective d'une analyse prospective de l'impact des pratiques culturales des irrigants, l'identification des déterminants des combinaisons de pratiques devient essentielle.

### **V.3 Chapitre 3 : Estimer la distribution spatiale des pratiques de semis et de choix de précocité des maïsiculteurs au sein d'un vaste périmètre irrigué**

#### **V.3.1 Introduction**

Une bonne gestion de l'eau à l'échelle d'une région requiert une estimation correcte des prélèvements par les différents usages et en particulier par l'agriculture car l'usage agricole prédomine dans les zones fortement irriguées (Mission Eau, 2004).

La demande en eau dépend du climat et des choix des agriculteurs (Tiercelin, 1998). Sa distribution spatio-temporelle au sein d'une région irriguée dépend de la distribution spatiale des dates et modalités des interventions techniques réalisées sur les cultures irriguées par les agriculteurs au cours de la campagne culturale. Parmi les nombreuses interventions techniques réalisées par un agriculteur, la pratique d'irrigation a un impact évident sur la demande en eau : des dates d'irrigation et des doses d'eau apportées dépend la dynamique de consommation en eau au cours de la campagne et son montant total. Les dates de semis, la densité de semis et la précocité des variétés semées sont également des données importantes à prendre en compte. En conditionnant le calage du cycle cultural dans le calendrier, les dates de semis font partie des déterminants du calage temporel des besoins en eau de la plante. La précocité des variétés conditionne également le calage temporel des besoins en eau ainsi que les besoins en eau proprement dits. La densité de semis détermine les besoins en eau au niveau parcellaire. Enfin, ces trois éléments (dates de semis, précocité, densité) peuvent influencer la conduite de l'irrigation.

Une étude préliminaire menée dans le périmètre d'étude a montré qu'il existe une importante diversité de combinaisons {date de semis, précocité, surface} une année donnée au sein du territoire (Maton et al., 2005b) et que cela serait dû à des pratiques de semis et de choix de précocité diverses présentant une certaine distribution spatiale. Nous faisons l'hypothèse que la connaissance de ces pratiques et de leur distribution spatiale permettrait d'estimer les quadruplets.

A l'échelle régionale, il n'est pas possible d'avoir accès à des informations exhaustives sur la gestion technique au sein des exploitations chez l'ensemble des agriculteurs car leur nombre rend difficile la démarche d'enquête par entretien ou suivi (Biarnès et al., 2004). Les données par ailleurs accessibles (recensement général agricole, statistiques départementales annuelles, enquêtes Ter-Uti, enquêtes pratiques culturales (Agreste-SCEES)) comportent peu d'informations sur les interventions techniques proprement dites (Mignolet et al., 2004). Seules les enquêtes « pratiques culturales » permettent d'acquérir tous les 5 ans des données concernant les itinéraires techniques sur des parcelles données. Elles ne permettent cependant pas de décrire un chantier mené sur l'ensemble des parcelles constituant la sole d'une culture donnée et elles concernent seulement un échantillon de parcelles.

Les travaux portant sur la détermination de la distribution spatiale des pratiques culturales à l'échelle régionale sont peu nombreux dans la littérature. Certains sont basés sur des données permettant directement une description des cultures et des itinéraires techniques associés ainsi que de leur localisation sur l'ensemble du territoire concerné. Les travaux de Mignolet et al. (2004) sur le bassin versant de la Seine sont illustratifs : des données historiques sur les assolements et les rotations, couvrant la zone, ont été utilisées dans des modèles statistiques permettant de déterminer des probabilités d'apparition d'une culture dans une petite région agricole. Les itinéraires techniques associés à chaque culture ont été identifiés à partir d'avis d'experts. D'autres travaux développés sur des étendues moins grandes (bassins versants d'une centaine de km<sup>2</sup>) ont l'objectif de localiser finement les

pratiques culturales pour une culture donnée. Ils se basent sur des données d'enquête auprès d'un échantillon d'agriculteurs et cherchent à déterminer des indicateurs des pratiques culturales parmi les déterminants des pratiques afin de prédire leur distribution. Les travaux de Biarnès et al. (2004, 2005) sur les stratégies de désherbage en viticulture sont illustratifs du deuxième cas. Les indicateurs sont recherchés à différents niveaux d'organisation (parcelle, exploitation, bassin de coopérative, commune) parmi les déterminants des pratiques accessibles pour l'ensemble des parcelles du bassin versant.

Dans cet article, nous présentons des travaux sur la détermination de la distribution spatiale des pratiques culturales de semis et de choix de précocité afin d'en prédire les modalités (dates de semis, précocités, densités et surface). Nous nous intéressons à une combinaison d'une intervention technique (le semis) et d'un choix technique (choix de précocité).

Dans une première partie, la zone d'étude est présentée ainsi que les conclusions de l'étude sur laquelle s'appuie la description des pratiques et l'analyse de leur distribution spatiale. La démarche et les deux enquêtes sur lesquelles nous nous appuyons sont ensuite présentées. Dans la partie résultats, l'impact des déterminants relevant du contexte pédoclimatique et topographique est analysé. Ensuite, l'analyse des déterminants non climatiques est présentée. Deux démarches complémentaires « déductive » et « qualitative » menées dans ce but sont présentées. La discussion ouvre sur une méthode d'estimation des pratiques des agriculteurs à l'échelle régionale.

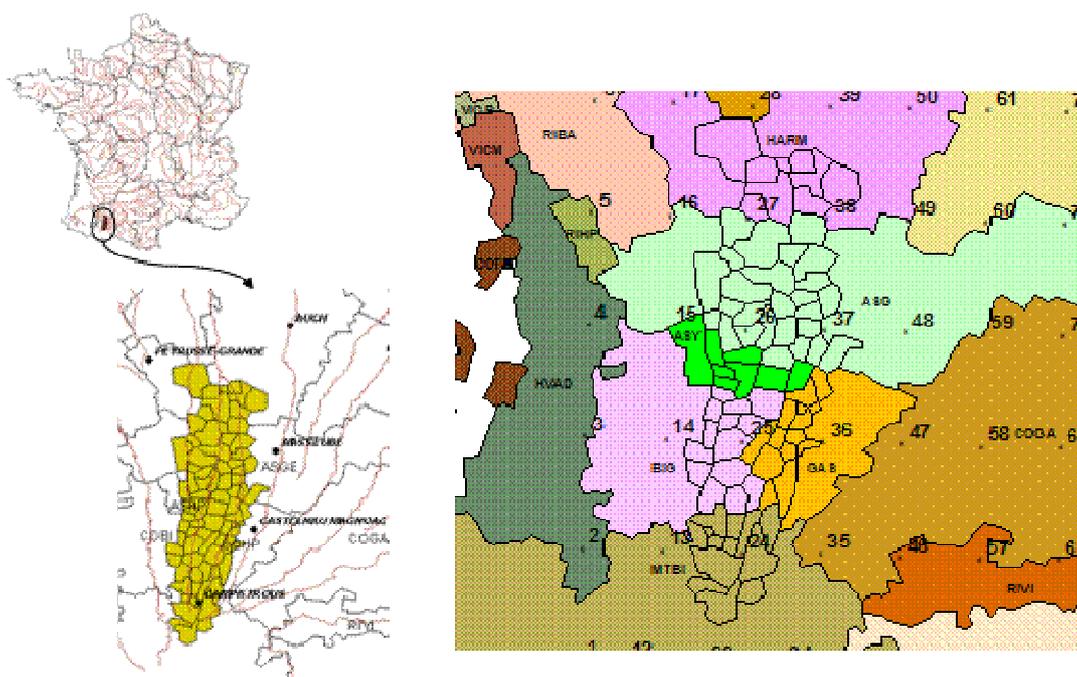
### V.3.2 Matériel et méthodes

#### V.3.2.1 **La zone d'étude**

##### V.3.2.1.1 *Présentation générale*

Le terrain d'application de cette recherche est un bassin versant de 500 km<sup>2</sup> en Midi-Pyrénées : le bassin versant de la Baïse Amont. Ce terrain a été choisi car c'est une unité de gestion pilote pour améliorer le modèle de gestion stratégique de la Compagnie d'Aménagement des Coteaux de Gascogne (CACG) (Leenhardt et al., 2004 a et b). Des données y sont disponibles ainsi qu'un modèle d'estimation de la demande en eau.

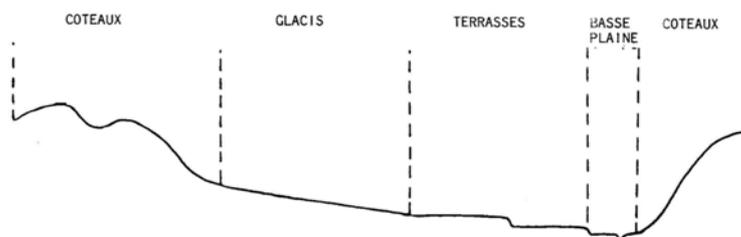
La zone est située au sein du système Neste, vaste réseau d'alimentation d'eau géré par la CACG. Elle s'étend sur deux départements : le Gers et les Hautes-Pyrénées et est recoupé par 5 Petites Régions Agricoles (PRA) (Figure 32) : Haut Armagnac (HARM), Astarac du Gers (ASG), Astarac des Hautes-Pyrénées (ASY), Coteaux de Bigorre (BIG), et Coteaux de Gascogne (GAS).



**Figure 32: Localisation de la zone d'étude en France et présentation du découpage communal, des petites régions agricoles (PRA) et du maillage en point de grille (avec les numéros des points de grille)**

Du nord au sud, on peut distinguer trois grands ensembles géomorphologiques: un ensemble au paysage vallonné de coteaux peu à moyennement accidentés, un ensemble de vastes zones planes ou de pentes faible en rive droite des rivières gasconnes (Figure 33a) et enfin un ensemble correspondant à la zone de piémont pyrénéen appelée le plateau de Lannemezan (Figure 33b). On distingue principalement deux types de sols: des sols à dominante argilo-calcaire nommés « Terreforts » que l'on trouve essentiellement dans la partie nord de la zone et des sols à dominante limoneuse et acide, plus ou moins hydromorphes selon la profondeur de la couche d'argile, nommés « Boulbènes » (Penalver et Longueval, 1999).

(a) au niveau de l'ensemble de vastes zones planes (Trie sur Baïse)



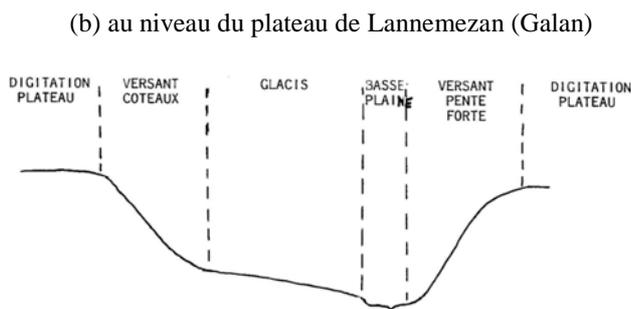


Figure 33: Coupes géomorphologiques schématisées (Penalver et Longueval, 1999)

#### V.3.2.1.2 Le climat

Le bassin versant est soumis à des conditions climatiques relativement instables d'influence océanique et méditerranéenne. Il subit une importante variabilité climatique interannuelle.

#### Les données climatiques

Les variables météorologiques utilisées sont la température de l'air minimale et maximale, la précipitation et l'évapotranspiration potentielle. Les données ont été obtenues par interpolation, sur une grille régulière de 12,5 km de côté, de données météorologiques journalières relevées à l'emplacement de stations météorologiques situées à l'intérieur et autour de la zone d'étude (méthode décrite par Donet (1999)). Sept points de grille (n° 24 à 28 et de 36 à 38) permettent ainsi de rendre compte de la variabilité spatiale du climat (Figure 32).

#### Caractérisation météorologique des années 2003 et 2004 et des périodes de semis

L'année 2003 a été une année aux conditions climatiques inscrites dans les records de sécheresse et de chaleur alors que 2004 ne présente pas de caractère exceptionnel (Arvalis-Institut du végétal, 2004c; Arvalis-Institut du végétal, 2005).

La pluviométrie totale en 2003 est moins importante (676 mm) que celle de l'année 2004 (755 mm) (Annexe 8). Sur la période des semis, qui dans la zone se situe entre fin mars et début juin, la pluviométrie mensuelle présente une grande variabilité interannuelle : la pluviométrie moyenne sur 39 ans à Auch varie de 54 à 83 mm, avec des maximums et des minimums pouvant atteindre 240 mm et 0 mm. En 2004, cette période est globalement plus pluvieuse qu'en 2003 (Figure 34) : le printemps 2004 est caractérisé par des pluies décadaires de l'ordre de 20 mm en mars et début avril puis de l'ordre de 60 mm la dernière décade d'avril et la première décade de mai ; le printemps 2003 est marqué par une première décade de mars pluvieuse de l'ordre de 30 mm puis une période sèche les décades qui suivent. Le nombre de jours sans pluie (pluviométrie inférieure à 2mm) entre mars et mai est de 77 en 2003 et de 69 en 2004. Les principales différences de pluviométrie entre les deux années s'observent pendant la période précédant habituellement les semis, en février et mars.

Par rapport à la température, les semis ont été possibles bien plus tôt en 2003 qu'en 2004. La température adéquate pour le semis du maïs peut être calculée à l'aide d'une moyenne mobile sur 7 jours ; quand celle-ci dépasse définitivement le seuil de 10°C, les semis sont possibles. Ceux-ci ont théoriquement été possibles à partir du 25 février en 2003 et du 30 mars en 2004.

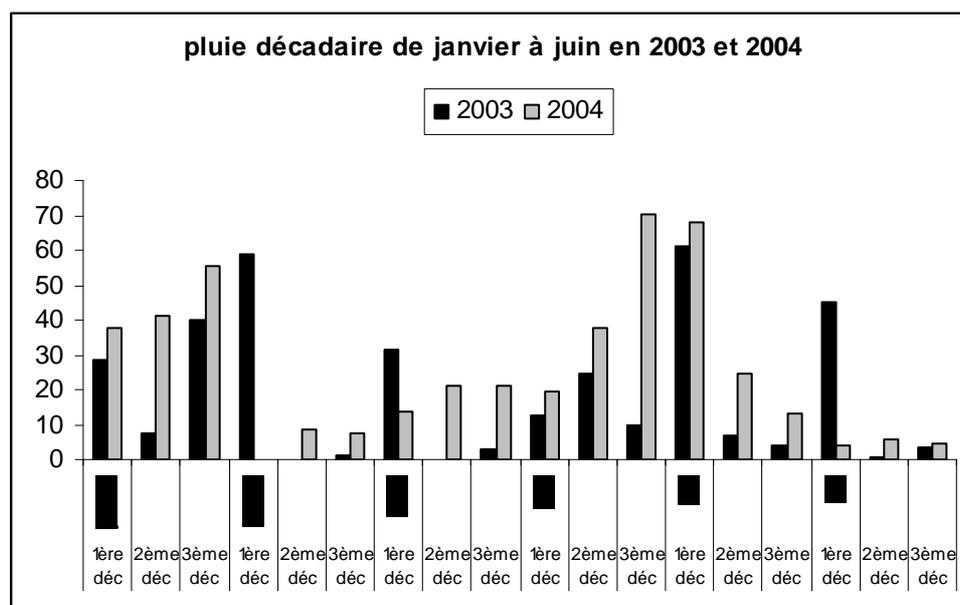


Figure 34: Pluie décadaire de janvier à juin en 2003 et 2004 dans la zone de la Baïse. ( Point de grille 26 : latitude : 43.75°, longitude : 0.25°)

### V.3.2.1.3 L'agriculture dans la zone

#### Données générales

L'activité principale de ce bassin est la production agricole. La surface agricole utile (SAU) de la zone représente environ 35 500 ha. L'irrigation est très développée et représente plus de 80% de la consommation en eau (Mission eau, 2004). D'après les données du recensement général agricole de 2000, 11500 ha ont été irrigués au moins une fois (soit 32% de la SAU). La zone est donc orientée vers la production irriguée de maïs grain : 80% des surfaces irriguées étaient occupées par du maïs grain en 2000 (Agreste, 2002). Les exploitations irrigantes, c'est-à-dire environ 530 exploitations (Agreste, 2002), sont principalement de 2 types : « polyculture élevage » et « grande culture ». Elles s'approvisionnent en eau d'irrigation en pompant dans les rivières du système Neste, à partir d'un réseau d'eau pressurisé, ou grâce à un lac collinaire. L'irrigation se fait principalement par aspersion. Les deux types de sols terrefort et boulbène sont présents en proportions très variables selon les exploitations agricoles dans la sole irriguée.

#### Les pratiques de semis et de choix de précocité des maïsiculteurs de la zone

Les pratiques de semis (période de démarrage du chantier, vitesse du semis) et de choix de précocité (nombre, type et répartition des groupes de précocité) sont très diverses (Maton et al., 2005b). Plusieurs hypothèses relatives aux déterminants de ces éléments ont été avancées par Maton et al.:

- L'existence d'un gradient climatique orienté Nord-Sud pourrait expliquer que les semis démarrent plus tôt au nord qu'au sud et que les variétés très tardives sont majoritairement semées au nord et les demi-tardives et demi-précoces au sud.

- Par contre, à l'échelle de l'exploitation, aucun facteur n'est apparu directement explicatif de cette diversité de pratiques bien que la surface de maïs grain, la main d'oeuvre et le temps de travail par jour soient a priori des déterminants des interventions relatives au semis (Leenhardt et Lemaire, 2002b; Debaeke et Aboudrare, 2004; Papy et Servettaz, 1986).

- Le type de sol n'est pas ressorti comme déterminant du type de précocité semé ou de la période de démarrage. Il est apparu par contre que la variabilité des sols au sein de la sole pouvait avoir un impact sur le nombre de groupes de précocité semé.

- L'influence des organismes d'approvisionnement et de collecte n'a pas pu être analysée sur les données d'enquêtes postales en 2000 et 2001 mais la confrontation des pratiques que les techniciens conseillent et des pratiques observées montre que ces conseils ne sont pas systématiquement suivis.

### **V.3.2.2 La démarche**

La démarche est en deux temps (Figure 35) : on s'intéresse d'abord aux variables environnementales (climat, sol, topographie) qui sont facilement spatialisables avec des cartes et/ou des méthodes d'interpolation de données (partie (a)). Pour analyser l'impact du climat, nous avons réalisé une analyse fréquentielle climatique et calculé les jours disponibles pour le semis en fonction de la température de l'air et de la teneur en eau du sol (le modèle est présenté chapitre 4 des résultats). Pour étudier le gradient climatique Nord Sud, nous avons utilisé des données météorologiques en point de grille sur un axe Nord-Sud traversant la zone sur les années disponibles (1998, 2000, 2003, 2004). Pour l'analyse de l'impact du type de sol ou de l'emplacement topographique des parcelles, l'analyse est basée sur la distribution des variables à expliquer en fonction des variables potentiellement explicatives.

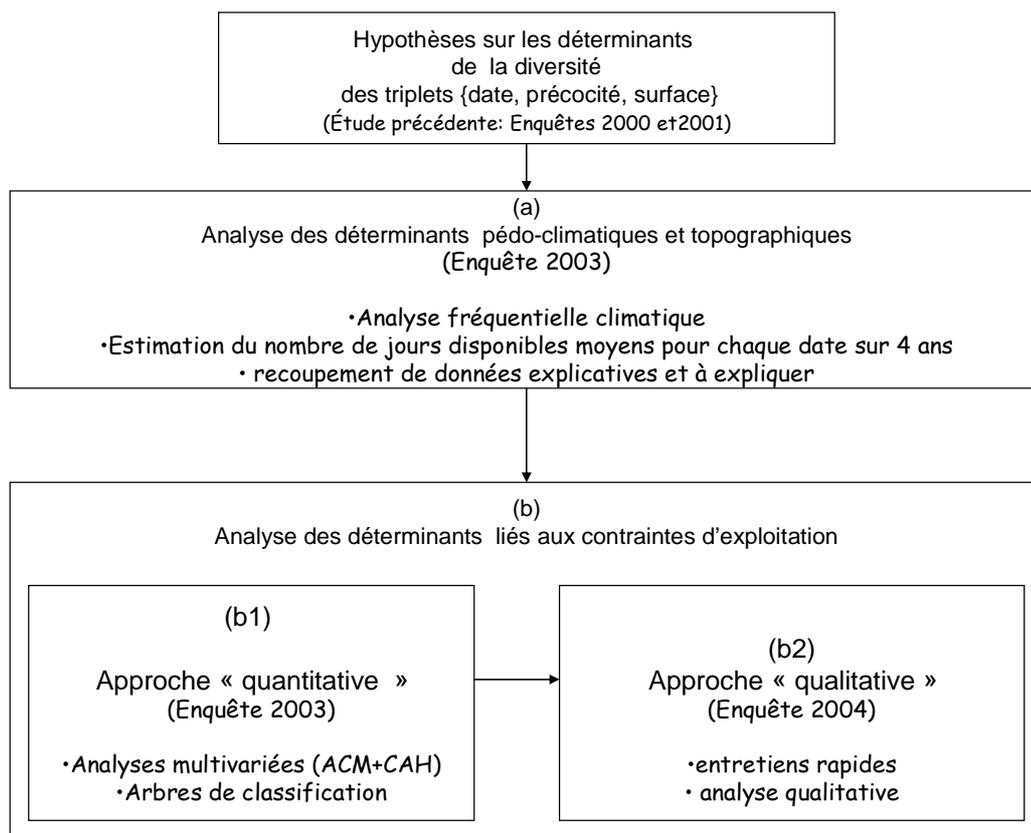
Puis, on cherche à savoir s'il existe d'autres déterminants et on les recherche parmi les informations décrivant les exploitations agricoles (partie (b)). Pour cela, deux approches ont été utilisées :

- La première est quantitative et repose sur l'exploitation de données (b1). On recherche des déterminants des pratiques appartenant à des bases de données exhaustives sur les exploitations agricoles.
- La seconde est qualitative et repose sur des entretiens auprès d'un groupe d'agriculteurs (b2) (Dounias, 1998).

On a choisi de partir de l'approche b1 et on a appliqué l'approche b2 en complément sur les descripteurs des pratiques de semis et de choix de précocité identifiés comme discriminants des pratiques dans la partie b1.

#### *V.3.2.2.1 Méthodes et données utilisées pour l'approche quantitative*

L'approche (b1), dite «quantitative », repose sur l'élaboration d'une typologie de stratégies de semis et de choix de précocité à partir de variables indépendante du contexte climatique d'une année donnée, puis la recherche d'indicateurs parmi des données accessibles à l'échelle régionale décrivant l'exploitation et son environnement.



**Figure 35 : Présentation des étapes de la démarche**

L La conduite de la sole d'une culture peut être décrite par un ensemble de règles de décision concernant la planification des opérations techniques et les modalités d'ajustement des prévisions en temps réel (Aubry et al., 1998b). Nous nous intéressons ici essentiellement aux règles de décisions relatives aux dates de semis au sein de la sole, à la précocité des variétés semées et aux densités de semis. L'ensemble de ces décisions forme ce que nous appelons la « stratégie de semis et de choix de précocité ». Une analyse de la diversité des conduites de culture formalisées sous forme de règles de décision au sein d'une zone géographique peut reposer sur des enquêtes approfondies du fonctionnement des exploitations agricoles et des suivis de quelques exploitations. C'est par exemple ce qui a été réalisé pour expliquer un étalement des dates de semis du coton dans deux villages d'une région du Cameroun (Dounias, 1998). Mais à l'échelle à laquelle nous souhaitons analyser la diversité des stratégies de semis et de choix de précocité, une telle approche est difficile. L'acquisition des informations factuelles concernant les modalités des pratiques (dates, doses...) est moins lourde à mettre en place que celles des informations concernant les déterminants d'une pratique (Landais et Deffontaines, 1990) tout en nécessitant tout de même une phase de recueil d'information importante (enquête postale dans notre cas).

Ainsi, dans ce travail, plutôt que de décrire les règles de décision, la stratégie de semis et de choix de précocité est directement décrite par des variables indépendantes du contexte climatique traduisant des modalités d'action : nombre de groupes de précocité semé, types de groupes de précocité, ordre de semis des différents groupes, densité modulée ou non ; et pour le semis : période de démarrage du semis, nombre de sessions de semis, débit de chantier de semis. Il est supposé que ces variables sont avant tout de nature stratégiques, c'est-à-dire qu'elles sont décidées par rapport aux contraintes et aux objectifs de l'exploitant agricole en climat moyen, puis éventuellement adaptées en fonction des conditions météorologiques de

l'année. Elles sont choisies après élimination de celles qui ont été identifiées comme dépendantes du climat dans la partie (a).

L'élaboration de la typologie et la recherche d'indicateurs sont basées sur l'analyse statistique multivariée de données d'enquêtes. Les typologies permettant de définir des stratégies sont construites à partir d'une analyse des correspondances multiples (ACM) qui permet de décrire ce qui structure la diversité au sein de l'échantillon de données, suivie d'une classification ascendante hiérarchique (CAH) afin de regrouper les individus ayant les caractéristiques les plus proches possibles au sein de classes. Il est possible de trouver une présentation détaillée de cette démarche dans Köbrich et al. (Köbrich et al., 2003). Les variables analysées sont présentées dans la partie « résultats ». Ensuite, la détermination de liens statistiques entre les types de stratégies et les données facilement accessibles à l'échelle régionale est basée sur l'utilisation de la méthode Classification et Regression Tree (CART) (Breiman et al., 1984). Cette méthode présente l'avantage de fournir des arbres de décision pouvant être utilisés comme un ensemble de règles prédictives quand l'arbre de classification est prédictif.

Les données proviennent d'une enquête postale envoyée en 2003 à l'ensemble des irrigants de la zone de la Baïse contractant avec la CACG. Pour faciliter la participation des agriculteurs au questionnaire, le questionnaire comporte une seule page, divisée en deux parties (annexe 1). La première partie concerne le système de production : productions végétales et animales, détails au sujet de la superficie irrigable, superficie irriguée réelle, superficie de maïs en 2003, main d'œuvre permanente et temporaire. L'organisme d'approvisionnement et de stockage et le code postal du siège de l'exploitation sont demandés. La deuxième partie recense des éléments factuels : dates et variétés semées dans la sole de maïs grain en 2003. Pour chaque date, le type de sol ("boulbène" ou "terrefort" ou mixte), la densité de semis, la superficie, la situation topographique du champ (vallée ou coteaux) sont demandés.

Le taux de retour est de 20% et 96 questionnaires ont pu être exploités. L'échantillon est représentatif des maïsiculteurs irrigants de la zone de la Baïse. La répartition du nombre de maïsiculteurs irrigants, de la SAU et des surfaces de maïs grain irrigué dans chaque PRA au sein de l'échantillon sont pratiquement identiques à celle de l'ensemble des exploitations irrigant du maïs grain enregistrées dans la RGA 2000 (Tableau 11).

**Tableau 11: Répartition des agriculteurs de la zone (données du RGA 2000) et ayant répondu à l'enquête (nombre d'agriculteurs et surface -SAU et maïs grain- dans chaque PRA)**

PRA	Données exhaustives (données RGA 2000 – 500 individus)			Données calculées à partir des enquêtes (96 individus)		
	% de maïsiculteurs irrigants	% de SAU	% de surface de maïs irrigué (grain et semence)	% de maïsiculteurs irrigants	% de SAU	% de surface de maïs grain irrigué
HARM (27%)	11	14	7	9	18	6
ASG (34%)	54	56	64	58	57	63
ASY (18%)	10	7	12	9	8	11
BIG (12%)	18	14	12	19	14	15
GAS (9%)	9	9	5	5	3	5

#### V.3.2.2.2 Méthodes et données utilisées pour l'approche qualitative

La seconde approche (b2), dite «qualitative », est basée sur des entretiens réalisés auprès des conseillers des organismes d'approvisionnement et de collecte qui ont permis de recenser les déterminants potentiels des chantiers de semis et des choix de précocité. Des entretiens semi-directifs ont été réalisés auprès de vingt maïsiculteurs irrigants de la zone d'étude en 2004 en veillant à ce que ces variables déterminantes potentielles soient renseignées.

Deux modalités identifiées comme discriminantes des pratiques de semis et du choix de précocité par la démarche b1 sont analysées: le débit de chantier et le nombre de groupes de précocités semés. Les données sont analysées de manière qualitative par recoupement d'information et utilisation de la méthodologie des Tableaux de Bertin (Bertin, 1977).

Les vingt agriculteurs ont été choisis dans l'objectif de couvrir une importante diversité de situations quant à l'environnement professionnel, à l'organisation des chantiers et à la localisation. Les deux principaux organismes de collecte et d'approvisionnement (OAS) dans la zone sont un négoce et une coopérative bien implantée dans la zone. Il a donc été choisi de demander aux deux OAS d'indiquer chacun 10 agriculteurs présentant des différences quant à 4 critères : l'appartenance à une CUMA pour le semis, la présence d'un séchoir sur l'exploitation, le type de système de production et la localisation de l'exploitation.

Les agriculteurs sont bien répartis dans la zone, la coopérative travaillant essentiellement avec des agriculteurs situés dans les PRA du nord de la zone, le négoce avec des agriculteurs dans des PRA du sud de la zone. Sauf pour trois agriculteurs, les exploitations ont un atelier de production animale (Tableau 12). Cinq agriculteurs de l'échantillon total sont en CUMA pour le semis du maïs, trois réalisent le séchage de leur production sur l'exploitation et deux agriculteurs séchant leur maïs par l'intermédiaire de la coopérative sèchent une partie de la production en cribs sur l'exploitation (Tableau 12).

Le questionnaire est constitué de deux parties (Annexe 7): une partie sur la structure de l'exploitation (surface agricole utile, productions, main d'œuvre, matériel etc.) et une partie sur les chantiers de semis et de récolte. Dans cette deuxième partie, deux types de questions ont été posées : des questions semi-ouvertes sur des données structurelles (matériel, main

d'œuvre pour les chantiers) et organisationnelles (mode d'organisation, nombre de jours de semis et nombre d'heures de travail par jour en situation non perturbée par la pluie etc.) et une question ouverte sur l'organisation du semis afin d'identifier les principales contraintes évoquées par les agriculteurs.

**Tableau 12: Répartition de l'échantillon d'agriculteurs selon les critères de choix de l'échantillon. (Le nombre d'agriculteurs dans chaque PRA et pour chaque système de production est indiqué entre parenthèses).**

	Système de production	Nombre d'agriculteurs en CUMA	Séchoir non naturel	Séchoir naturel (cribs)
<u>Coopérative</u>	Gavage canards (4)	-	-	2
HARM (2)	Porc (1)	1	-	-
ASG (6)	Bovin viande (2)		1	-
ASY (2)	Bovin lait (1)	-	-	-
	Bovin lait + canard (1)	1	-	-
<u>Négoce</u>	Gavage canards (3)	1	1	-
ASG (3)	Bovin viande (3)	-	1	-
BIG (3)	Bovin lait (1)	1	-	-
GAS (4)	Grandes cultures (3)	-	-	-

### V.3.3 Résultats

#### V.3.3.1 Déterminants pédoclimatiques et topographiques des pratiques

##### V.3.3.1.1 Impact du climat sur les démarrages du semis et les types de précocité

L'analyse des données climatiques en point de grille confirme l'existence d'une variabilité climatique orientée selon un axe nord-sud. Les résultats sont présentés pour les points de grille 28 à 23<sup>13</sup> (Figure 36a).

Un gradient régulier Nord-Sud de température est observable : le seuil de température nécessaire au moment du semis pour permettre la germination de la plante est atteint plus tôt au nord qu'au sud conduisant à une plage temporelle plus importante pour les semis au nord (Figure 36b). Si on s'intéresse aux jours disponibles, on voit que les premiers jours disponibles apparaissent de plus en plus tard quand on va du Nord au Sud (Figure 36c). On constate également un regroupement des zones climatiques (points de grille) en 2 groupes correspondant (i) aux points 28-27 qui couvrent la PRA HARM et la partie nord de ASG, et (ii) aux points 26, 25 et 24 qui couvrent la partie sud de ASG, ASY et une partie de BIG et GAS. Cela confirme le gradient thermique.

<sup>13</sup> Les points de grille 23 et 24, correspondant à la zone de piémont pyrénéen située au sud de la zone, sont inclus dans l'analyse à titre indicatif.

Les courbes de cumul des jours disponibles du premier groupe (28-27) sont semblables à un ou deux jours disponibles près (Figure 36c). Pour les courbes du deuxième groupe (26-25-24), on voit que la courbe du point 24 compte moins de jours disponibles que les deux autres. On note par exemple l'existence d'un plateau autour du jour julien 130 (10 mai) traduisant l'absence de jours disponibles que l'on ne retrouve pas sur les deux autres courbes du groupe. Les jours disponibles dépendent de la pluviométrie (2<sup>ème</sup> critère de calcul des jours disponibles). Bien qu'elles ne soient pas très importantes, ces différences peuvent traduire l'existence d'une variabilité de la pluviométrie, avec plus de pluie au Sud qu'au Nord

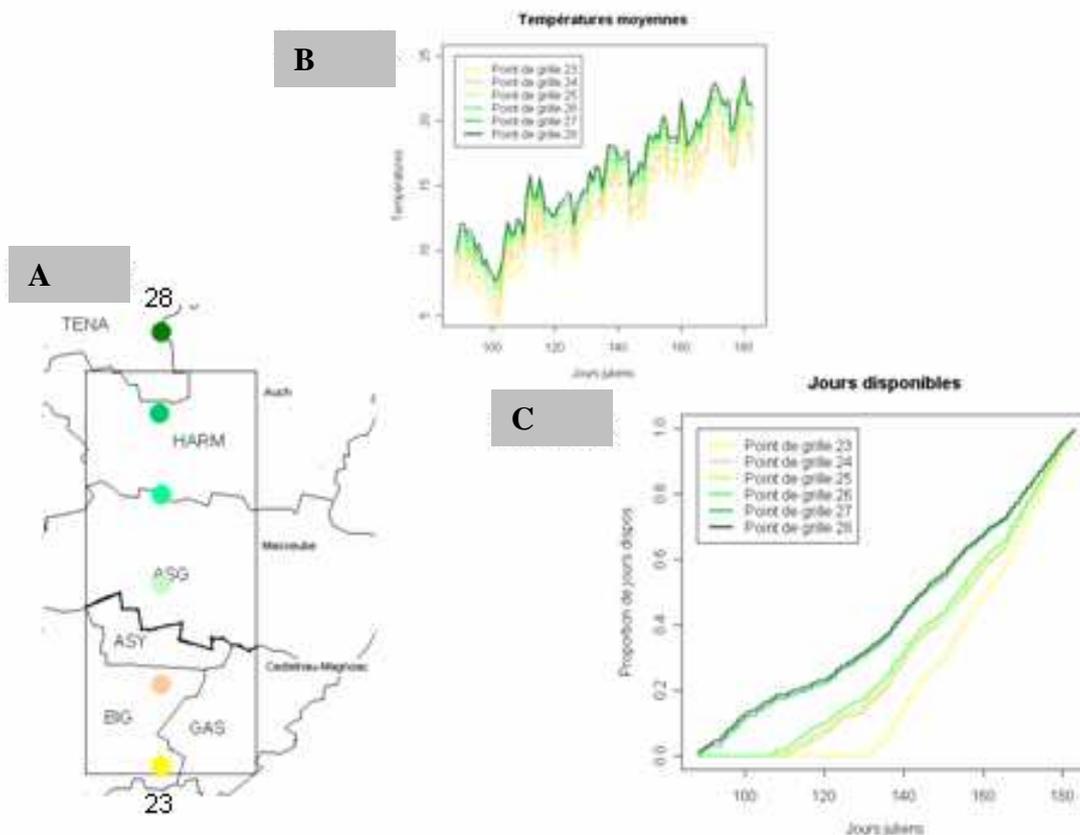


Figure 36: (a) Disposition des points de grille 23 à 28 au sein de la zone ; (b) Evolution moyenne sur 4 ans (1998, 2000, 2001, 2003) entre les jours juliens 80 (21 ou 22 mars) et 183 (2 ou 3 juillet) , (b) de la température journalière pour chacun de ces points de grille et (c) du pourcentage cumulé du nombre de jours disponibles.

#### Liens entre la variabilité spatiale du climat et les démarrages de chantier de semis observés

En 2003, les jours disponibles pour le semis s'échelonnent à partir du 24 février (jour julien 55) dans le nord de la zone et à partir du 13 avril (jour julien 103) dans la partie sud (Figure 37) Les données d'enquête postale de 2003 permettent de déterminer la date de semis minimale dans chaque PRA ainsi que les dates auxquelles 20% de la sole de maïs est semée dans chaque PRA (Tableau 13).

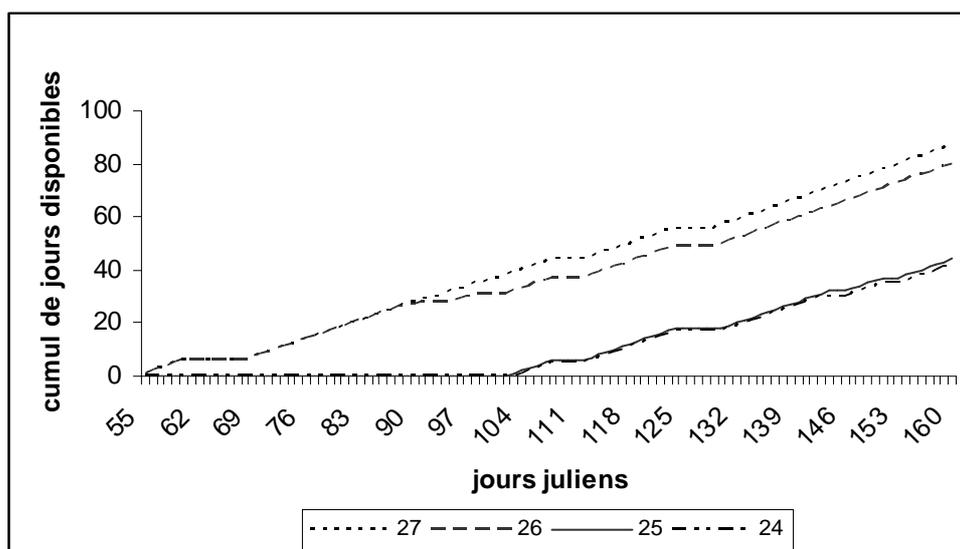


Figure 37: Cumul des jours disponibles en 2003 à partir du jour julien 55 (24 février) pour les points de grille 24 à 27

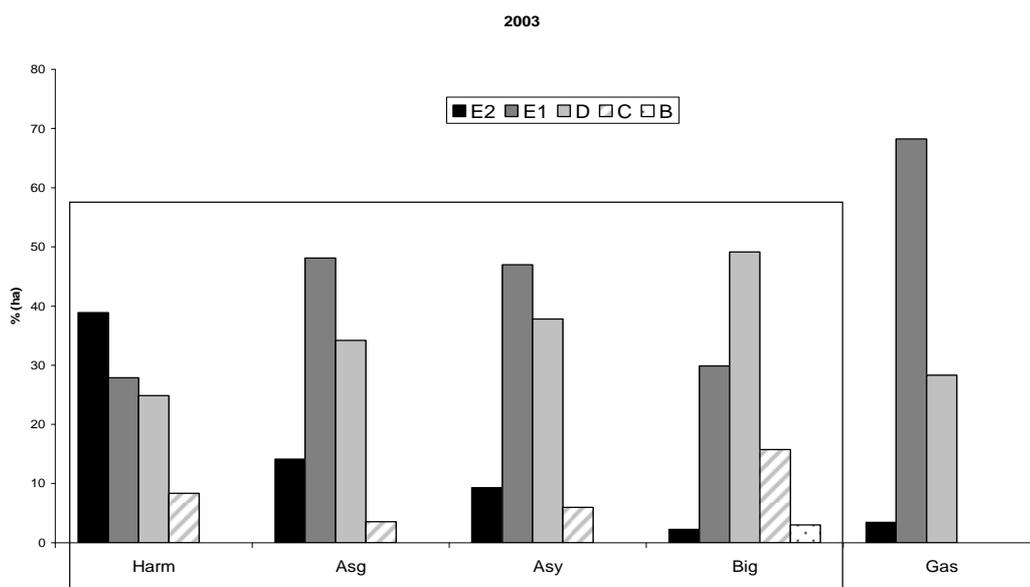
Les dates de semis minimales en 2003 s'échelonnent de la même manière que les premiers jours disponibles pour le semis. Dans les PRA HARM et ASG, les semis ont respectivement démarré aux jours juliens 74 et 85 alors que dans les PRA BIG, ASY et GAS, les semis démarrent après le jour julien 100 (Tableau 13). L'écart entre les 2 PRA du Nord et les 3 PRA du Sud diminue quand on compare les dates correspondant à 20% de surface semée (Tableau 13). Le nombre d'individus ayant semé autour des jours juliens 74 et 85 est donc faible. Cela peut s'expliquer par le fait qu'il est rare que les semis puissent démarrer si tôt et que même s'ils anticipent et s'adaptent aux conditions climatiques d'une année, les agriculteurs se fixent souvent des dates à partir desquelles ils vont commencer un chantier (Aubry et al, 1998), ces dates prenant en compte le climat moyen et les contraintes organisationnelles. En 2003, on peut supposer que malgré des températures favorables exceptionnellement tôt, les agriculteurs n'ont pas voulu prendre de risque quant au bon développement de la culture.

Tableau 13 : Dates de semis minimales observées dans les différentes PRA en 2003 (source : données d'enquêtes postales 2003). Les jours juliens correspondant aux dates sont donnés entre parenthèses.

	Date minimale	date où 20% de surfaces sont semées
<b>HARM</b>	15-mars (74)	15-avr (105)
<b>ASG</b>	26-mars (85)	17-avr (107)
<b>ASY</b>	10-avr (100)	22-avr (112)
<b>BIG</b>	13-avr (103)	22-avr (112)
<b>GAS</b>	17-avr (107)	21-avr (111)

### Liens entre la variabilité spatiale du climat et les types de précocités semés

La répartition des groupes de précocité dans chaque PRA (Figure 38) est cohérente avec le gradient Nord-Sud de températures de la zone (Figure 36 b): c'est dans la PRA HARM, où les températures sont les plus élevées que l'on trouve le plus de surfaces semées avec des variétés très tardives et dans la PRA BIG où les températures sont les moins élevées que l'on trouve le plus de surfaces semées avec des variétés demi-tardives et demi-précoces.



**Figure 38 : Distribution des groupes de précocité (% ha) dans chaque PRA en 2003 d'après les enquêtes postales. Les quatre PRA situées sur un axe Nord-sud sont encadrées. La PRA GAS est située plus à l'est. Les groupes de précocités s'échelonnent de E2 à B : E2( très tardif), E1 (tardif), D (demi-tardif), C (demi-précoce), B (précoce).**

#### V.3.3.1.2 Impact du type de sol et de la topographie sur les parcelles

##### **Influence de la présence ou non de deux types de sols dans la sole et de la localisation de la sole sur le nombre de groupes de précocité et les dates de démarrage des semis.**

La sole de maïs grain est située en vallée pour 56% de maïsiculteurs, en coteaux pour 11% et répartie sur les deux zones pour 33% des agriculteurs. Pour 27% des maïsiculteurs, la sole est essentiellement composée de sol terrefort, pour 48% d'entre eux, de boulbène et pour 25% elle est composée des deux types de sol de manière équilibrée. La répartition des soles de maïs grain suivant le type de sol et l'emplacement topographique est donnée Tableau 14. La combinaison dominante est une sole en vallée avec un sol en boulbène. Suivent ensuite les soles en vallée et en terrefort, puis les soles sur les deux zones avec des sols boulbène et les soles présentant les deux types de sol en vallée. Peu de soles sont situées en coteaux et présentent les deux types de sol.

	vallée	coteaux	2 zones
terrefort	14,7	5,3	7,4
boulbène	27,4	8,4	11,6
mélange sol	11,6	3,2	10,5

**Tableau 14: Proportions des soles de maïs grain pour chaque combinaison {type de sol \*emplacement topographique}**

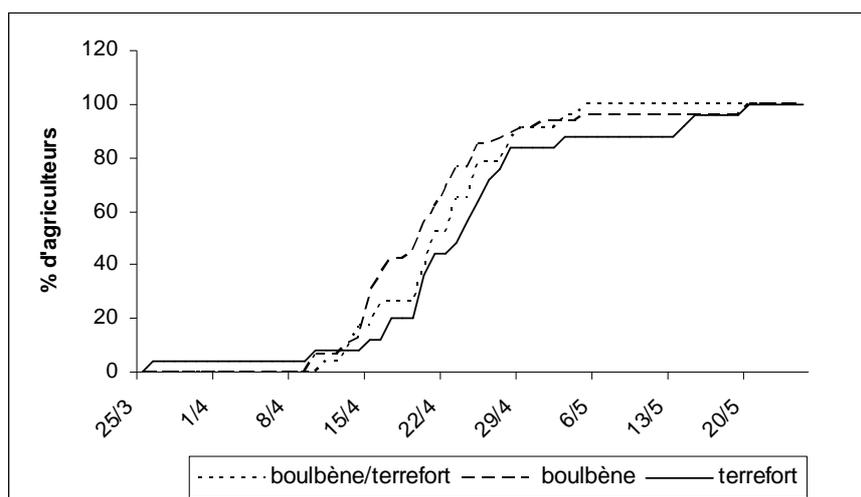
Par rapport au type de sol, la première hypothèse testée à l'échelle de la sole est que la présence des deux types de sol impliquerait le semis de plusieurs groupes de précocité. La seconde hypothèse est que les agriculteurs ayant leur sole tout en boulbène démarreraient les

semis plus tard étant donné que contrairement aux agriculteurs ayant leur sole tout en terrefort, ils ont le labour à réaliser juste avant le semis.

Pour le nombre de groupes de précocité, les résultats sont présentés pour la PRA ASG car elle compte le plus grand nombre d'agriculteurs ayant répondu à l'enquête (Tableau 11). Pour les dates de semis, les résultats sont donnés pour les 23 agriculteurs des PRA ASY et BIG car ces deux PRA sont rattachées à un même point de grille climatique.

Concernant le nombre de groupes de précocité, les agriculteurs ayant deux types de sols dans leur sole de maïs grain ne sont pas plus nombreux à semer plusieurs groupes de précocité que les agriculteurs n'ayant qu'un type de sol (50% environ). Par contre, on observe que parmi les agriculteurs ayant semé une précocité, 80% ont un seul type de sol tandis que parmi ceux ayant semé plusieurs groupes de précocité, seulement 66% ont un seul type de sol. La première hypothèse n'est donc pas confirmée.

La distribution du nombre d'agriculteurs démarrant les semis en fonction du temps selon le type de sol de leur sole de maïs grain montre que bien que certains agriculteurs dont la sole est en terrefort ont démarré plus tôt que les autres (dès la fin mars), les agriculteurs démarrent tous les semis à la même période quelque soit leur type de sol et que la tendance est ensuite plutôt inverse à notre hypothèse : pour une date donnée, les agriculteurs en boubène sont plus nombreux à avoir démarré (Figure 39).



**Figure 39: distribution du nombre d'agriculteurs démarrant le semis en fonction de la date selon le type de sol présent dans la sole de maïs grain (terrefort, boubène, terrefort et boubène)**

Par rapport à la localisation de la sole, nous supposons qu'une sole située sur les deux zones topographiques est signe d'un parcellaire éclaté avec des parcelles présentant des potentiels inégaux et que cela peut expliquer le semis de plusieurs groupes de précocité. Nous supposons également que les agriculteurs ayant leur sole sur les coteaux démarrent les semis plus tôt que les autres car le sol s'y réchauffe plus vite qu'en vallée.

Parmi les agriculteurs ayant leur sole sur les deux zones topographiques, 66% sèment plusieurs groupes de précocité tandis que parmi les agriculteurs ayant leur sole soit en zone de vallée soit en zone de coteaux, 30% sèment plusieurs groupes de précocité. Tendanciellement, la deuxième hypothèse est confirmée.

Concernant les dates de démarrage des semis, les agriculteurs dont la sole est entièrement en zone de coteaux démarrent les semis plus tard que les agriculteurs dont la sole est en zone de vallée (Figure 40). En zone de vallée, les agriculteurs ont démarré dès la fin mars jusqu'à fin avril. A partir de la fin avril, ils ont tous démarré le semis. En zone de coteaux, ils ont

démarré après la mi-avril jusqu'à fin mai pour certains. Les agriculteurs dont la sole est répartie entre vallée et coteaux démarrent les semis de la première décennie d'avril à la fin mai. Leur dynamique de semis semble suivre celle des agriculteurs en zone de vallée jusqu'au 25 avril puis celle des agriculteurs en zone de coteaux à partir de fin avril. La seconde hypothèse n'est donc pas confirmée.

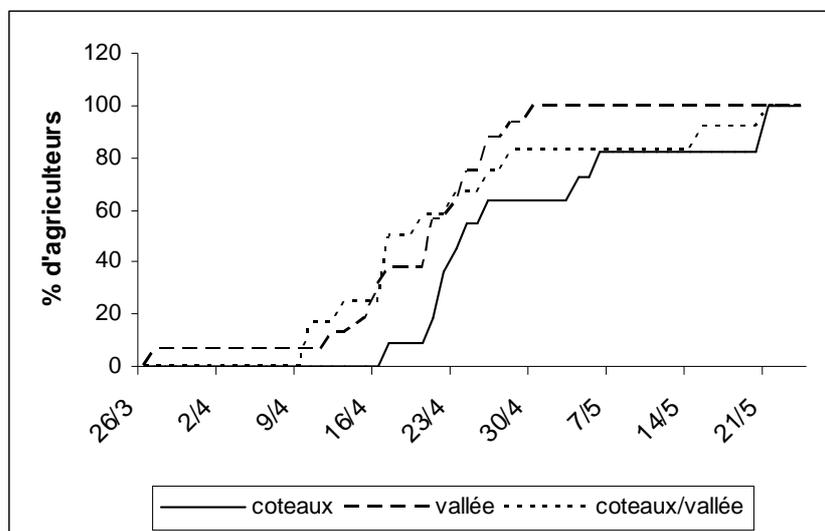
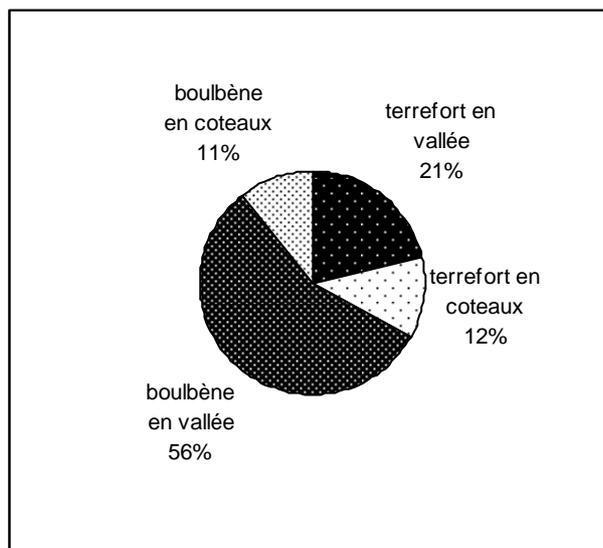


Figure 40: distribution du nombre d'agriculteurs démarrant le semis en fonction de la date selon la localisation de la sole de maïs grain (coteaux, vallée, dans les deux zones)

#### Influence de la localisation des parcelles sur le type de précocité et les dates de semis.

On considère ici les parcelles tout agriculteur confondu. La majorité des parcelles se trouve en zone de vallée. En effet, 77% des surfaces de maïs grain issues de l'enquête y sont situées. Cela paraît cohérent avec la description géomorphologique et agro-paysagère de la zone (cf. Figure 33) (Penalver et Longueval, 1999). La répartition des parcelles entre vallée et coteaux est différente entre les deux types de sol : les parcelles de type bouldière sont principalement en zone de vallée alors que l'on trouve les parcelles de type terrefort en proportion comparables entre les zones de coteaux et de vallée (Figure 41). Ces données sont également cohérentes avec la description géomorphologique et agro-paysagère de la zone (Penalver et Longueval, 1999).

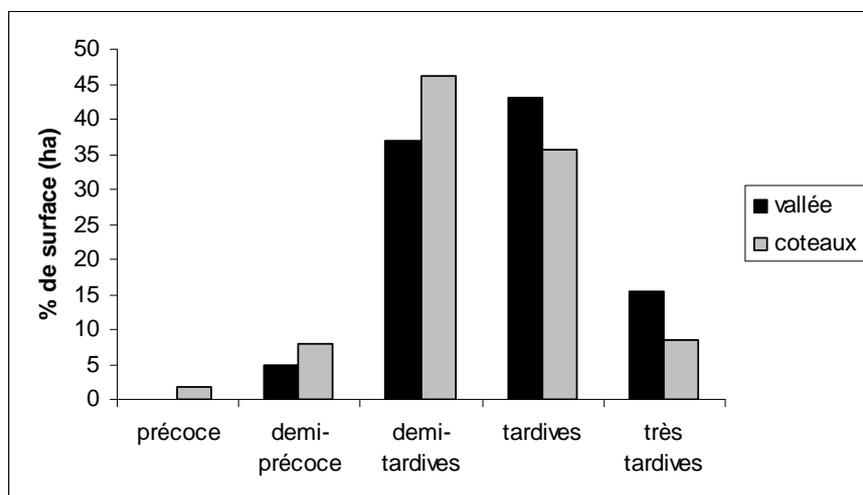


**Figure 41 : Répartition des parcelles de maïs grain entre les quatre associations type de sol\*localisation**

On s'interroge sur l'influence de la localisation des parcelles sur le type de précocité semé et les dates de semis. Etant donné que les parcelles en coteaux sont en général moins fertiles que les parcelles situées en vallée à cause de l'érosion, il est possible que les agriculteurs y sèment des variétés moins productives c'est-à-dire qu'ils y concentrent les variétés demi-précoces et précoces et qu'ils évitent d'y semer des variétés très tardives et tardives. On suppose également que les parcelles situées en coteaux sont semées avant celles situées en zone de vallée. Pour le type de précocité, les résultats sont donnés pour la PRA ASG. Pour les dates de semis, les résultats sont donnés pour les parcelles situées dans la zone climatique couverte par les points de grille 26 et 37 (sud ASG et ASY).

Concernant le type de précocité, leur distribution est présentée d'une part selon la localisation seule des parcelles et d'autre part selon les ensembles types de sol\*localisation.

Selon la localisation seule, une tendance se dégage (Figure 42): en vallée, ce sont les variétés tardives qui occupent le plus de surface suivies des variétés demi-tardives tandis qu'en zone de coteaux, ce sont les variétés demi-tardives qui occupent le plus de surface suivies des variétés tardives. En outre, en zone de vallée, les variétés très tardives occupent plus de 15% de surface alors qu'elles en occupent moins de 10% en zone de coteaux.

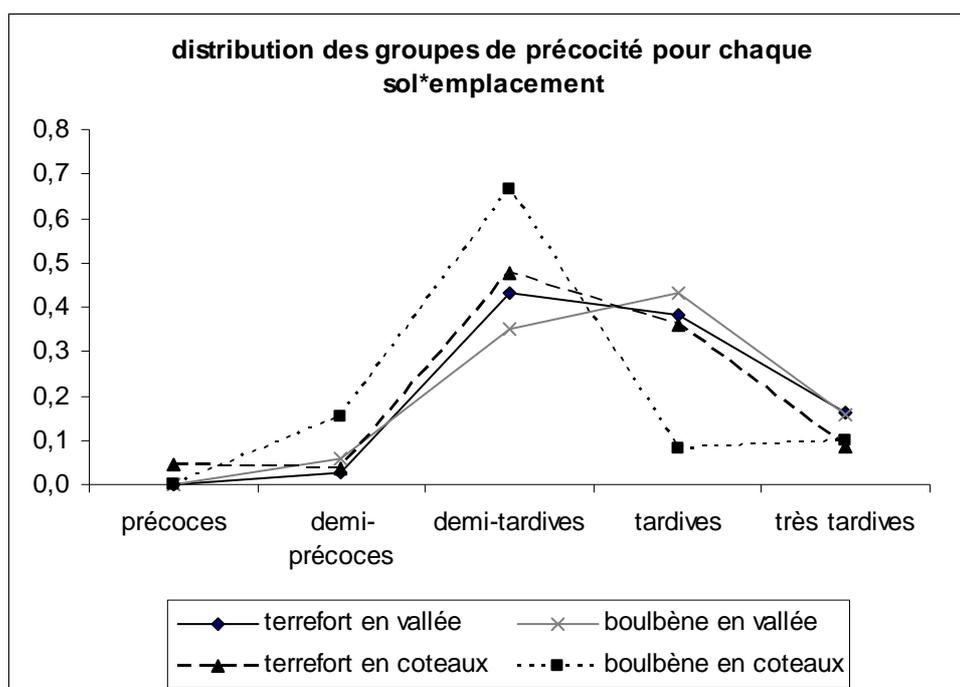


**Figure 42 : Répartition des groupes de précocités (a) dans les zones de vallée ou de coteaux et (b) sur les sols terrefort ou boulbène.**

Selon les ensembles types de sol\*localisation, des tendances se dégagent également. La répartition des cinq groupes de précocité pour chaque association type de sol\* localisation est donnée Figure 43.

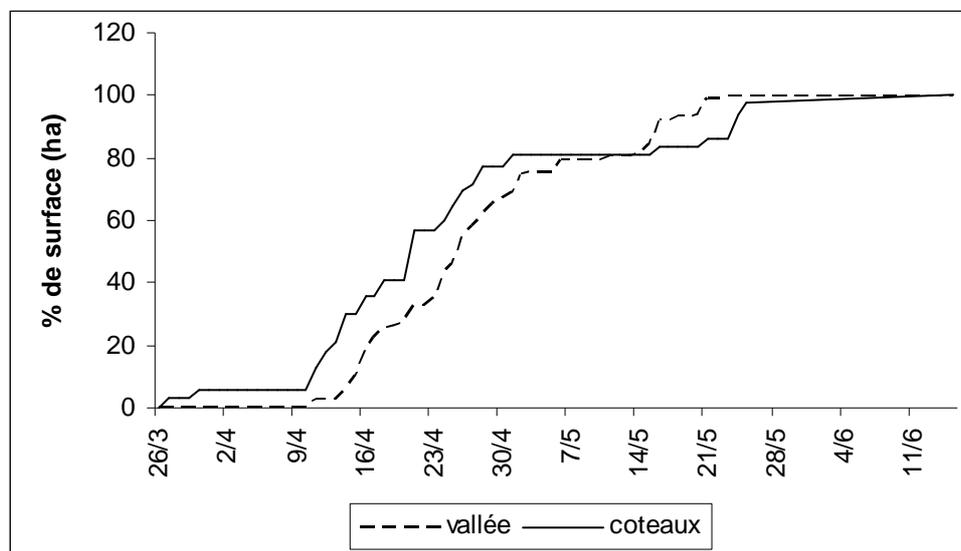
Globalement, l'ensemble « boulbène de coteaux » se distingue des autres : on trouve y principalement des variétés demi-tardives. Les trois autres ensembles sont assez semblables si ce n'est que l'on trouve une plus grande proportion de variétés tardives et très tardives en boulbènes de vallée.

Une analyse des corrélations permet de fournir des « règles » de détermination des distributions sachant soit le sol, soit localisation des parcelles. Les précocités se répartissent de manières quasi identiques entre (i) les terreforts en vallée et boulbènes en vallée ( $R^2=0.967$ ,  $c^2=0.999$ ), (ii) les terreforts en coteaux et terreforts en vallée ( $R^2=0.970$ ,  $c^2=0.998$ ) et (iii) les boulbènes en coteaux et terreforts en coteaux ( $R^2=0.917$ ,  $c^2=0.951$ ). La différence de répartition la plus importante se trouve entre (iv) les boulbènes en coteaux et les boulbènes en vallée ( $R^2=0.471$ ,  $c^2=0.943$ ) et (v) les boulbènes de coteaux et les terreforts de vallée ( $R^2=0.655$ ,  $c^2=0.859$ ): en boulbènes de coteaux, les variétés demi-tardives occupent 70% de la surface, les variétés tardives et très tardives environ 10% chacune alors qu'en boulbène de vallée (iv), les variétés demi-tardives représentent 35% de la surface, les variétés tardives environ 40% et les très-tardives 20% et que sur les terreforts en vallée (v), les variétés demi-tardives occupent environ 50% de la surface, les variétés tardives 40% et très tardives 10%. Ces résultats permettent de conclure que si on sait que les surfaces de maïs grain sont situées en vallée ou en coteaux, la distribution des précocités est identique quelque soit le sol. Si on sait que le sol des surfaces de maïs grain est en terrefort, la distribution des précocités est identique quelle que soit la localisation. Enfin, si on sait que le sol des parcelles est en boulbène, la distribution varie selon la localisation des parcelles : en vallée, il y a respectivement 20, 40, 30 de variétés très tardives, tardives et demi-tardives alors qu'en zone de coteaux, il y a 70% de variétés demi-tardives.



**Figure 43 : Répartition des surfaces de chaque groupe de précocité selon les ensembles type de sol\*localisation**

Concernant les dates de semis, un décalage d'une semaine entre le pourcentage de surface semé en zone de coteaux et le pourcentage de surface semé en zone de vallée est observable jusqu'à une période de pluie début mai (Figure 44). Après le 14 mai, les semis se font plus rapidement en zone de vallée qu'en zone de coteaux. Les semis en zone de coteaux se font donc bien globalement avant ceux réalisés en zone de vallée.



**Figure 44: dynamique des semis en zone de coteaux et de vallée (sud ASG, ASY)**

### V.3.3.2 Analyse des déterminants des pratiques liés aux contraintes d'exploitation et à l'environnement socio-économique

Dans cette partie (b) (Figure 35), nous nous intéressons aux déterminants non liés aux contextes pédoclimatique et topographiques. Dans la partie V.3.3.2V.3.3.1, après avoir présenté ce que nous entendons par « stratégie de semis et de choix de précocité », nous identifions une typologie de stratégies puis nous recherchons des données facilement accessibles permettant de prédire la distribution spatiale des stratégies. Dans la partie V.3.3.2, nous recherchons des déterminants de deux éléments discriminant les pratiques à partir d'entretiens auprès d'un groupe de maïsiculteurs.

#### V.3.3.2.1 Approche « quantitative »

La partie (b1) porte sur l'identification de stratégies indépendantes du contexte climatique et la recherche de liens avec des données décrivant les exploitations, facilement accessibles à l'échelle régionale.

#### Elaboration d'une typologie de stratégies

La typologie de stratégie est construite à partir des données de l'enquête postale 2003. La stratégie de semis et de choix de précocité est décrite par trois groupes de variables (Tableau 15):

- Des variables décrivant le chantier de semis
- Des variables décrivant le choix de précocité

- Une variable décrivant la gestion de la densité de semis

Ces variables ont été construites à partir de quatre types de données factuelles : les dates de semis, la variété semée, la densité et la surface semée. L'enquête postale ne recensait pas le débit de chantier qui permet d'estimer le nombre de jours nécessaires. Elle recensait le nombre de jours réellement passés à semer. Le chantier de semis a été décrit par quatre variables: (i) la période de démarrage par rapport à la date de démarrage moyenne des maïsiculteurs [DEMA], (ii) le nombre de jours de semis [NBJO], (iii) la durée totale du chantier [EVEN], (iv) le nombre de sessions de semis [SESS]. Le choix de précocité a été décrit par quatre variables : (i) le nombre de groupes de précocité [NBPRECO], (ii) le type d'association de groupes de précocité [ASSO], (iii) le type de répartition des groupes de précocité dans la sole [REPA], (iv) le type d'ordre de semis des précocités. Le mode de gestion de la densité a été décrit par une variable [DENS]. Bien que la représentation des stratégies a été choisie afin qu'elles soient indépendantes des conditions météorologiques d'une année donnée, les conditions météorologiques de l'année 2003 ayant été peu contraignant, les dates de semis sont plus directement le résultat des contraintes organisationnelles que des contraintes climatiques par rapport à une année où le printemps aurait été pluvieux.

Nous considérons que le nombre de groupes de précocité semés est un choix stratégique par rapport aux objectifs de production et à l'inégalité des potentialités des différentes parcelles de la sole maïs grain. Les conseillers des O.A.S. ont mentionné des changements de groupes de précocité en cours de campagne une année sur dix en cas de semis très retardés. C'est donc un choix que l'on peut supposer stable tant que les conditions climatiques n'empêchent pas la réalisation du semis avant une date où les agriculteurs changent d'organisation (15 mai) (Lorgeou, com.pers.). Ensuite, nous considérons que le type d'associations de groupes de précocité est également un choix stratégique qui est fait en fonction des contraintes climatiques locales habituelles et de l'objectif de production. Ainsi, par exemple, le fait de semer des variétés très tardives dans la sole est lié à un potentiel de somme de températures important ainsi qu'un objectif de rendement élevé.

Les variables décrivant la pratique du semis ont été calculées afin de ne pas tenir compte des conditions météorologiques de l'année d'étude :

- L'organisation du chantier est décrite en prenant en compte les arrêts dus à la pluie. Le nombre de jours de semis est le nombre de dates de semis déclarées. Un chantier est considéré organisé en plusieurs sessions si le chantier est stoppé pour des raisons non météorologiques. Ainsi, un chantier est considéré comme continu même si le chantier est stoppé par l'apparition de jours non disponibles (pluie) puis repris à partir de l'apparition de jours à nouveau disponibles.
- La période de démarrage est liée aux conditions climatiques locales. Néanmoins, pour une zone considérée comme homogène climatiquement, tous les agriculteurs ne démarrent pas tous leur chantier au même moment. Regroupant les agriculteurs situés dans une des deux zones climatiques présentées dans 3.1, les agriculteurs ont été classés selon qu'ils ont démarré en 2003, bien avant la majorité des agriculteurs (a) , dans la période moyenne de démarrage (b) ou bien après (c). Les périodes (a), (b), (c) ont été déterminées en identifiant au cas par cas le positionnement de la date de démarrage par rapport aux dates où le plus grand nombre d'agriculteurs de la zone climatique ont démarré.
- L'ordre de semis des différents groupes de précocité est généralement fixé a priori par l'agriculteur (Maton et al, 2005). Il peut cependant être modifié en cours de chantier. Quatre ordres de semis ont été identifiés (1-4) comme relevant d'une stratégie. Quand

l'ordre de semis ne pouvait être rattaché à une stratégie particulière, il a été catégorisé en une cinquième modalité possible (5).

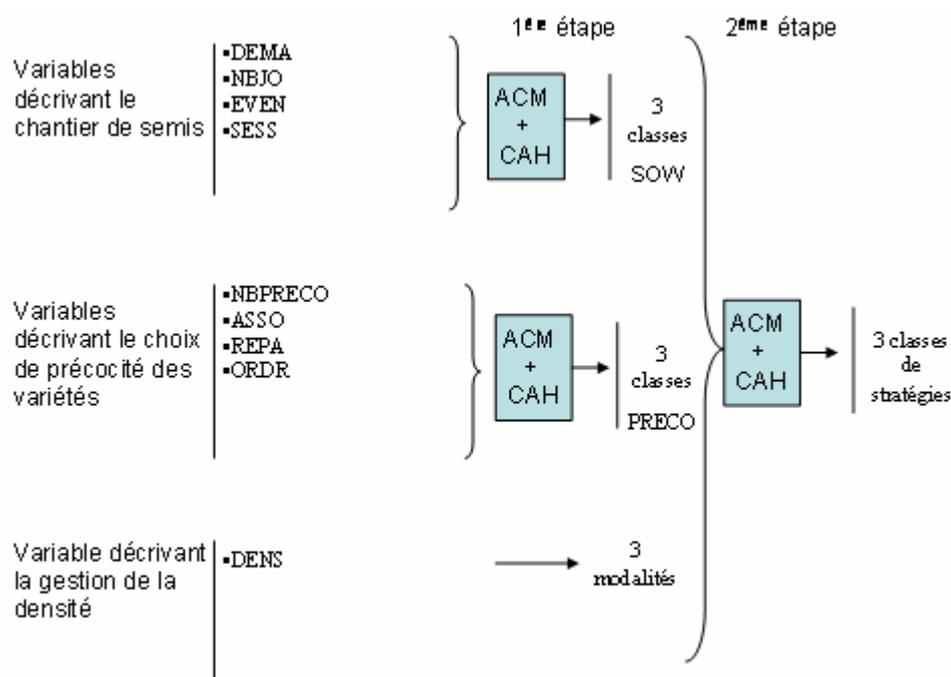
Les modalités des variables sont décrites dans le Tableau 15.

**Tableau 15 : Description des modalités des variables de construction de la typologie de stratégies**

	Variables	Modalités des variables
Semis	Période de démarrage du semis	(a) démarrage avant la moyenne (b) démarrage pendant la période moyenne de démarrage (c) démarrage après la moyenne
	Nombre de jours de semis (nombre de dates) NB : On trouve de 1 à 16 jours de semis, la majorité des agriculteurs ayant 2 ou 3 jours de semis. Le nombre de jours de semis n'est pas une donnée estimée mais le nombre de dates de semis déclarées par les agriculteurs.	1 : 1 jour 2 : 2 et 3 jours 3 : de 4 à 7 jours 4 : + de 8 jours
	Durée du chantier (en nombre de jours) NB : C'est le nombre de jours entre le 1 <sup>er</sup> jour de semis et le dernier. Celui ci varie de 1 à 52 jours, plus de 60% des agriculteurs ayant un chantier durant entre 8 et 14 jours.	1 : 1 jour 2 : de 2 à 7 jours 3 : de 8 à 14 jours 4 : de 15 à 21 jours 5 : + de 22 jours
	Nombre de sessions de semis	1 : 1 session 2 : 2 sessions 3 : 3 et 4 sessions
Choix de précocité	Nombre de précocités	1-4 modalités : 1 à 4 précocités
	Type d'association de précocités (« asso »)	1 : Groupe Très tardif présent 2 : Groupe tardif présent 3 : Groupe demi tardif présent 4 : Groupe demi précoce présent 5 : mélange de variétés des groupes « tardif » et des groupes « précoces »
	Répartition des différentes précocités dans la sole NB : les calculs ont été effectués après avoir éliminé les surfaces en essai. La répartition des précocités est équilibrée si chaque précocité représente entre 40 et 60% de la sole si on a 2 précocités, de 27 à 40% de la sole si on a 3 précocités et de 20 à 30% de la sole si on a 4 précocités.	1. 100% de la sole est occupée par la même précocité 2. équilibré 3. déséquilibré tardif (Ce sont les précocités les plus tardives qui occupent le plus de surface) 4. déséquilibré précoce (Ce sont les précocités les plus précoces qui occupent le plus de surface) intermédiaire (3 ou 4 précocités)
	Ordre du semis des précocités dans le temps au sein de la sole	1 : les précocités les plus tardives sont semées en 1 <sup>er</sup> 2 : les précocités les plus précoces en 1 <sup>er</sup> 3 : les précocités sont semées en même temps + cas où une seule précocité est semée 4 : une variété précoce est semée au départ puis les précocités les + tardives sont semées ensuite. 5 : pas d'ordre défini
Gestion de la densité de semis	Type de gestion de la densité pour la sole	1 : modulation de la densité selon la précocité 2 : densité constante quelle que soit la précocité, la date ou la variété 3 : modulation sans raison identifiée

L'élaboration de la typologie a été décomposée en deux étapes (Figure 45). Dans la première étape, en raison du grand nombre de variables par rapport au nombre d'individus, les données sont analysées par groupes de données : chantier de semis, choix de précocité et gestion de la densité. Une analyse des correspondances multiples (ACM) suivie d'une classification ascendante hiérarchique (CAH) permet de réduire le nombre de variables pour chaque groupe de variables. Des typologies intermédiaires sont obtenues. Dans la deuxième

étape, la même démarche est appliquée à l'ensemble des classes des typologies intermédiaires après avoir affecté chaque individu dans une classe décrivant le chantier de semis, une classe décrivant le choix de précocité et une des modalités décrivant le mode de gestion de la densité.



**Figure 45: les étapes de construction de la typologie de stratégies de semis et de choix de précocité**

Trois classes de stratégies a, b, c ont été obtenues (Annexe 9). Les variables explicatives des facteurs ayant servi à établir les classes sont pour le semis : le nombre de sessions et le nombre de jours de semis, et pour le choix de précocité : le nombre de groupes de précocité semés. Les classes a et c présentent une variabilité interne importante mais peuvent être caractérisées par des tendances dominantes :

- Dans la classe a, représentant 47% des individus, les agriculteurs sèment en une session de deux à sept jours de semis. La majorité des agriculteurs démarrent avant la moyenne des agriculteurs. Ils sèment entre deux et trois groupes de précocités différentes. Les associations de groupes de précocités sont très diverses, mais la répartition des groupes favorise les variétés les plus précoces au sein des associations et ce sont les variétés tardives qui sont semées en premier. La densité est dans 60% des cas constante, dans 30% des cas modulée selon la précocité.
- Dans la classe c, représentant 15% des agriculteurs, les agriculteurs sèment en plusieurs sessions et leur chantier peut s'étaler sur un mois. Il n'y a pas de tendance particulière pour le démarrage. Trois ou quatre groupes de précocité sont semés, sachant que les variétés tardives et demi-tardives représentent le plus de surface au sein de la sole.
- La classe b, représentant 39% des individus présente moins de variabilité intra classe. Les agriculteurs sèment leur sole en un ou deux jours avec un seul groupe de précocité. La précocité est variable c'est-à-dire de très tardive à demi-précoce mais une majorité d'agriculteurs sèment des variétés demi-tardives. Les agriculteurs démarrent pendant la période où la majorité des agriculteurs sème ou après.

### **Liens entre des données décrivant l'exploitation agricole et les stratégies**

Différents tests variant en fonction des variables potentiellement explicatives et les variables à expliquer (Tableau 16) ont été réalisés. Les variables potentiellement explicatives, issues de données recueillies par l'enquête postale, ont été choisies selon leur accessibilité au sein de bases de données administratives (données de recensement général agricole, données d'une typologie régionale des exploitations agricoles) ou de documents type carte de sols. Pour certaines, plusieurs types de codage ont été testés permettant d'utiliser des effets de seuils probables (SAU, surface de maïs grain etc.).

Certaines variables ont été construites à partir de données facilement accessibles recensées dans l'enquête. Il s'agit de la part de maïs irrigué dans la SAU et de la part de surface irriguée dans la SAU. La part de maïs irrigué dans la SAU est un indicateur utilisé pour catégoriser les exploitations de grandes cultures par les services statistiques agricoles (Agreste, 2004). Il permet de distinguer les exploitations à dominante « maïs irrigué » qui correspondent aux exploitations ayant plus de 25% de maïs dans leur superficie totale de celles à dominante « cultures sèches » qui correspondent aux exploitations ayant moins de 25% de surface en maïs dans leur superficie totale. La part de surface irriguée dans la SAU est un indicateur utilisé pour catégoriser les systèmes de production de grandes cultures (Agreste, 2004). Trois systèmes sont distingués : le système en sec (surface irriguée < 10% de la SAU), le système mixte (de 10 à 40% de surface irriguée dans la SAU), et le système irrigué (plus de 40%).

Trois types de variables à expliquer ont été testés : les sous-classes issues des deux typologies intermédiaires SOW et PRECO ainsi que les classes issues de la typologie finale (stratégies a, b et c).

**Tableau 16: description des variables explicatives et à expliquer**

Variables potentiellement explicatives	Variables à expliquer
<ul style="list-style-type: none"> <li>• SAU : variable quantitative ou 4 classes (&lt;20ha, 20-39ha, 40-59ha, &gt;60ha)</li> <li>• Surface de maïs grain: variable quantitative ou classes (par exemple, inférieur ou supérieur et égal à 60 ha)</li> <li>• Types de sol : bouldène, terrefort, les deux ou part des sols bouldène dans la sole</li> <li>• Emplacement des parcelles: vallée, coteaux, les deux ou part de surface de la sole en coteaux</li> <li>• Elevage : Oui / Non ou classes (aucun, élevage laitier, élevage allaitant et canards plein air, hors sol)</li> <li>• Semis d'autres cultures d'été : Oui / Non</li> <li>• Présence de céréales à paille : Oui / Non</li> <li>• Maïs ensilage : Oui / Non</li> <li>• Maïs semence : Oui / Non</li> <li>• Main d'œuvre : 1 UTH, ∈ ] 1UTH; 2 UTH], plus de 2 UTH</li> <li>• Main d'oeuvre d'occasion: Oui / Non</li> <li>• Coopérative/ négoce: Oui / Non</li> <li>• PRA</li> <li>• Un ou plusieurs types de matériels d'irrigation</li> <li>• Types de matériel d'irrigation</li> <li>• Surface maïs irrigué/ SAU : classement en deux type : &gt; (exploitation à dominante « maïs irrigué ») ou &lt; à 25% (exploitation à dominante « cultures sèches ») [type25]</li> <li>• Type de système: surface irriguée/SAU : classement trois groupes (&lt;10% « système sec », ∈ [10% ; 40%] « système mixte », &gt;40% « système irrigué ») [Syst]</li> </ul>	<p><u>SOW (3 classes)</u></p> <p>SOW1 : plusieurs sessions de semis</p> <p>SOW2 : 1 session et environ une semaine de semis</p> <p>SOW3 : 1 session, 1ou 2 jours de semis</p> <p><u>PRECO (3 classes)</u></p> <p>PRECO1 : 3-4 groupes de précocités, répartition déséquilibrée, par d'ordre apparemment défini</p> <p>PRECO2 : 2-3 groupes de précocités, grande variabilité de types de précocité, répartition favorisant les variétés les plus précoces, tardives semées en premier</p> <p>PRECO3 : 1 groupe de précocité, type variable avec une prédominance des variétés demi-tardives</p> <p><u>Types de stratégies (3 classes)</u> <u>classes a, b, c</u></p>

Aucun arbre prédictif n'a pu être obtenu pour prédire la sous-classe décrivant le semis (SOW).

Un seul arbre prédictif a été obtenu pour prédire la sous-classe décrivant le choix de précocité (PRECO). Il s'agit d'un arbre de classification basé sur un seul indicateur : la part de maïs dans la SAU. Si l'exploitation est à dominante « maïs irrigué », la répartition des sous classes est 13% de PRECO1, 60% de PRECO2 et 27% de PRECO3, sinon, (cas des exploitations à dominante cultures sèches), la répartition est 7% de PRECO1, 23% de PRECO2 et 70% de PRECO3.

De l'ensemble des arbres de classification testés pour prédire directement les classes de stratégies de semis et de choix de précocité, nous n'avons obtenu qu'un seul arbre prédictif (Figure 46) (Annexe 10). Cet arbre de classification permet d'estimer des répartitions de classes de conduites de semis à partir de 4 variables : le type d'exploitation de grande culture : exploitation à dominante « maïs irrigué » ou « cultures sèches », la présence ou non d'un

atelier d'élevage, la SAU, le type de système : « système sec », « système mixte » ou « système irrigué ».

- L'arbre permet d'identifier les règles suivantes (les % respectifs de chaque classe a, b, c sont données entre parenthèses) :
- Si l'exploitation est à dominante "cultures sèches", les agriculteurs sont majoritairement de la classe b. (23%, 70%, 7%)
- Si l'exploitation est à dominante « maïs irrigué », qu'elle ne possède pas d'atelier d'élevage et que la SAU est comprise entre 20 et 60 ha, la classe de conduite de semis est majoritairement la classe a. (75%, 12.5%, 12.5%)
- Si l'exploitation est à dominante « maïs irrigué », qu'elle ne possède pas d'atelier d'élevage et que la SAU est inférieure à 20 ha et supérieure ou égale à 60 ha, la classe de conduite de semis est majoritairement la classe c (17%, 33%, 50%).
- Si l'exploitation est à dominante « maïs irrigué », qu'elle possède un atelier d'élevage et que son système est « mixte », la classe de conduite de semis est majoritairement la classe a (70%, 15%, 15%).
- Si l'exploitation est à dominante « maïs irrigué », qu'elle possède un atelier d'élevage et que son système est « sec » ou irrigué et que la SAU est inférieure à 20 ha ou supérieure ou égale à 60ha, la classe de conduite de semis est majoritairement la classe a. (75%, 25%, 0%)
- Si l'exploitation est à dominante « maïs irrigué », qu'elle possède un atelier d'élevage et que son système est « sec » ou irrigué et que la SAU est comprise entre 20 et 60 ha, la classe de conduite de semis est majoritairement la classe b (28%, 56%, 16%).

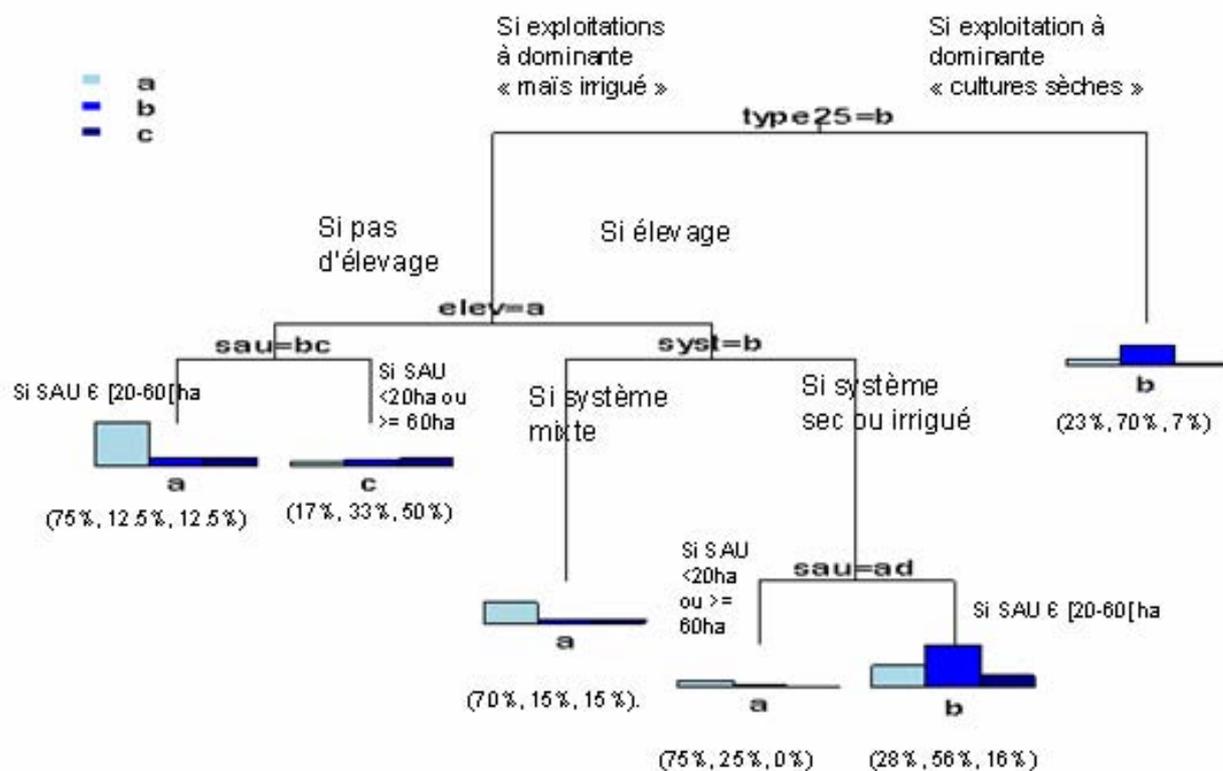


Figure 46 : Arbre de classification permettant de déterminer la distribution des trois classes de stratégies de semis et de choix de précocité

#### V.3.3.2.2 Approche « qualitative »

Dans cette partie (b2), on se focalise sur le débit de chantier et le nombre de groupes de précocité. Les déterminants des pratiques de semis et de choix de précocité identifiées à partir des conseillers sont analysés après collecte chez une vingtaine d'agriculteurs.

#### □ Le débit de chantier

Le débit du chantier (en hectare par jour), c'est-à-dire la surface semée par jour, est un indicateur de l'organisation du chantier. Il permet d'estimer le nombre de jours de semis nécessaires si on connaît la surface à semer. Papy et Servettaz (1986) ont identifié les déterminants de ce débit de chantier en analysant leur variabilité entre les exploitations laitières petites et moyennes et les exploitations de grande culture avec salariés. La présence d'élevage, de la nature de la main d'œuvre pour le chantier, de l'état physique du sol, de la largeur du travail, de l'exigence du profil, des outils mobilisés, de la possibilité d'anticiper ou de différer des opérations, des tracteurs et hommes disponibles et des risques climatiques acceptés font partis des facteurs expliquant la variabilité. Le calcul du débit de chantier à partir d'autres données nécessite une connaissance très précise de l'ensemble de ces facteurs explicatifs.

Le débit de chantier a été demandé aux 20 agriculteurs enquêtés en 2004. Il présente une variabilité importante au sein de l'échantillon : de 7 à 20 ha par jour. Le nombre de jours de

semis varie de 2 à 10 au sein de la population de maïsiculteurs enquêtés pour des surfaces de maïs grain à semer variant de 14 à 120 ha. La corrélation entre la surface et le nombre de jours de semis est faible ( $R^2=0.56$ ).

Parmi les déterminants évoqués par les distributeurs, je présente ici ceux qui peuvent être recueillis sans observation de parcelle ou suivi du chantier. La présence d'élevage, la nature et le nombre de main d'œuvre pour le chantier, le type de semoir et sa vitesse d'avancement, l'habitude de semer de nuit, les contraintes d'organisation du chantier sont les déterminants identifiés à partir des déclarations des agriculteurs. Le type de sol n'est pas pris en compte car tous les agriculteurs ont évoqué la présence des deux types de sol (boulbène/terrefort) sans bien préciser la part de chaque dans la sole de maïs grain.

Le Tableau 17 présente les données déterminantes par ordre croissant de débit de chantier. D'autres données sont listées permettant de situer l'agriculteur dans la zone (PRA) et de définir l'orientation du système de production (SAU, surface de maïs grain, type de système, dominante de l'exploitation [type25], objectif de rendement). Enfin, le nombre de groupes de précocité et leurs types sont donnés.

Les agriculteurs ayant les débits de chantier les plus élevés sont globalement aussi ceux dont la SAU, la surface de maïs grain, la part de surface irriguée (système), la main d'œuvre et le nombre de rangs au semoir présentent les valeurs les plus élevées. Ils ont tendance à semer de nuit. Par contre, ce ne sont pas ceux qui sèment le plus de groupes de précocité dans leur sole. Cet exemple montre que plusieurs facteurs définissant l'organisation du travail et le système de production peuvent être explicatifs du débit de chantier et qu'il est difficile de hiérarchiser leur impact. Un arbre de classification du débit de chantier classé en 4 groupes (7-9 ; 10-12 ; 15-16 ; 20 ha/j) a cependant été testé afin de déterminer les déterminants les plus discriminants. Vu le petit nombre d'individus, il est utilisé pour une description des données et non une prédiction. Le type de semoir apparaît comme la variable la plus discriminante du débit de chantier (Figure 47).

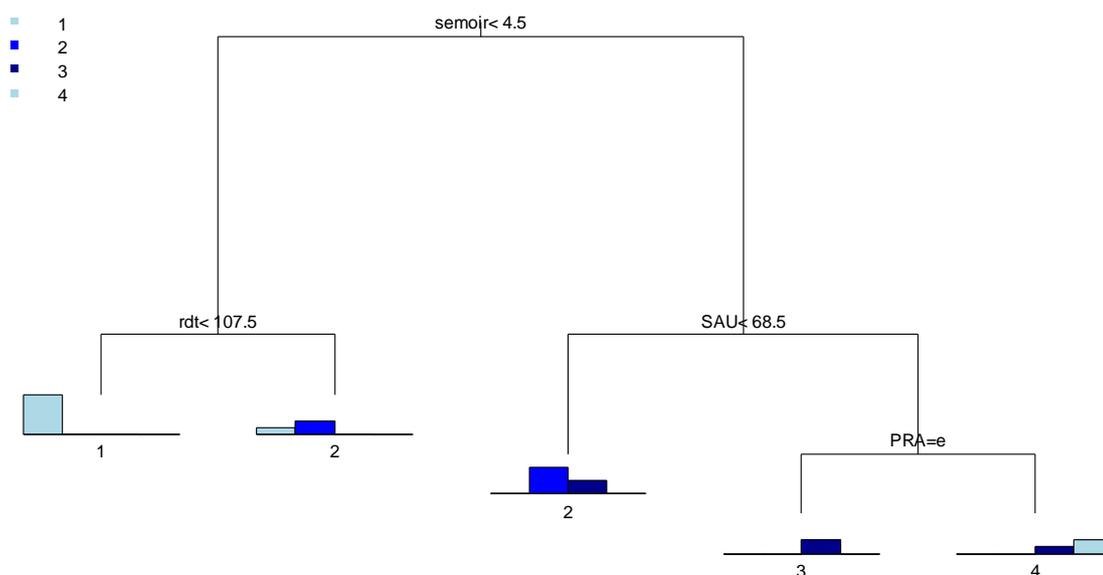


Figure 47: Arbre de classification complet (Breiman et al., 1984) obtenu à partir de : « Classes de débit= f(PRA+SAU+ surface de maïs+rendement objectif+ type d'atelier d'élevage+main

**d'oeuvre+organisation du chantier+type de semoir+vitesse de semis +travail de nuit ou non) ».**  
**Classes de débit de chantier : 1 : 7-9 ha/j ; 2 : 10-12 ha/j ; 3 : 15-16 ha/j ; 4 : 20 ha/j.**

### **Le nombre de groupes de précocité**

Le nombre de groupes de précocité semés en 2004 par les agriculteurs enquêtés varie de 1 à 3. Pour ceux semant un groupe de précocité, le type de précocité, représenté par la variable « asso » (cf. Tableau 15), est très variable (de précoce à très tardif). Pour ceux semant 2 ou 3 groupes, diverses associations de précocités sont déclarées (Tableau 18). D'après le discours des agriculteurs, l'ordre de semis des groupes de précocité est variable d'un agriculteur à l'autre: il peut être fixé (par exemple, des plus tardives au moins tardives; semis d'une précoce puis des plus tardives au moins tardives) ou se décider en cours de chantier.

Bien que les agriculteurs aient tous déclarés la présence des deux types de sols dans leur sole maïs, les données de l'enquête 2004 apportent des précisions quant à l'impact du type de sol et de la topographie sur le choix de précocité. Il apparaît que les agriculteurs semant plusieurs groupes de précocité font des associations type de sol/précocité ou type de sol/matériel d'irrigation/précocité quand ils ont un pivot et des enrouleurs : le type de sol est décrit par rapport à ses potentialités productives et ainsi, les variétés très tardives ou tardives sont semées sur les sols de vallée « à fort potentiel » et irriguées avec un pivot pour ceux qui en ont tandis que les variétés demi tardives ou demi précoces sont semées préférentiellement sur les « sols de coteaux » où le matériel d'irrigation est généralement l'enrouleur. La dénomination du type de sol « boubène » ou « terrefort » n'est pas naturellement exprimée par les agriculteurs.

Les données 2004 confirment qu'il est difficile de déterminer des règles de prédiction du nombre de groupes de précocités semés par les agriculteurs. Seules des tendances peuvent être identifiées (Tableau 18):

- Les agriculteurs semant trois groupes de précocité ont moins de 45 ans et c'est dans le groupe d'agriculteurs semant un seul groupe de précocité que l'on trouve le plus d'agriculteurs ayant plus de 50 ans.
- Le lien entre le type d'OAS et le type de précocité ou le nombre de groupes de précocité n'est pas direct ; on peut cependant remarquer que les agriculteurs semant un seul groupe de précocité sont en majorité affilié au négoce.
- Les agriculteurs en CUMA pour le semis et/ou pour la récolte ne sèment pas plus de deux groupes de précocité dans leur sole. D'après les agriculteurs, le semis en CUMA se réalise par groupe de variétés pour l'ensemble des surfaces de maïs en CUMA avec un débit de chantier de l'ordre de 12ha par jour. On pourrait attribuer le choix de deux groupes de précocité à la gestion du risque par l'agriculteur que le semis soit réalisé trop tard pour le troisième groupe de précocité mais les agriculteurs n'ont pas confirmé cette hypothèse.
- Ceux dont l'objectif de rendement est le plus élevé (115-120 quintaux par hectare) sèment des variétés très tardives dans leur sole (« asso »=1).
- Trois agriculteurs ont mentionné la volonté d'étaler la récolte car ils possèdent leur propre séchoir dont la capacité de séchage est d'environ 10 ha de maïs par jour. Dans les faits, les trois agriculteurs sèment respectivement 1, 2, 3 groupes de précocités. Celui semant trois groupes de précocité n'a pas un chantier échelonné: il sème ses 120 ha le plus rapidement possible à un débit de chantier d'au moins 20 ha par jour; en 2003, il a semé en 4 jours consécutifs. Les deux autres échelonnent plus leur chantier de semis. L'étalement de la récolte peut donc résulter de deux stratégies: un semis regroupé de plusieurs groupes de précocité ou un semis étalé d'un ou deux groupes de précocité.

Enfin, l'analyse croisée de l'ensemble des informations ne permet pas de dégager d'autres éléments pouvant expliquer le nombre de groupes de précocité semés par un maïsiculteur.

#### V.3.4 Discussion-Conclusion

L'objectif de cet article était d'estimer les pratiques de semis et de choix de précocité des maïsiculteurs d'un vaste périmètre irrigué. Après avoir discuté des résultats sur les déterminants de la diversité des pratiques, nous présentons les enseignements que ces résultats permettent de tirer sur une méthodologie générique qui pourrait être mise en œuvre pour la prédiction des pratiques à l'échelle régionale.

##### **V.3.4.1 Bilan sur les éléments structurant la diversité des pratiques de semis et de choix de précocité**

###### *V.3.4.1.1 Impact du climat, des types de sol et de la topographie sur les pratiques*

L'analyse fréquentielle climatique a permis de valider l'existence d'un gradient climatique au sein de la zone et a montré que ce gradient, orienté nord-sud, implique un décalage d'apparition du premier jour disponible pour le semis entre le nord et le sud de la zone. Les démarrages des semis et les types de précocité semés au sein de la zone semblent liés à ce gradient. Le climat est donc un déterminant à prendre en compte pour leur estimation.

A l'échelle de la sole, les résultats ne permettent pas de conclure de manière tranchée sur l'aspect déterminant du sol sur le nombre de précocité. Il se dégage par contre une tendance en ce qui concerne la présence de la sole sur deux zones topographiques : la situation de la sole sur deux zones topographiques impliquerait le semis de plusieurs groupes de précocité. Les entretiens réalisés avec les agriculteurs ont montré que les maïsiculteurs associent des types de précocité à des associations {potentialité de la parcelle\* matériel d'irrigation}. Comme le matériel d'irrigation est dépendant de la situation topographique (pivot dans les parcelles de vallée, enrouleurs dans les coteaux), la localisation de la sole pourrait être un indicateur du nombre de groupe de précocité plus performant le type de sol. Par rapport aux dates de démarrage, la tendance selon le type de sol, inverse de celle supposée, pourrait être expliquée par les conditions météorologiques exceptionnelles de 2003 (Annexe 11). La non adéquation entre les démarrages de semis et l'emplacement de la sole peut être du au fait que les exploitations ayant leur sole de maïs grain uniquement en coteaux ne sont pas les exploitations pour lesquelles le maïs grain représente la culture la plus importante. Les semis peuvent être réalisés plus tard en raison de travaux concurrents et parce qu'ils ne sont pas la priorité dans l'exploitation.

A l'échelle de la parcelle, on observe que globalement, pour une date donnée, les parcelles en zone de coteaux ont été semées plus rapidement que celles situées en zone de vallée jusqu'à une période pluvieuse début mai. Ce résultat peut être expliqué par le fait que les parcelles en zone de coteaux se réchauffent plus vite que les parcelles en zone de vallée. Ce résultat n'est pas contradictoire avec celui obtenu à l'échelle de la sole : la présence d'une parcelle en zone de coteaux n'implique pas que toute la sole de maïs est située en zone de coteaux également. Par rapport aux distributions des types de précocité, les résultats montrent qu'en 2003, certaines associations « sol\*localisation topographique\*groupe de précocité » sont privilégiées. On retrouve une certaine cohérence avec l'expertise : les variétés à fort potentiel sont semées de manière privilégiée sur les parcelles à fort potentiel (sols profonds et fertiles). Toutefois, il est possible que cette relation soit spécifique aux données 2003, année où les semis ont été peu contraints.

Les tendances identifiées permettent de supposer que les associations {types de sol\*localisation} ont un impact sur les pratiques. Le type de sol n'apparaît pas comme un bon indicateur quand il est utilisé seul. Par contre, pour la prise en compte des associations comme déterminants permettant de prédire les pratiques, des études complémentaires permettant d'analyser les tendances identifiées pour différentes années climatiques seraient nécessaires. Des résultats sur l'impact du climat, des types de sol et de la topographie, nous retenons l'impact du climat sur les périodes de démarrages et sur la répartition des types de précocité des agriculteurs d'une même zone climatique.

#### V.3.4.1.2 Bilan sur les indicateurs des pratiques indépendants du climat

L'approche déductive a permis l'identification de stratégies de semis et de choix de précocité permettant de décrire les pratiques indépendamment du climat. Ces stratégies sont essentiellement définies par les variables décrivant l'organisation du chantier (nombre de jours de semis, nombre de sessions) et le nombre de groupes de précocité. Les autres variables (démarrage, types d'associations de précocité, ordre de semis et densité de semis) apparaissent beaucoup moins discriminantes. Parmi les données pouvant constituer des indicateurs de pratiques, seules des données décrivant simplement le système de production des exploitations sont apparues discriminantes de la diversité des stratégies. Il s'agit de la SAU, de la part de maïs de la SAU, de la part de surface irriguée dans la SAU et de la présence d'un atelier d'élevage.

Malgré son aspect non déterministe, la distribution des stratégies en fonction des données d'exploitation présente une certaine cohérence avec les pratiques identifiées dans l'étude précédente celle-ci (Maton et al, 2005b). Par exemple, les exploitations à dominante « cultures sèches » ont majoritairement une stratégie de semis « simple » c'est-à-dire un semis réalisé en un ou deux jours avec une seule précocité car dans ce type d'exploitation, le maïs grain représente peu de surface et n'est pas la production prioritaire. Les exploitations à dominante « maïs irrigué » sans élevage avec une SAU inférieure à 20 ha ou supérieure ou égale à 60 ha ont deux classes dominantes possibles : la stratégie b (33%) et la stratégie c (50%). Il avait été observé dans l'étude précédente que les exploitations ayant une faible SAU et donc une faible surface de maïs grain avaient soit un semis rapide soit un semis en plusieurs sessions avec des dates de semis pour chaque précocité prédéfinies échelonnées. Concernant les exploitations ayant une SAU supérieure ou égale à 60ha il avait été observé qu'elles sèment en général plusieurs types de précocité en plusieurs sessions. Ainsi, quand on considère globalement le cas des exploitations avec une SAU inférieure à 20 ha ou supérieure à 60ha, on retrouve la possibilité des deux stratégies.

La seconde approche a permis d'analyser sans a priori les déterminants de deux aspects majeurs des pratiques de semis et de choix de précocité : le débit de chantier et le nombre de précocité semé. Le type de semoir apparaît notamment déterminant du débit de chantier. Les choix de précocité, et en particulier le nombre de précocité, apparaissent liés à un ensemble d'éléments décrivant le contexte pédoclimatique de la sole de maïs ainsi que l'organisation du chantier de récolte. Cependant aucune donnée prise indépendamment d'une autre n'est déterminante du nombre de précocité. Enfin, plus généralement, les entretiens avec les agriculteurs montrent que les conditions matérielles et humaines pour le semis ainsi que les objectifs de production pour le maïs grain sont très diverses d'une exploitation à l'autre : certains ont leur propre matériel tandis que d'autres le partagent en CUMA ou font intervenir un entrepreneur. Même s'il est clair que cette diversité a un impact sur les pratiques de semis et de choix de précocité, il n'apparaît pas possible à partir de ces seuls entretiens de prédire la vitesse du chantier ou le nombre de précocité à partir de l'information concernant l'organisation humaine du chantier.

Enfin, l'ensemble de ces facteurs explicatifs de la diversité des pratiques de semis et de choix de précocité pourraient être des éléments d'explication de l'écart entre le nombre de jours de semis déclarés par les agriculteurs et le nombre de jours de semis calculé à partir des données utilisées dans SIMSEM, un modèle basé sur des règles d'organisation du travail similaires pour tous les agriculteurs (cf. Maton et al., 2005b). Ils pourraient être également des éléments d'explication de l'écart entre les dates de semis prédites par SIMSEM et les dates de semis observées en 2000 (Leenhardt et Lemaire, 2002b).

#### **V.3.4.2 Intérêt et limites des deux approches de recherche d'indicateurs indépendants du climat**

L'arbre de classification obtenu par la première approche permet d'estimer de manière probabiliste la classe de stratégie d'un agriculteur donné. Les variables mises en évidence par la méthode CART permettent d'affecter des distributions de probabilités d'avoir les stratégies a, b ou c aux différents agriculteurs (ou un pourcentage d'agriculteurs ayant la stratégie a, la stratégie b ou la stratégie c). Les probabilités ne permettent pas de passer à un arbre de détermination déterministe : une classe domine largement dans un seul cas (cas des exploitations à dominante « maïs irrigué », sans élevage et dont la SAU est comprise entre 20 et 60 ha) mais dans les cinq autres cas, il n'est pas possible d'identifier une classe tendanciellement dominante (cas des exploitations à dominante « maïs irrigué », avec un atelier d'élevage, plus de 40% de surface irriguée dans la SAU et une SAU comprise entre 20 et 60 ha).

L'intérêt de la première approche réside dans le fait que les variables décrivant les systèmes de production peuvent constituer des clefs de détermination car elles sont facilement accessibles à l'échelle régionale. Par contre, elles ne suffisent pas à expliquer les types de stratégies. On obtient donc des distributions de probabilité pour les trois stratégies ce qui laisse penser que les variables constituant la clef de détermination ne sont pas de véritables déterminants du type de stratégies de semis et de choix de précocité et que les exploitations ayant les mêmes clefs de détermination sont par ailleurs différentes pour d'autres caractéristiques.

La deuxième approche permet de faire émerger des facteurs explicatifs de cette diversité des pratiques de semis et de choix de précocité a sein d'une classe d'exploitation. Elle complète ainsi l'approche déductive. Elle permet d'identifier des liens fonctionnels entre les indicateurs et les pratiques à partir du discours des agriculteurs mais les liens fonctionnels pouvant varier d'un agriculteur à l'autre, il est souvent difficile d'identifier des règles. L'identification de déterminants à partir d'entretiens auprès d'un groupe d'agriculteurs présente également une limite importante pour l'estimation des pratiques à l'échelle régionale : les facteurs déterminants avancés par les agriculteurs ne sont généralement pas des données facilement accessibles à l'échelle régionale. Par exemple, pour la vitesse de chantier, seul le type de semoir permettrait de déterminer l'ordre de grandeur de cette vitesse de chantier. Or la variable le type de semoir n'est pas recensée par l'administration agricole dans le recensement général agricole (RGA) ou par les centres de gestion. Une enquête particulière devrait être organisée pour relever l'information ou l'estimer. Pour des données concernant ce qui relève de considérations personnelles de l'agriculteur, cela entraînerait des enquêtes qui sont souvent très coûteuses en temps. Ainsi, des résultats sur l'impact des contraintes d'exploitation, nous retenons les résultats obtenus à partir de l'approche « statistique ».

### V.3.4.3 Proposition d'une méthode

L'analyse précédente permet de proposer une méthode d'estimation des pratiques et de leur distribution spatiale basée d'une part sur l'analyse de l'impact du climat, des types de sol et de la topographie et d'autre part, sur l'analyse de l'impact de facteurs liés aux contraintes d'exploitation. L'estimation des pratiques peut procéder en deux parties : une partie permettant d'estimer ce qui relève de décisions tactiques de l'agriculteur, prises en fonction de la météorologie de l'année en cours et une partie permettant d'estimer ce qui relève plus de choix stratégiques et que nous avons formalisés sous forme de « stratégie ». Des analyses statistiques (arbres de classification) permettent d'identifier des indicateurs des stratégies parmi les données facilement accessibles à l'échelle régionale.

L'unité de support de cette méthode dépend du maillage des données servant d'indicateurs (communal, départemental, etc.). Dans notre cas, il est possible de procéder comme suit :

- (i) Pour estimer les dates de démarrage des semis, nous proposons d'estimer la date à partir de laquelle les semis sont possibles dans chaque zone rattachée à un point de grille. Les dates effectives de démarrage peuvent être calées selon le type de stratégies des agriculteurs, lui-même établi selon la procédure décrite en ii). Pour estimer les types de précocité, nous proposons de nous baser sur des distributions des groupes de précocité par zone climatique. Ces distributions varient chaque année, elles devraient être établies à partir de plusieurs années contrastées. Les données climatiques en point de grille sont disponibles auprès de METEO-France.
- (ii) Pour estimer les stratégies de semis et de choix de précocité, nous proposons d'utiliser l'arbre de classification établi à partir des données SAU, atelier d'élevage, surface de maïs grain, surface irriguée (Figure 46). Ces données font partie des données recensées dans le Recensement Général Agricole (RGA) ainsi que dans les déclarations PAC. Elles sont donc accessibles à l'échelle régionale mais elles ne sont pas toujours actualisées et sont généralement diffusées sous forme agrégée, la plus petite maille étant en général la commune. Les RGA sont réalisés environ tous les dix ans. Les deux derniers datent de 1988 et 2000. Les déclarations PAC ont quant à elles lieu chaque année mais contrairement au RGA, elles ne font cependant pas partie du domaine public. Toutefois, si leur utilité dans le cadre de travaux sur la gestion de l'environnement se vérifiait, elles pourraient peut-être être rendues disponibles.
- (iii) Une fois le nombre de groupes de précocité fixé en fonction de la stratégie, le type de précocité peut être tiré au sort dans la distribution des groupes de précocité correspondant à la zone climatique des agriculteurs. La densité peut être tirée au sort selon la stratégie.

Les données nécessaires pour la description des exploitations agricoles sont donc accessibles. Mais selon leur actualisation, la confidentialité des données et les simplifications qui sont parfois nécessaires, elles peuvent engendrer une erreur dont il faut tenir compte. Par exemple, certaines données doivent être approchées par des données enregistrées. C'est le cas dans notre exemple de la « surface irriguée » : les données du RGA portent sur la « surface irrigable » et la « surface qu'ils ont irriguée au moins une fois » l'année du recensement. La surface irrigable n'est pas systématiquement un bon indicateur de la surface irriguée car tous les agriculteurs n'irriguent pas toute leur surface irrigable. Nous proposons donc d'estimer la surface irriguée à partir de la surface irriguée au moins une fois.

#### V.3.4.4 Perspectives

Pour prédire des calendriers des modalités des pratiques à l'échelle régionale, la construction d'une représentation simplifiée des pratiques en séparant dans les variables décrivant les modalités ce qui varie d'une année à l'autre de ce qui varie moins apparaît comme une solution. Ce qui varie moins peut être considéré comme une « stratégie ». Dans notre cas d'étude, la typologie de stratégies de semis et de choix de précocité permet de formaliser les liens entre pratique de semis et choix de précocité. C'est une construction statistique qui permet a priori de représenter ce qui se passe mais qui n'est pas le reflet direct des représentations que se font les agriculteurs de leurs pratiques. Ainsi, il n'est pas possible d'identifier exactement les stratégies au sein d'un groupe d'agriculteurs. La validation ne peut donc se faire par un retour sur le terrain comme cela peut se faire dans les processus itératifs de construction de modèles (Antona et al., 2003). Seule la simulation des résultats obtenus ici avec un nouveau jeu de données ainsi que leur comparaison aux dates de semis et précocité semées observées pourra permettre de valider cette méthode. Pour son usage dans le cadre de travaux prospectifs, il faut garder à l'esprit le fait que les pratiques peuvent évoluer, que de nouvelles pratiques peuvent apparaître ou qu'une pratique déjà existante mais minoritaire peut devenir de plus en plus importante. De plus, des pratiques peuvent apparaître grâce à des processus collectifs indépendamment des contraintes spécifiques à chaque exploitation (Darré, 1985). Ainsi, si la méthode présente une certaine généralité, il n'en est pas de même pour les stratégies obtenues qui ne sont valables qu'à moyen terme.

Par rapport à d'autres travaux portant sur la détermination de la distribution spatiale des pratiques, celui-ci présente la particularité de porter sur la combinaison d'une intervention technique et d'un choix technique résultant de décisions très dépendantes du climat. On peut supposer par exemple que, comparativement, les stratégies d'entretien du sol sont peu influencées par le climat. Biarnès et al. (2004, 2005) ne prennent pas en compte ce facteur dans leur recherche de clefs de spatialisation des stratégies d'entretiens du sol au sein de petits bassins versants. En serait-il autrement sur une étendue plus vaste ?

Si les stratégies identifiées ont été élaborées afin d'être indépendantes des conditions météorologiques, on peut se demander s'il n'existe pas des conditions climatiques particulières une année donnée qui pourraient provoquer un changement de stratégie. Si c'était le cas, comme nous cherchons à localiser les stratégies puisque pour une stratégie donnée, les modalités dépendent des conditions météorologiques, les conditions météorologiques interviendraient à deux niveaux dans la représentation des pratiques à l'échelle régionale : ex ante, sur la détermination des stratégies, en temps réel, sur la détermination des modalités de pratiques.

Les travaux ayant cherché à utiliser le type de sol comme support de spatialisation des pratiques culturales n'ont pas abouti (Biarnès et al, 2004, Leenhardt et al, 2004a). Il apparaît donc difficile de relier les pratiques culturales au type de sol quand on dépasse l'échelle locale. Il est possible qu'au sein d'un type de sol issu de la nomenclature des pédologues, il existe une variabilité non négligeable en terme de fertilité à cause de l'histoire culturelle des parcelles (Hénin et al., 1969) et qu'ainsi, la nomenclature seule ne suffise pas. Les cartes de sol devraient peut être alors être complétées par des informations traduisant la façon dont les agriculteurs caractérisent leur sol (Ritz, 1989) ou des indices de fertilité récents. Nous avons vu que la topographie peut également être un indicateur important pour rendre compte de la fertilité du sol. Il est enfin possible que les agriculteurs ne raisonnent pas toujours toutes leurs pratiques en fonction du type de sol, c'est-à-dire que d'autres contraintes (organisationnelle par exemple) soient plus importantes ou qu'ils essayent de simplifier au maximum leur conduite.

Le travail effectué montre que la diversité des pratiques culturelles sur une vaste étendue est difficile à estimer de manière déterministe. Si la connaissance spatialisée des pratiques devient de plus en plus systématiquement nécessaire dans le cadre de diagnostics environnementaux à l'échelle de grands bassins (exemple : application de la directive cadre européenne sur l'eau) ou pour l'évaluation de politiques publiques, ce type de résultats est-il un inconvénient pour le diagnostic ou la décision publique ? Parallèlement, les approches qualitative, voire compréhensives, basée sur les entretiens auprès des agriculteurs, peuvent ils apporter des éléments de construction de futurs « observatoires des pratiques » (Benoît, 2005) en proposant des données à relever plus systématiquement qui permettraient de prédire les pratiques de façon déterministe ?

**Tableau 17: Données relevées pour expliquer la variabilité des débits de chantier**

débit du chantier	négoce (N) ou coopérative ©	PRA	SAU	Surface maïs grain	type 25	syst.	Objectif de rendement	atelier élevage	mo pour le chantier	Matériel propre	Matériel en CUMA	Entreprise	Semoir utilisé	vitesse du semis	Travail de nuit	contraintes évoquées spontanément par les agriculteurs	nombre de groupes de précocité	types de précocité
			(ha)	(ha)	%	%	(qx/hect)		(UTH)	non: 0 oui: 1			rangs	(ha/h)				
7	N	gas	21	14	67	19	90	canards	1	1	0	0	4	1	0	vitesse de ressuyage du sol	1	1/2P
8	N	gas	41	18	44	44	90	viande	1,25	1	0	0	4	0,45	0	éloignement des parcelles	1	P
9	N	gas	72	45	63	63	110	0	1,25	1	0	0	4	1	0	éloignement des parcelles, association précocité/localisation parcelle	2	T - 1/2T
9	N	ags	47	31	66	55	100	0	1	1	0	0	4	1	0	vitesse de ressuyage du sol	1	T
9	C	ags	45	15	33	27	105	lait et canards	1,5	1	0	0	4	1	0	battance et précocité	2	T - 1/2T
10	C	ags	70	38	54	63	100	canards	1,5	0	0	1	4	0,5	0	vitesse de ressuyage du sol	3	T - 1/2T - 1/2P
10	N	big	57	19	33	23	100	viande	1	1	0	0	4+rotative	0,45	0	gelées précoces	3	T - 1/2T - 1/2P
10	C	asg	150	30	20	60	110	viande	1,5	1	0	0	4	1	0	association précocité/localisation parcelle	3	T - 1/2T - 1/2P
10	C	asg	40	35	88	21	110	canards	1,5	1	0	0	4	0,45	0	précocité	2	tT - T
10	C	asy	50	30	60	94	100	lait et volailles	2	0	1	0	6	1	1	gelées précoces	2	T - 1/2T
10	N	asy	64	60	94	44	110	canards	1,5	0	1	0	6	1	0	disponibilité matériel, temps, vitesse ressuyage du sol	1	T
12	C	asg	55	24	44	100	100	canards	1	0	0	1	6	1	0	vitesse de ressuyage du sol	1	T
12	N	asy	55	30	55	55	110	lait	2	0	1	0	6 + rotative	0,45	1	association précocité/localisation parcelle	2	tT - 1/2T
15	N	asy	56	28	50	50	105	0	1	0	0	1	6 rangs	1	0	vitesse de ressuyage du sol	1	1/2T
15	N	asg	115	80	70	70	115	volailles	1,5	1	0	1	6 + rotative	0,45	1	éloignement des parcelles	1	tT
15	C	harm	73	60	82	82	120	canards	1	1	0	0	6	1	1	atelier concurrent	1	tT
16	C	asy	55	48	87	87	110	porcs	2	0	1	0	6	2	0	vitesse de ressuyage du sol	1	T
16	C	harm	155	80	52	81	100	viande	2	0	1	0	5+ rotative	1,5	0	vitesse de ressuyage du sol	1	1/2P
20	N	asy	85	70	82	82	120	viande	2	1	0	0	6	1,5	1	association précocité/localisation parcelle-type de sol	2	tT - T
20	C	asg	150	120	80	80	100	viande	2	1	0	0	6	1,5	1	association précocité/localisation parcelle-type de sol	3	T - 1/2T - 1/2P

**Tableau 18 : Données relevées pour expliquer la variabilité du nombre de groupes de précocité**

n bpre co	données sur l'exploitation						semis				récolte						
	OAS	PRA	rdt	elev	age	mais	nbjours	ha/jo ur	CUM A	asso	périod e	entre prise	propr e	location	CU MA	séc hoir	cribs
1	C	harm	100	V	52	80	5	16	1	4	2	0	0	1	0	0	0
1	N	asg	100	0	37	31	5	9	0	2	2	1	0	0	0	1	0
1	N	asg	115	C	42	80	10	15	0	1	2	1	0	0	0	0	0
1	N	asy	100	LC	57	60	7	10	1	2	2	0	0	0	1	0	0
1	C	asy	110	C	41	24	2	12	0	2	2	1	0	0	0	0	0
1	N	asy	105	0	54	28	3	15	0	3	1	1	0	0	0	0	0
1	C	asy	110	C	50	48	3	16	1	2	2	1	0	0	0	0	0
1	N	gas	90	C	45	14	2	7	0	4	2	0	0	0	1	0	0
1	N	gas	90	V	49	18	2	8,5	0	5	3	0	0	0	1	0	1
2	C	harm	120	C	50	60	4	15	0	1	2	0	1	0	0	1	0
2	C	asg	105	LC	64	15	2	9	0	2	1	0	0	0	1	0	0
2	C	asg	110	V	28	30	3	10	1	2	2	0	0	0	1	0	0
2	C	asg	100	C	32	35	7	12	0	1	2	1	0	0	0	0	0
2	N	asy	110	L	38	30	4	12	1	1	2	0	0	0	1	0	0
2	N	asy	120	V	35	70	7	20	0	1	3	1	0	0	0	0	1
2	N	gas	110	0	34	45	6	9	0	2	2	1	0	0	0	0	0
3	C	asg	100	C	40	38	8	10	0	2	3	1	0	0	0	0	0
3	N	asg	110	C	34	19	2	10	0	2	3	1	0	0	0	0	0
3	C	asg	100	V	38	120	5	20	0	2	2	0	1	0	0	1	0
3	C	big	100	V	43	30	4	10	0	2	2	1	0	0	0	0	0

## **V.4 Chapitre 4 : SIMITKO-MODERATO un modèle simulant les pratiques culturales des maïsiculteurs irrigants pour estimer la demande en eau d'irrigation à l'échelle régionale en fonction de scénarios**

Dans ce dernier chapitre, je présente le modèle d'estimation de la demande en eau à l'échelle régionale élaboré avec le double objectif de prendre en compte la distribution spatiale des pratiques et de fonctionner pour différents scénarios intégrant des modifications de climat et de structure des exploitations agricoles irrigantes. Je spécifie les attendus du modèle et les choix de modélisation qui en découlent dans une première partie. Dans la deuxième partie, après la présentation générale du modèle, chaque module et sous-module est présenté. Enfin, je présente l'évaluation du modèle.

### **V.4.1 Attendus du modèle**

#### **V.4.1.1 Une estimation de la demande en eau d'irrigation à l'échelle régionale**

Le modèle doit permettre de donner une estimation de la demande régionale en eau d'irrigation. L'échelle régionale implique de simplifier les processus à représenter. Nous avons choisi d'estimer la demande en eau d'irrigation régionale à partir de la demande en eau pour le maïs grain. Le maïs grain représente 50% des surfaces irriguées en France et jusqu'à 80% des surfaces irriguées (Agreste, 2002) dans les zones où s'expriment des conflits d'usage (Levy et al., 2005). Nous inspirant de Baudry et al. (1996), nous avons choisi de nous focaliser sur les pratiques culturales ayant un effet déterminant sur la demande en eau : le semis, le choix de précocité et de densité et l'irrigation.

#### **V.4.1.2 Une sensibilité aux événements climatique et au contexte socio-économique**

Le modèle doit être sensible aux événements climatiques et au contexte socioéconomique agricole. Nous supposons que le contexte socio-économique agricole peut être représenté par les choix stratégiques des irrigants, c'est-à-dire la surface de maïs grain irrigué, les matériels d'irrigation, les objectifs de production etc. (Leroy et al., 1996; Puech et al., 1997) et des données, autres que le climat, décrivant l'environnement des exploitations. A l'échelle régionale, la description des exploitations et de leur environnement dépend des données géoréférencées disponibles. Ainsi, les exploitations agricoles et leur environnement ne peuvent être décrits qu'à partir des données recensées dans les bases de données administratives régionales, des données facilement accessibles, ou des cartes couvrant la région avec des maillages plus ou moins lâches.

Dans l'objectif de simuler des scénarios, il doit permettre de prendre en compte les liens existant entre les interventions culturales représentées.

#### **V.4.1.3 Un modèle intégrant un modèle bio-décisionnel**

Il existe des modèles dynamiques biophysiques permettant d'estimer les besoins en eau des cultures ainsi que l'effet du stress hydrique sur la croissance de la plante et le rendement (Brisson et al., 1998; Jones et Kiniry, 1986; Stockle et al., 2003; Williams et al., 1989). Ces modèles, appelés modèles de culture, sont développés à l'échelle parcellaire. Ils tiennent compte du sol, du type de culture, du climat et des pratiques culturales (date de semis, variété, densité, fertilisation, irrigation). Ils peuvent être couplés à un modèle décisionnel composé de règles de décision représentant la pratique de l'irrigation et permettent alors d'estimer la demande en eau d'irrigation unitaire (Bergez et al., 2002a; Cabelguenne et al., 1997; Leroy et al., 1997). On parle de modèle bio-décisionnel.

Comme la demande régionale en eau d'irrigation est la somme des demandes en eau individuelles, l'estimation de la demande régionale en eau peut reposer sur l'agrégation des résultats des estimations d'un modèle bio-décisionnel appliqué au sein d'une étendue hétérogène. L'hétérogénéité se définit par l'existence de combinaisons {sol, climat, pratiques culturales} diverses. Le principe est alors de faire tourner le modèle autant de fois qu'il y a de combinaisons de données d'entrée. On parle alors de spatialisation des modèles de culture (Faivre et al., 2004). Si l'identification et la localisation des types de sol et du climat du territoire peut être réalisée à partir de cartes des sols et de données climatiques spatialisées, celle des pratiques culturales est plus délicate et nécessite des développements méthodologiques particuliers (Faivre et al., 2004).

Le modèle doit estimer la distribution spatiale des dates et des modalités des pratiques culturales (semis, précocité, densité) et des paramètres des règles de décision représentant la pratique d'irrigation pour permettre un couplage à un modèle de culture et l'estimation de la demande en eau par agrégation des résultats de simulation du modèle de culture. La surface semée permet d'estimer le volume demandé.

#### V.4.2 Choix de modélisation

Nous avons choisi d'utiliser un modèle bio-décisionnel préexistant pour la simulation de l'irrigation. Ce modèle, nommé MODERATO, permet d'estimer la demande en eau unitaire en fonction d'un climat, d'un sol, de données décrivant l'itinéraire technique telles que la date de semis, la variété, la densité et les paramètres de règles de décision concernant l'irrigation.

Des détails sur le modèle MODERATO peuvent être trouvés dans Bergez et al. (2001). Ce modèle est constitué d'un modèle de culture bien adapté au maïs et d'un modèle décisionnel représentant les règles de décision d'irrigation. Il fonctionne à l'échelle parcellaire et n'est pas spatialisé. Le modèle de culture est un modèle biophysique dynamique avec un développement de la plante basé sur des sommes de températures : chaque stade cultural est atteint après une certaine somme de températures calculée à partir du semis. Une description détaillée des équations du modèle biophysique est donnée dans Wallach et al. (2001). Le modèle décisionnel représente la pratique d'irrigation sous forme d'un ensemble de règles de décision. Chaque règle est décrite sous la forme « Si [indicateur] [opérateur] [seuil] alors [action] ». Les règles de décision sont au nombre de quatre: une règle de démarrage de l'irrigation, une règle de retour c'est-à-dire la gestion du temps entre deux tours d'eau, une règle d'arrêt de l'irrigation en cas de pluie et une règle d'arrêt final de l'irrigation. La structure du modèle décisionnel a été validée à partir d'une enquête auprès d'irrigants des coteaux de Gascogne et du Tarn. Elle a également été validée par des conseillers irrigation de chambres d'agriculture de la région Midi-Pyrénées (Bergez, 2003). Le modèle permet d'estimer des calendriers d'irrigation différents en fonction des données d'entrée. En appliquant cette représentation à une région où il existe une variabilité spatiale du climat et des autres données d'entrée, on peut obtenir des calendriers différents selon la position géographique des parcelles (Faivre et al., 2004)

Pour la simulation du semis et des choix de précocité, il a été choisi de développer un modèle empirique, basé sur des enquêtes permettant d'identifier les pratiques culturales des irrigants d'une région afin de donner une représentation la plus fidèle possible de la réalité. Ces enquêtes ont permis d'identifier des stratégies de pratiques présentant une variabilité non négligeable ((Maton et al., 2005b; Maton et al., 2005a)+ *Chapitre 3 des Résultats*). Pour la modélisation de ces pratiques, nous avons choisi d'adopter une représentation comparable à celle du modèle décisionnelle de MODERATO, basée sur des règles de type Si... Alors.... Afin de représenter la variabilité identifiée, nous avons choisi de développer un modèle

stochastique. Chaque simulation avec le modèle donnera une estimation différente de la demande en eau régionale suite à un tirage aléatoire des valeurs permettant de décrire les pratiques dans les distributions de probabilités identifiées à partir des enquêtes. Il sera ainsi possible d'estimer une distribution de la demande en eau.

### V.4.3 Matériel

#### V.4.3.1 **La zone d'étude**

Le modèle a été conçu à partir des données de la Baïse Amont, zone irriguée du sud-ouest de la France, dans les coteaux de Gascogne. Les caractéristiques de la zone peuvent être trouvées dans la partie IV.

#### V.4.3.2 **Les données sur les pratiques culturales utilisées pour la conception et la validation du modèle**

Le modèle a été construit et paramétré à partir de différents types de données : des données d'enquêtes, des données d'expertise et des données de recommandations des conseillers agricoles. Les données d'enquêtes sont des données issues d'enquêtes postales et d'enquêtes issues d'entretiens.

Les enquêtes postales ont été envoyées à l'ensemble des irrigants contractant avec la CACG dans la zone en 2000, 2001 et 2003 avec des taux de retour respectifs de 45%, 21%, 19%. Les questionnaires ont permis de répertorier les dates de semis du maïs de chaque agriculteur et, pour chaque date, la précocité de variété semée, la densité des semis, et la surface semée. Elles ont également permis de recueillir des informations sur les exploitations agricoles.

Trois groupes d'entretiens ont été utilisés :

1. des entretiens sur les pratiques d'irrigation dans deux zones de la région Midi-Pyrénées : la zone d'étude et la zone du « Tarn-Agout ». Ces enquêtes, agronomiques et socio-économiques ont été menées en 2001 auprès d'une cinquantaine d'irrigants. Elles ont permis d'identifier les stratégies d'irrigation des maïsiculteurs de ces zones et d'analyser les liens entre les stratégies et des données structurelles d'exploitation. Pour la zone de la Baïse, une seule stratégie d'irrigation a été identifiée (Maton et al., 2005).
2. des entretiens sur les pratiques de semis, de choix de précocité et d'irrigation ont été réalisés en 2004 auprès de 20 maïsiculteurs irrigants. Ils ont permis d'identifier les déterminants de la diversité des pratiques ainsi que les liens entre pratiques tels que formalisés par les agriculteurs.
3. des entretiens auprès de conseillers technico-économiques des organismes d'approvisionnement et de stockage (OAS) ont été menés en 2003 auprès de 5 coopératives présentes dans la zone et d'un négoce bien implanté dans la zone. Ces entretiens ont permis d'identifier l'influence que peuvent avoir les OAS sur les choix de précocité des variétés des maïsiculteurs et de recueillir les recommandations qu'ils font aux agriculteurs.

De plus amples informations sur les données peuvent être trouvées dans Maton et al. (2005a, 2005b et le *Chapitre 3 des Résultats*)

Pour l'évaluation du modèle, une enquête postale a spécifiquement été organisée en 2005 auprès de l'ensemble des irrigants de la zone de la Baïse contractant avec la CACG. Le taux de retour de l'enquête a été de 11%. Elle a permis de collecter les données nécessaires à

l'évaluation du modèle auprès de 47 agriculteurs. Ces 47 agriculteurs représentent 1450 ha de maïs grain soit 13% des surfaces de maïs grain de la zone de la Baïse d'après le RGA 2000. Nous disposons en outre d'une estimation de la demande en eau d'irrigation de 2005 (distribution temporelle du volume) pour la zone de la Baïse réalisée avec un modèle de gestion stratégique utilisé par la CACG (Trouvat et al., 2002) et d'une estimation des consommations estimée à partir des relevés de compteur sur la zone en 2005.

#### V.4.4 Structure globale du modèle

##### V.4.4.1 Les deux grandes parties du modèle

Le modèle général est composé de deux modules représentés dans la **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**

- Le module A, nommé SIMITKO, calcule les dates de semis du maïs, et pour chaque date, la précocité de la variété semée, la densité de semis et la surface semée pour chaque exploitation agricole ou exploitation-type «  $a$  » de la zone d'étude produisant du maïs grain irrigué. Ce module est basé sur l'enchaînement de quatre sous-modules (Figure 49). Le premier sous-module [M1] estime les jours disponibles pour le semis du maïs pour chaque point de grille. Les trois sous-modules suivant fonctionnent à l'échelle de l'exploitation. Le second sous-module [M2] estime la date de démarrage du semis. Le troisième sous-module [M3] estime la stratégie de choix de précocité et de mode de semis de l'agriculteur. Enfin, en fonction de la stratégie de choix de précocité et de semis de l'agriculteur et du calendrier de jours disponibles, le quatrième sous-module [M4] estime les autres dates de semis, et pour chaque date, la précocité, la densité et la surface de maïs. Pour chaque exploitation ou exploitation-type «  $a$  »,  $N$  quadruplets {date, précocité, densité, surface} sont estimés,  $q(a)$ .  $N$  est variable par exploitation et dépend du nombre de jours de semis, lui-même dépendant de la stratégie de pratique estimée par [M3].

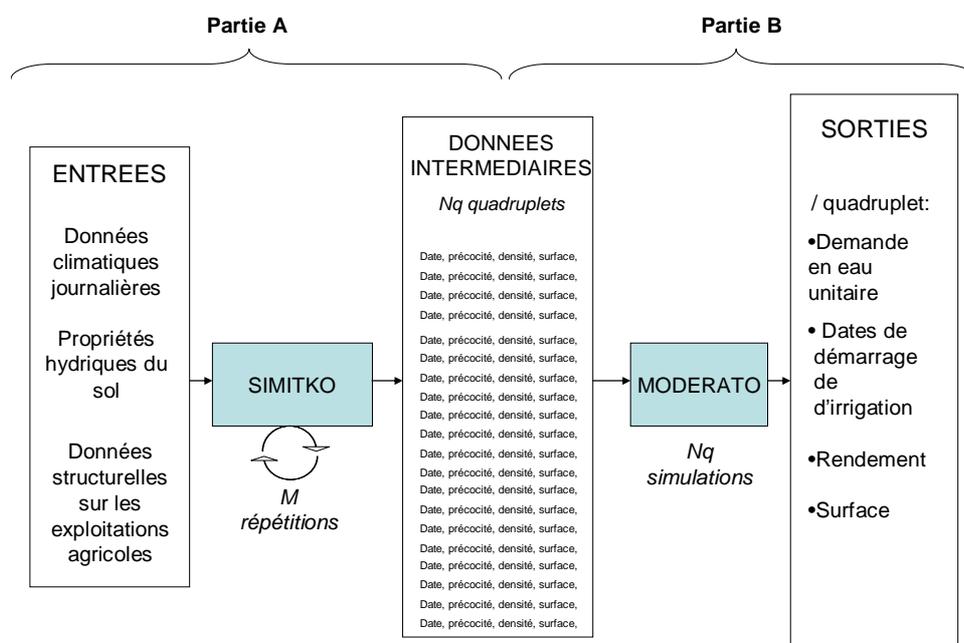


Figure 48 : Représentation schématique des deux parties du modèle

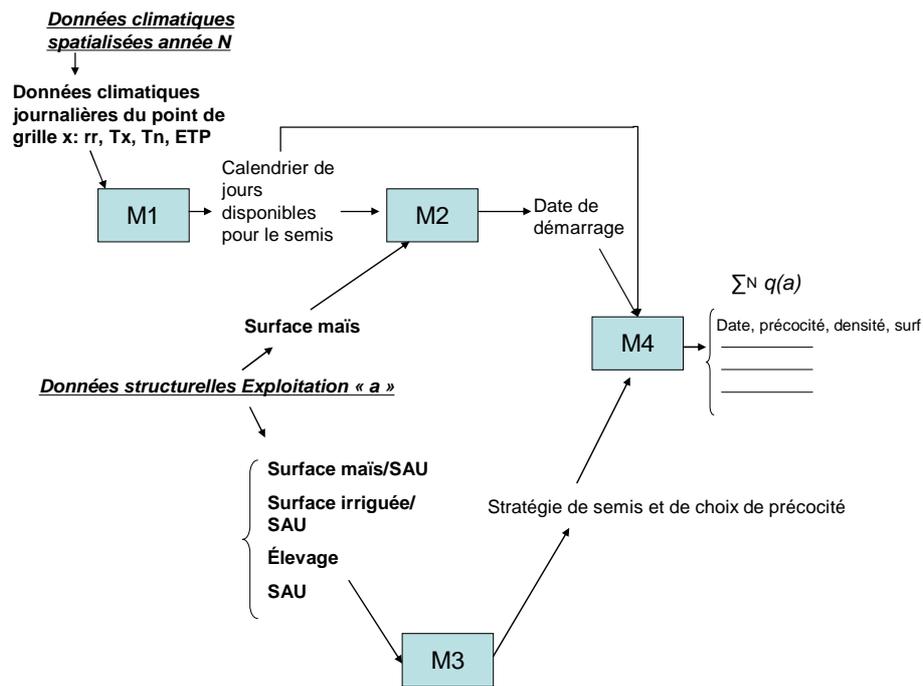


Figure 49 : Présentation de l'enchaînement des modules M1, M2, M3 et M4 dans SIMITKO pour un agriculteur ou exploitation-type « a » et une répétition.

Pour chaque exploitation-type « a » de la zone, les modules M2, M3 et M4 sont répétés  $M$  fois,  $M$  permettant de représenter la distribution des résultats liés au tirage aléatoire des différentes variables. Pour chaque exploitation type, on obtient  $\sum_{j=1}^M \sum_{i=1}^N q_{i,j}(a)$  quadruplets.

Sur l'ensemble de la zone, considérant  $P$  agriculteurs, on obtient  $\sum_{k=1}^P \sum_{j=1}^M \sum_{i=1}^N q_{i,j}(k) = N_q$  quadruplets.

Le fichier de sortie de SIMITKO donne, pour chaque quadruplet, l'identité de l'agriculteur, sa commune, sa PRA, le point de grille météorologique utilisé pour la simulation et des sorties intermédiaires utilisées pour l'estimation des quadruplets telles que la stratégie de choix de précocité et de semis estimée par le module M3.

- Le module B utilise le modèle bio-décisionnel MODERATO (Bergez et al., 2001). Une simulation de MODERATO permet le calcul des quantités d'eau consommées pour un quadruplet d'un agriculteur pour une répétition de SIMITKO. Pour estimer la distribution sur la région, il faut donc faire simuler MODERATO sur tous les quadruplets pour tous les agriculteurs et pour toutes les répétitions de SIMITKO soit  $N_q$  fois.

## V.4.5 Les variables d'entrée et de sortie du modèle

### V.4.5.1.1 *Les données d'entrée du modèle*

Trois groupes de données d'entrées sont nécessaires :

- Des données météorologiques journalières relatives à la pluviométrie, l'évapotranspiration potentielle, aux températures minimales et maximales et au rayonnement global.
- Des propriétés hydriques des sols : capacité au champ, point de flétrissement, profondeur.
- Des variables décrivant les exploitations agricoles : la surface agricole utile (SAU), la surface irriguée (SI), la surface de maïs grain (maïs) et la présence d'un atelier d'élevage ou non (oui/non).

Pour la zone d'étude, on dispose de données météorologiques en point de grille d'un maillage de 12.5 km \*12.5 km, disponibles de 2000 à 2005. Ces données, résultats d'extrapolation des données des stations météorologiques proches ou à l'intérieur de la zone permettent de simuler la variabilité climatique existant au sein de la zone. Sept points de grille recouvrant la zone ont été utilisés pour les simulations : 24, 25, 26, 27, 37 et 38 (Figure 1). Les propriétés hydriques des sols de type terrefort et boubène sont définies par expertise. Concernant les variables décrivant les exploitations agricoles, deux sources d'information ont été utilisées pour ces données : (a) le recensement général agricole de 2000 qui permet d'obtenir des caractéristiques structurelles des exploitations pour chaque agriculteur des 50 communes composant la zone d'étude. Il permet ainsi l'exhaustivité. (b) les données d'enquêtes postales de 2005 qui recensent les variables décrivant les exploitations agricoles de 47 maïsiculteurs de la zone.

### V.4.5.1.2 *Les données de sortie*

Les sorties du modèle sont données pour chaque quadruplet {date, précocité, densité, surface} et sont: la quantité d'eau unitaire demandée pendant chaque décade du 1er juin au 31 septembre, la date de démarrage de l'irrigation et le rendement. Multipliées par les surfaces correspondantes, les quantités d'eau unitaires permettent d'obtenir le volume consommé à chaque décade pour chaque quadruplet. Pour chaque répétition de SIMITKO, en sommant les volumes d'eau de chaque quadruplet, pour chaque décade, on accède à la dynamique temporelle de demande en eau de l'ensemble de la zone d'étude au pas de temps décadaire ainsi qu'au volume total consommé pour l'ensemble de la zone d'étude ou pour des espaces plus restreints (PRA et communes).

Les quadruplets de l'ensemble des agriculteurs sont répertoriés dans le fichier de sortie. Pour chaque quadruplet, un identifiant pour l'agriculteur, sa commune, sa PRA, le point de grille météorologique, et la stratégie de semis et de choix de précocité sont précisés.

## V.4.6 Estimation des quadruplets {date, précocité, densité, surface} pour la zone irriguée

Dans cette partie, nous décrivons les 4 sous-modules de SIMITKO.

Pour présenter le premier sous-module [M1], nous présentons les bases conceptuelles, l'algorithme et la paramétrisation de l'algorithme pour la zone d'étude. Pour les sous-modules [M2], [M3] et [M4], nous présentons les données et la démarche de développement du sous-

module et l'algorithme. En effet, la conception de ces trois sous-modules s'appuie principalement sur nos données de terrain ce qui fait que le développement et la paramétrisation ont été réalisés en même temps. De nombreux éléments de ces développements et paramétrisations sont présentés dans Maton et al. (2005a, 2005b et *Chapitre 3 des Résultats*)

#### V.4.6.1.1 Détermination des jours disponibles pour le semis du maïs [M1]

L'objectif de ce sous-module est d'estimer les jours (dates) où il est agronomiquement possible de semer, c'est-à-dire quand la température du sol atteint un seuil permettant la germination de la graine et quand le sol est suffisamment portant pour que l'agriculteur puisse entrer dans sa parcelle (Papy et Servettaz, 1986). Afin de prendre en compte la variabilité spatiale liée au climat de la zone, les simulations sont faites pour chaque point de la grille météorologique couvrant la zone d'étude.

##### ➤ Les bases conceptuelles

Ce sous-module de détermination des jours disponibles pour le semis du maïs est basé sur la définition des « jours disponibles » donnée par Reboul (1965). Papy et Servettaz (1986) ont utilisé ce concept pour développer un modèle de détermination des jours disponibles basé sur des indicateurs climatiques (pluie et évapotranspiration potentielle) et un seuil spécifique à leur sol d'étude. Dans notre sous-module, nous utilisons un critère de portance basé l'état hydrique du sol en surface, comme sur le principe de ce qui a été fait dans SIMSEM (Leenhardt et Lemaire, 2002). Nous utilisons également les connaissances physiologiques à propos de l'impact de la température sur le développement du maïs (Girardin, 1998).

##### ➤ Les algorithmes

Le sous-module est constitué de trois algorithmes : un premier algorithme détermine une date  $D$  correspondant à la date avant laquelle les agriculteurs n'envisagent jamais de semer du fait d'un risque de gel trop élevé. Un deuxième algorithme permet d'estimer les jours où la température est adéquate pour le semis et un troisième algorithme permet d'estimer les jours où le sol est portant ou non.

- Le premier algorithme permet la détermination de la date  $D$  pour chaque point de grille.

Pour déterminer la date  $D$ , une série climatique a été utilisée. Pour chaque année climatique, on calcule la date à partir de laquelle il n'y a plus de gel. La température moyenne journalière de l'air  $T_m(j)$  est comparée à une valeur seuil  $T_{frost}$ . On se sert d'une variable booléenne que l'on nommera « contrainte » de gel prenant la valeur 0 tant que la condition recherchée n'est pas atteinte et 1 sinon. Si la température moyenne est inférieure au seuil, la contrainte de gel  $C_{frost}$  est maintenue ( $C_{frost}=0$ ), sinon elle est levée ( $C_{frost}=1$ ).

L'algorithme utilisé est le suivant :

IF  $T_m(j) > T_{frost}$  THEN  $C_{frost} = 1$ , ELSE  $C_{frost} = 0$ .

$D$  correspond à la date où la contrainte de gel est définitivement levée 8 années sur 10.

- Le deuxième algorithme détermine les jours ( $j$ ) où la température moyenne ( $T_m$ ) sur les  $k$  jours précédents est supérieure à un certain seuil  $T_{temp}$ . La température moyenne ( $T_m$ ) est la moyenne de la température maximale ( $T_x$ ) et de la température minimale ( $T_n$ ) de l'air.

IF  $1/k [\sum_{i=k}^j T_m(i)] > T_{temp}$ , THEN  $C_{temp}(j)=1$  ELSE  $C_{temp}(j)=0$

avec  $T_m(i) = 0.5 (T_x(i) + T_n(i))$

Si  $C_{temp} = 1$ , la contrainte est levée, si  $C_{temp} = 0$ , la contrainte est toujours présente.

Cet algorithme fournit en sortie un calendrier des jours où la condition de température est levée. On obtient ainsi le 1<sup>er</sup> jour où le seuil de température est atteint ainsi que le jour à partir duquel la température demeure adéquate jusqu'à la fin de la saison. En effet, certaines années des conditions froides peuvent survenir tardivement et retarder la levée si les semis ont eu lieu avant.

- Le troisième algorithme permet de déterminer si le sol est portant ou non. La portance du sol dépend de la quantité d'eau dans le sol. Cet algorithme calcule un bilan hydrique journalier permettant d'estimer la quantité d'eau disponible dans le sol (en cm) ( $SWC(j)$ ) et de la comparer à la quantité d'eau disponible maximale dans le sol  $SWC_x$ . Le rapport « eau disponible / eau disponible maximale » ( $SWC(j)/SWC_x$ ) est calculé chaque jour. S'il est inférieur à un seuil  $Q_{water}$ , alors, la contrainte de portance est levée et  $C_{water}(j)$  prend la valeur 1. Sinon, la contrainte est maintenue et  $C_{water}(j)$  prend la valeur 0.

IF ( $SWC(j)/SWC_x$ ) <  $Q_{water}$ , THEN  $C_{water}(j) = 1$  ELSE  $C_{water}(j) = 0$ .

Un modèle très simple de bilan hydrique de type mono réservoir à une couche de 10 cm est utilisé. La quantité d'eau du sol est calculée en fonction de la teneur en eau du sol du jour précédent, de l'évaporation (le sol est nu), de la pluviométrie et du drainage. La teneur en eau du sol au 1<sup>er</sup> janvier est fixée à la capacité au champ.

Cet algorithme fournit un calendrier des jours où la condition de portance  $C_{water}$  est remplie.

La combinaison de ces trois algorithmes permet de déterminer les jours disponibles : les jours où l'ensemble des contraintes sont remplies à partir de la date  $D$  sont considérés comme disponibles.  $Cavail(j) = C_{water}(j) * C_{temp}(j)$  est une variable booléenne prenant la valeur 1 si le jour est disponible, 0 sinon. Un calendrier de jours disponibles est ainsi estimé pour chaque série climatique.

#### ➤ La paramétrisation du sous-module

- La condition de gel et la date  $D$

Pour calibrer  $T_{frost}$ , nous avons utilisé des données d'expertise (Lorgeou et Souverain, 2003). Nous basant sur le seuil utilisé dans l'atlas agroclimatique du maïs,  $T_{frost}$  a été fixé à  $-2^{\circ}C$ .

L'analyse fréquentielle climatique a été réalisée sur une série climatique de 39 ans pour les stations d'Auch, Castelnau et Masseube et a permis d'estimer la date  $D$  obtenue 8 années sur 10 et de la comparer aux dates de démarrage habituelles des semis sur la zone d'étude. Les résultats montrent que le critère de gel ( $C_{frost}$ ) conduit 8 années sur 10 à une date  $D$  égale au 29 mars (jour julien 88 ou 89); cette date est cohérente avec les observations de terrain concernant les dates effectives de semis: d'après les données d'enquête postale, les dates minimales de semis se situent entre fin mars et début avril. Cette date correspond par ailleurs à l'atteinte définitive par  $C_{temp}$ , 7 années sur 10, du seuil de température ( $T_{temp}$ ) au cours de la campagne.

- La condition de température

Pour calibrer les paramètres de la condition de température, nous nous basons sur des données d'expertise et les dates minimales de semis observées dans chaque zone climatique. Pour le paramètre  $k$ , c'est-à-dire le nombre de jours de calcul de la moyenne mobile de la température moyenne, on suppose que l'agriculteur tient compte des températures de la semaine passée (Bernard Lacroix, comm pers).  $k$  a donc été fixé à 7. L'agriculteur tient

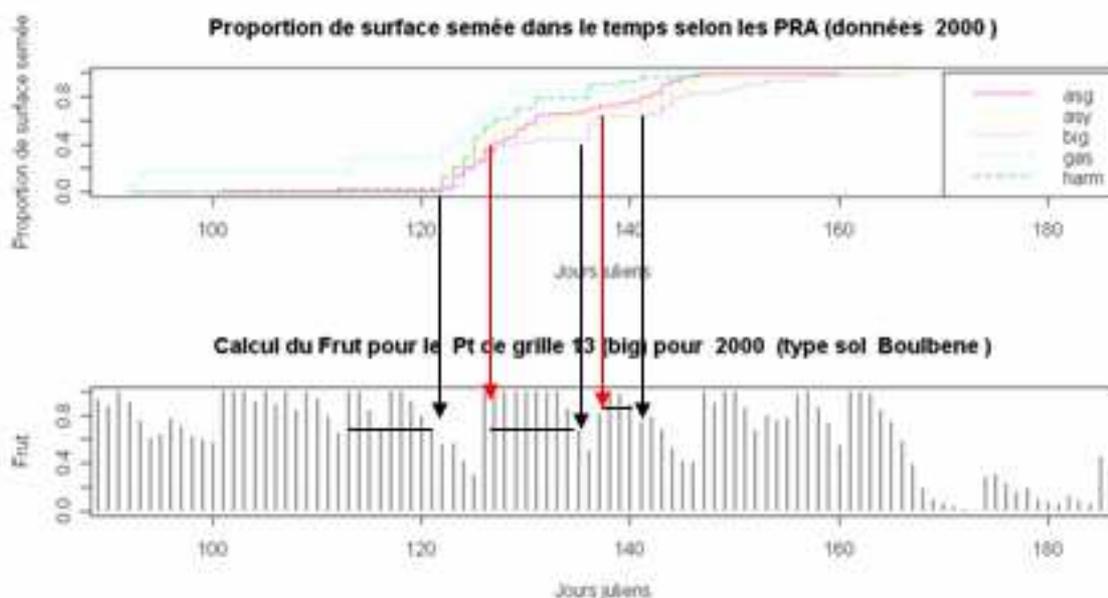
compte de la semaine qui vient de s'écouler ou des trois jours précédents et des trois jours suivant grâce aux prévisions météorologiques (Bernard Lacroix , comm pers). La moyenne mobile sur les 7 jours précédents le jour j (jour j inclus) et la moyenne mobile sur 7 jours avec 3 jours avant et 3 jours après le jour j sur une série climatique de 39 ans ont été calculés. Les résultats montrent des dates identiques à 1 jour près. La moyenne mobile sur les 7 jours précédents le jour j a donc été choisie. Pour le seuil de température  $T_{temp}$ , le critère de calage est la minimisation de l'écart entre le premier jour de semis observé dans la zone climatique concernée et le jour estimé à partir duquel le seuil de température est toujours adéquat. On vérifie également que le jour estimé est bien antérieur au jour observé. Comme nous disposons de données spatialisées, nous avons recherché un seuil convenable pour le maximum de zones climatiques. Après avoir testé plusieurs seuils,  $T_{temp}$  a été fixé à 7°C.

- La condition de portance

Pour déterminer le seuil  $Q_{water}$ , nous nous sommes basés sur les dates de semis observées en 2000 et 2003 au sein de la zone d'étude, dans chaque PRA, sur chaque type de sol (boulbène ou terrefort). Nous supposons que les agriculteurs sont des « experts » pour identifier les jours disponibles pour le semis. Ainsi, nous considérons que les dates de semis de la centaine d'agriculteurs enquêtés chaque année sont des indicateurs des jours disponibles pendant la période des semis qui compte généralement environ 70 jours (de fin mars à début juin). Le calage concerne l'ensemble de la période de semis. Nous basant sur le paramétrage du modèle SIMSEM (Leenhardt et Lemaire, 2002b), nous avons émis l'hypothèse qu'il peut y avoir une dégradation du seuil de portance avec le temps, les agriculteurs acceptant de semer dans de moins bonnes conditions à la fin de la période de semis afin de terminer à temps. On a donc recherché deux seuils  $Q_{water1}$  et  $Q_{water2}$  et le jour julien déterminant les deux périodes.

L'état hydrique de la couche de surface du sol a été simulé avec les données météorologiques 2000 en point de grille pour les deux types de sol. Pour chaque cas, nous avons identifié les valeurs de  $SWC(j)/SWC_x$  correspondant (i) aux dates où les semis commencent ou recommencent après un arrêt (flèches noires sur la Figure 49) et (ii) aux dates où les semis ralentissent ou s'arrêtent (flèches rouges sur la Figure 49). Les dates de semis de l'année 2000 ont permis de proposer des valeurs seuil tandis que les dates de semis de 2003 ont permis la validation de ces propositions.

Après analyse des différences entre PRA, les seuils  $Q_{water1}$  et  $Q_{water2}$  ont été fixés pour l'ensemble des PRA à des valeurs identiques pour les deux types de sol:  $Q_{water1}=0.6$  jusqu'au jour julien 125 puis  $Q_{water2}=0.8$  à partir du jour julien 126.



**Figure 50: Mise en correspondance des dates de semis et de SWC(j)/SWCx pour un sol et une année donnée dans une PRA**

Il a été choisi de simuler le bilan hydrique pour un seul type de sol pour l'ensemble de la zone : les terreforts. Il est difficile de déterminer une valeur de  $Q_{water}$  pour l'arrêt des semis sur bouldène dont le comportement hydrique semble être moins bien représenté que celui des terreforts (les semis sur sols bouldène ne s'arrêtent pas alors que le  $SWC(j)/SWC_x$  dépasse 0.8 (Figure 50)). Enfin, des travaux d'analyse des pratiques de semis des maïsiculteurs de la zone n'ont pas permis de mettre en évidence des différences de dates de semis en fonction des types de sol (Maton et al., 2005b et *chapitre 3 des résultats*).

#### V.4.6.1.2 Détermination du premier jour de semis de chaque agriculteur [M2]

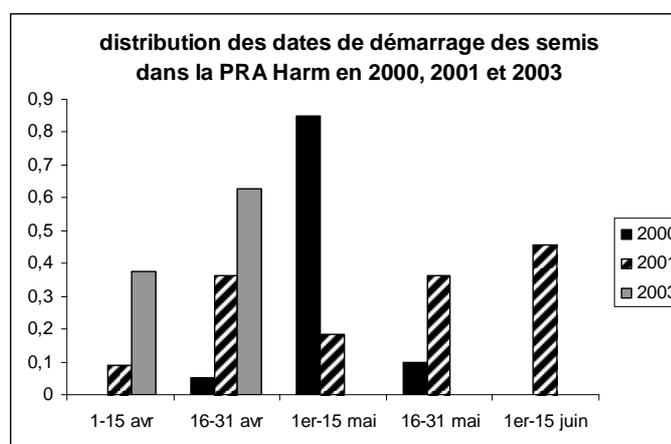
L'objectif de ce sous-module est d'estimer la date de démarrage du semis de chaque agriculteur en tenant compte des jours disponibles et de son système de production.

##### ➤ Le développement du modèle : données et démarche

Des travaux précédents ont montré, qu'une année donnée, au sein de la zone, les démarrages de semis sont échelonnés en raison de la variabilité spatiale du climat qui provoque l'apparition échelonnée des jours disponibles pour le semis du nord au sud (Maton et al., 2005b et *chapitre 3 des résultats*). Le calendrier de jours disponibles conditionne la période de démarrage des semis dans chaque zone climatique par l'apparition du premier jour disponible. Ces travaux ont également montré que, bien que le type de sol détermine théoriquement le démarrage des semis du fait d'un temps de réchauffement et de travail du sol préalable plus ou moins long, aucune différence significative de période de démarrage du semis entre les deux types de sol n'a pu être observée au sein des zones climatiques étudiées.

La représentation du pourcentage d'agriculteurs ayant démarré dans chaque quinzaine pour une zone climatique donnée montre que pour un même calendrier de jours disponibles, tous les agriculteurs d'une même zone climatique ne commencent cependant pas leur semis à la même date (Figure 51). On observe donc une distribution des dates de démarrage au cours de la période de semis. Ces distributions varient d'une année à l'autre. En accord avec Cerf et al., (1998) qui a montré que les agriculteurs ont les mêmes critères pour décider du premier jour

où une opération culturale est possible, nous considérons que la variabilité des dates de démarrage du semis, une année donnée, dans une zone couverte par un même point de grille, est due à des objectifs et des contraintes différentes entre exploitations plutôt qu'à des critères différents de détermination du premier jour possible pour le semis.



**Figure 51: Distribution des dates de démarrage par quinzaine pour la PRA HARM en 2000, 2001 et 2003**

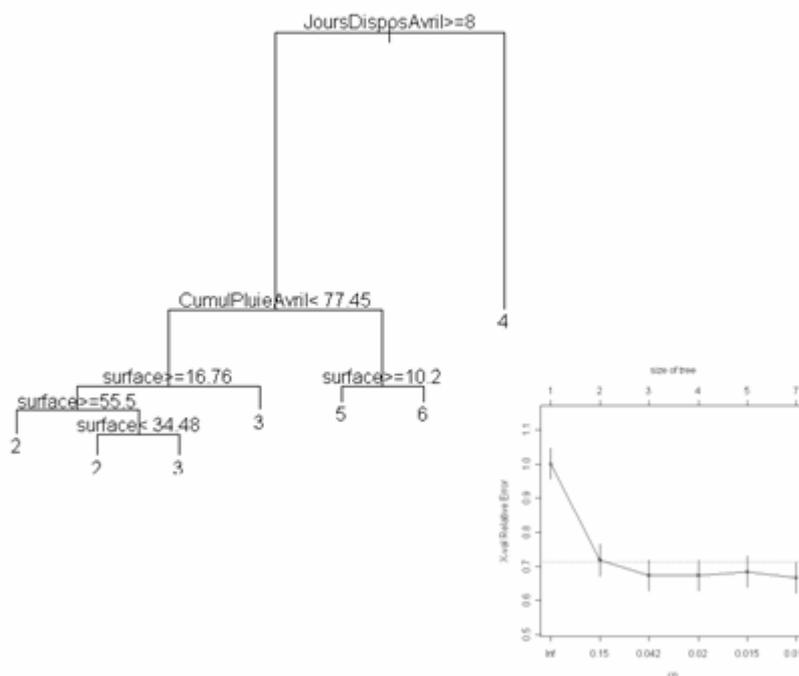
Une analyse basée sur un arbre de classification (Breiman et al., 1984) a été réalisée à partir des données postales des trois années dans le but d'identifier des règles de prédiction des dates de démarrages (en groupes de 10 jours juliens tel que 1 : <100, 2 : 100-110, 3 : 110-120, 4 : 120-130, 5 : 130-140, 6 : 140-150, 7 : 150 et +) parmi les variables suivantes : des variables climatiques, la localisation dans la zone (PRA), le type d'exploitation (PE/GC), le type de sol dans la sole de maïs grain (boulbène/terrefort/mélange) et la surface de maïs grain (ha). Les variables climatiques sont présentées dans le Tableau 19.

**Tableau 19 : Présentation des variables climatiques**

Variabes décrivant le climat	Explication de la variable et du codage quand il y a lieu
nbTravailSolMars	nombre de jours où le critère de portance est levé en mars (a : 0-4, b : 5-8, c : 9-13, d : 13 et +)
JoursDisposAvril JoursDisposMai	nombre de jours disponibles pour avril et mai (codage pour chaque : a : 0-10, b : 11-15, c : 15-20, d : 20 et +)
CumulPluieMars	cumul de la pluie pour le mois de mars
CumulPluieAvril	cumul de la pluie pour le mois d'avril
CumulPluieMai	cumul de la pluie pour le mois de mai

Le nombre de jours disponibles en avril et le cumul des pluies en avril sont les variables les plus discriminantes des périodes de démarrage, suivies ensuite de la surface de maïs grain dans le cas où le nombre de jours disponibles en avril est supérieur ou égal à 8 (Figure 52). L'arbre étant prédictif pour 3 nœuds, seul le nombre de jours disponibles en avril et le cumul des pluies en avril apparaissent comme des variables prédictives. Les différences liées à la surface n'apparaissent que les années où le nombre de jours disponibles en avril est supérieur à 8 (2001 et 2003). Dans le cas contraire, comme les semis sont alors retardés, on peut supposer que les agriculteurs sèment en grande majorité dès que possible quelle que soit leur surface à semer.

L'analyse des seuils de cet arbre de décision a révélé que leurs valeurs (8 jours disponibles en avril et 77.5mm de pluviométrie en avril) sont des valeurs directement liées au climat des trois années étudiées et que ces valeurs provoquaient un regroupement des situations pouvant engendrer des dynamiques différentes. Nous avons donc supposé que cet arbre ne permettrait pas la détermination des distributions de démarrage des agriculteurs pour une nouvelle année climatique, notamment dans des conditions de changement climatique. Par contre, les résultats établis à partir de cet arbre de classification ont orienté notre démarche vers la recherche de règles de détermination des distributions de dates de démarrage (i) en fonction de la surface de maïs grain à semer et (ii) en fonction du nombre de jours disponibles pendant la période de semis chaque année.



**Figure 52: Arbre de classification des groupes de jours juliens correspondant aux dates de démarrage et résultat de la validation croisée**

- Recherche de règles de détermination des distributions de dates de démarrage (i) en fonction de la surface de maïs grain à semer

Un arbre de classification a été réalisé à partir des données de 2001 et 2003. Il permet de conclure que plus la surface de maïs est importante, plus les agriculteurs commencent leur semis dès les premiers jours disponibles : 65% des agriculteurs ayant une surface supérieure ou égale à 60 ha démarrent le semis dès la première quinzaine d'avril tandis que 65% des agriculteurs ayant une surface inférieure à 60 ha commencent pendant la deuxième quinzaine d'avril. Il a été décidé de fixer la distribution pour les agriculteurs dont la surface de maïs grain est supérieure ou égale à 60ha : 65% sèment dans la première quinzaine où le nombre de jours disponibles est supérieur à 1, 35% à la quinzaine suivante selon la même condition concernant le nombre de jours disponibles. Pour les autres, il a été décidé de déterminer la distribution en fonction du nombre de jours disponibles dans chaque quinzaine.

- Détermination de règles de prédiction des distributions de dates de démarrage pour les agriculteurs ayant moins de 60 ha de maïs grain en fonction du nombre de jours disponibles

Seuls les agriculteurs ayant moins de 60 ha de surface de maïs ont été inclus dans l'analyse. Les distributions de leurs dates de démarrage pour les trois années dans chaque zone climatique ont été utilisées comme distributions de référence pour élaborer les règles de prédictions des distributions. Le Tableau 20 présente pour chaque année, le nombre de jours disponibles et les probabilités cumulées de semer dans chaque quinzaine pour la PRA HARM. A partir de ce même type de données pour l'ensemble des PRA, nous avons identifié la majorité des configurations de jours disponibles possibles et nous en avons déduit les règles présentées dans Tableau 3. Pour les configurations absentes des données observées, nous nous sommes basés sur ce que traduisent les données observées : les agriculteurs préfèrent démarrer à une période où ils ont moins de risque de devoir arrêter leur chantier de semis avant de l'avoir terminé pour cause de période pluvieuse (ils cherchent ainsi à minimiser les contraintes qu'imposeraient des arrêts en cas de pluie) mais si les semis n'ont pas pu démarrer pour la majorité avant le 1<sup>er</sup> mai, la probabilité de démarrer pendant cette quinzaine là est comprise entre 0.6 et 1 suivant le nombre de jours disponibles pendant les quinzaines précédentes.

**Tableau 20: Nombre de jours disponibles et probabilités cumulées de semer dans chaque quinzaine pour la PRA HARM**

		1-15 avril	16-30 avril	1-15 mai	16-31 mai	1-15 juin
<b>2000</b>	Nombre de jours disponibles	0	1	>=8	>=8	>=8
	Probabilité cumulée	0	0.015	0.9	1	1
<b>2001</b>	Nombre de jours disponibles	2-7	2-7	2-7	2-7	>=8
	Probabilité cumulée	0.15	0.45	0.6	0.75	1
<b>2003</b>	Nombre de jours disponibles	>=8	>=8	>=8	>=8	>=8
	Probabilité cumulée	0.3	0.9	1	1	1

Notons que ce modèle ne prend pas en compte explicitement les déterminants potentiels de l'étalement des démarrages de semis tels que la concurrence entre travaux (exemple : travaux d'épandage de produits phytosanitaires sur les céréales et d'ensilage sur prairie), l'appartenance à une CUMA, l'intervention d'un entrepreneur ou le partage du matériel avec un voisin ainsi qu'un effet de voisinage. Ces phénomènes n'ont pas pu être mis en évidence statistiquement.

➤ **L'algorithme**

Les entrées de ce sous-module sont : la commune, la PRA et la surface en maïs de chaque agriculteur, le calendrier de jours disponibles de la zone climatique correspondant à chaque point de grille.

Chaque agriculteur est affecté à un point de grille en fonction de la commune du siège de l'exploitation. Le nombre  $N(Q_i)$  de jours disponibles dans chaque quinzaine de jours  $Q_i$  du 29 mars au 31 mai est ensuite calculé ( $i \in [1,4]$ ). Les agriculteurs dont la surface en maïs grain est supérieure ou égale à 60 ha démarrent les semis dès la première quinzaine où le nombre de jours disponibles. Le jour julien de démarrage est tiré aléatoirement parmi ceux disponibles dans la quinzaine. Pour les autres agriculteurs, le sous-module permet de déterminer la distribution des probabilités  $P(Q_i)$  de démarrage de semis dans chaque quinzaine de jours  $Q_i$  en fonction du nombre de jours disponibles  $N(Q_i)$  estimés. Les calculs sont présentés dans le Tableau 21. Une fois la distribution de probabilités connue, la quinzaine où chaque agriculteur sème est déterminée par tirage aléatoire selon cette même loi de probabilité. Un deuxième tirage aléatoire a lieu pour déterminer le jour de démarrage de semis parmi les jours disponibles de la quinzaine tirée.

**Tableau 21: Détermination des probabilités  $P(Q_i)$  en fonction du nombre de jours disponibles  $N(Q_i)$  dans la quinzaine  $Q_i$**

$N(Q_i)$	$P(Q_i)$		$Q_3$		$Q_4$	
	Valeur de $P(Q_1)$	Condition Valeur de $P(Q_2)$	Condition Valeur de $P(Q_3)$	Valeur de	Condition	Valeur de $P(Q_4)$
0	0	0		0		0
1	0.01 5	0.015		0.015	si $1 - \sum_{i=1}^3 P(Q_i) > 0.03$  sinon	0.03  $1 - \sum_{i=1}^3 P(Q_i)$
2-7	0.15	0.25	si $N(Q_1) >= 8$ ou $N(Q_2) >= 8$  si $N(Q_1) \in [2,7]$ et $N(Q_2) \in [2,7]$  sinon	$1 - (P(Q_1) + P(Q_2))$  $0.6 - (P(Q_1) + P(Q_2))$  $0.8 - (P(Q_1) + P(Q_2))$	si $1 - \sum_{i=1}^3 P(Q_i) > 0.15$  sinon	0.15  $1 - \sum_{i=1}^3 P(Q_i)$
$\geq 8$	0.30	si $N(Q_1) >= 8$ $0.9 - P(Q_1)$  sinon $0.7 - P(Q_1)$	si $N(Q_1) >= 8$ et $N(Q_2) >= 8$  si $(N(Q_1) < 8$ et $N(Q_2) >= 8$ ou $(N(Q_1) >= 8$ et $N(Q_2) \in [2,7]$ )  si $(N(Q_1) > 8$ et $N(Q_2) = 0$ ou $(N(Q_1) > 8$ et $N(Q_2) = 1)$  sinon	$1 - (P(Q_1) + P(Q_2))$  $0.95 - (P(Q_1) + P(Q_2))$  $0.98 - (P(Q_1) + P(Q_2))$  $0.90 - (P(Q_1) + P(Q_2))$		$1 - \sum_{i=1}^3 P(Q_i)$

#### V.4.6.1.3 Détermination de la stratégie de semis et de choix de précocité de chaque agriculteur [M3]

Ce sous-module a pour objectif d'estimer le type de « stratégie de choix de précocité et de mode de semis » de chaque agriculteur en fonction de caractéristiques structurelles de son exploitation.

##### ➤ Développement du modèle : données et démarche

Le détail de la conception de ce sous module peut être trouvé dans *le chapitre 3 de résultats*.

Une analyse des données de 2000 et 2001 a permis de constater que pour des surfaces à semer comparables, il existe une diversité de modes de semis (durée et organisation du chantier), ainsi qu'une diversité de choix de précocités (nombre de précocités, types, ordre de semis, répartition dans la sole). Cette double diversité explique la diversité des couples {date de semis, type de précocité} observée dans une même zone climatique dans notre zone d'étude. L'analyse croisée des modes de semis et des choix de précocité a permis d'identifier des stratégies (Maton et al., 2005). L'analyse statistique (analyse des correspondances multiples et classification ascendante hiérarchique) des données de 2003 confirment leur existence par l'identification de trois types de stratégies de choix de précocité et de semis décrites à partir de variables indépendantes d'un scénario climatique donné (*chapitre 3 des résultats*). Nous supposons donc dans la version actuelle du modèle que l'agriculteur ne change pas de stratégie en fonction du scénario climatique. Ces stratégies peuvent être résumées par : (a) « semis en suivant de deux ou trois précocités différentes », (b) « semis en un jour d'une précocité » ou (c) « semis en plusieurs sessions de trois ou quatre précocités ».

Un arbre de détermination a été obtenu par la méthode CART (Breiman et al., 1984) et permet de prédire la stratégie de choix de précocités et de semis de chaque agriculteur en fonction de données décrivant les exploitations agricoles, facilement accessibles dans des bases de données administratives. Les paramètres de cet arbre de détermination sont directement issus de l'analyse via la méthode CART. La qualité prédictive du modèle de détermination des stratégies obtenu a été testée par validation croisée.

##### ➤ L'algorithme

L'algorithme correspond au calcul des probabilités d'occurrence des différentes stratégies selon l'arbre de détermination présenté dans le Tableau 22. Cet algorithme fonctionne par exploitation et nécessite pour chaque exploitation de connaître la Surface Agricole Utile (SAU), la part de surface de maïs grain dans la SAU, la part de surface irriguée dans la SAU, la présence d'un atelier d'élevage ou non.

Par exemple, si la part de maïs grain dans la SAU est supérieure à 25%, si l'exploitation ne possède pas d'atelier d'élevage et si la SAU est comprise entre 20 et 60 ha, la distribution de probabilités 0.75%, 0.125%, 0.125%

La stratégie affectée à l'agriculteur est déterminée par tirage aléatoire dans la distribution.

**Tableau 22: Présentation de l'arbre de détermination des distributions de stratégies de choix de précocité et de semis**

Surface de maïs grain /SAU	Présence d'un atelier d'élevage	Surface irriguée /SAU	SAU	Probabilité d'occurrence des stratégies (%)		
				Stratégie a	Stratégie b	Stratégie c
<25%	∇	∇	∇	0.23	0.69	0.8
>25%	non	∇	[20 ; 60[	0.75	0.12.5	0.12.5
		∇	<20 ou ≥ 60	0.17	0.33	0.50
	oui	[10 ;40[	∇	0.70	0.15	0.15
		<10 ou ≥ 40	<20 ou ≥ 60	0.75	0.25	0
			[20 ; 60[	0.28	0.56	0.16

#### V.4.6.1.4 Détermination des quadruplets {date, précocité, densité, surface} [M4]

L'objectif de ce sous-module est de déterminer les quadruplets {date, précocité, densité, surface} de chaque agriculteur.

##### ➤ Développement du modèle : données et démarche

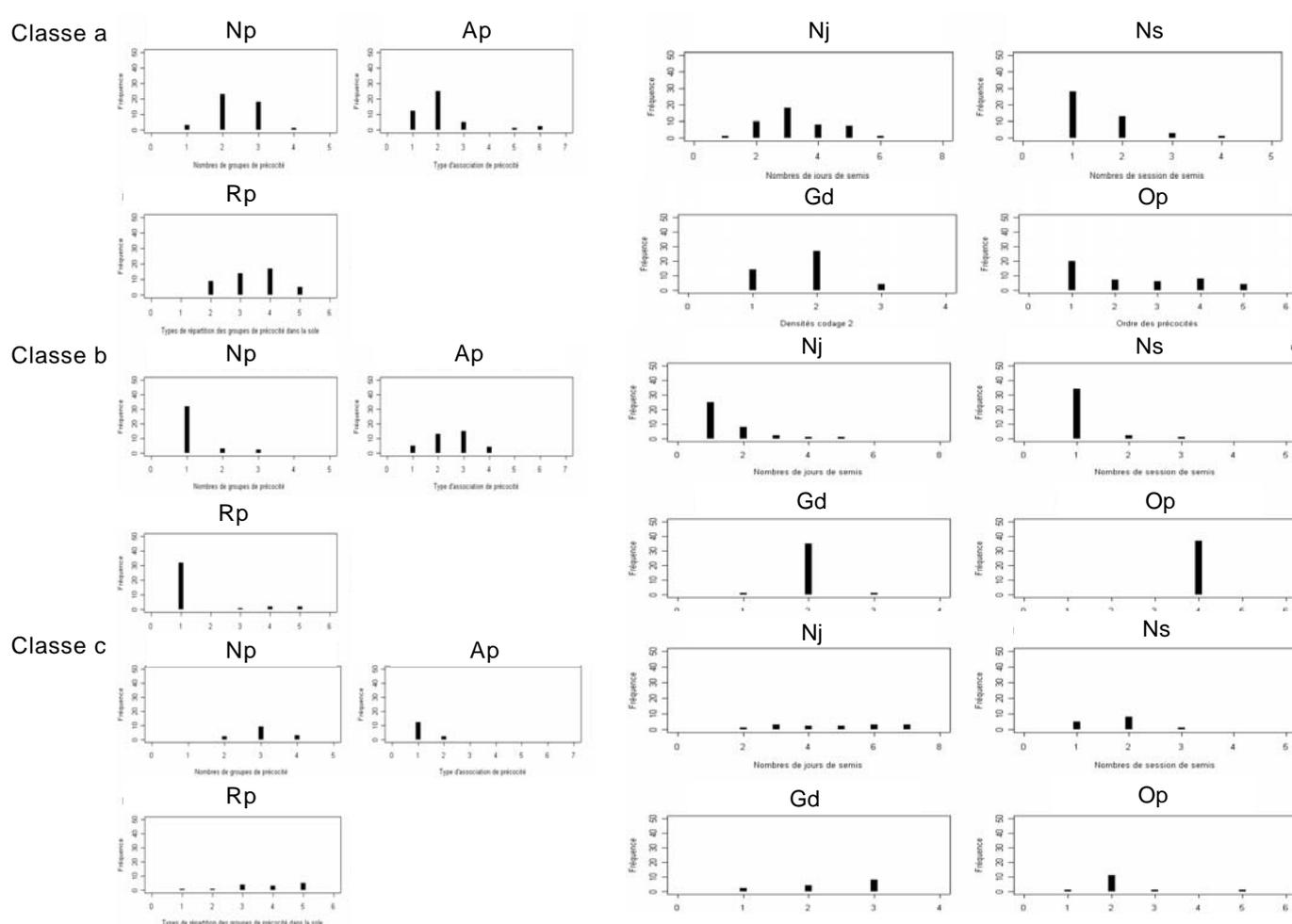
Ce sous-module est basé sur la description des trois stratégies de semis et de choix de précocité *a*, *b*, *c*. Nous considérons que l'estimation des quadruplets dépend de la stratégie de l'agriculteur, de la date de démarrage et du calendrier de jours disponibles. La stratégie permet de déterminer le nombre de jours de semis de l'agriculteur, l'organisation en session ou non, le nombre de groupes de précocité, l'ordre dans lequel elles sont semées, leur répartition dans la sole et le mode de gestion de la densité. La date de démarrage permet de caler le jour julien de départ pour le décompte des jours de semis suivants. Le calendrier de jours disponibles permet de déterminer des jours juliens auxquels les semis ont pu avoir agronomiquement lieu.

Chaque stratégie est définie par sept variables (Tableau 23)

**Tableau 23: Modalités des 7 variables décrivant les stratégies de choix de précocité et de mode de semis**

$N_p$	Nombre de groupes de précocité	1, 2, 3, 4
$A_p$	Associations de précocités	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. présence du groupe très tardif</li> <li>2. présence du groupe tardif</li> <li>3. présence du groupe demi tardif</li> <li>4. présence du groupe demi précoce</li> <li>5. mélange très tardif - demi tardif</li> <li>6. mélange tardif - précoce.</li> </ol>
$O_p$	Ordre des Précocités	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. les précocités les plus tardives sont semées en 1<sup>er</sup>,</li> <li>2. pas d'ordre défini,</li> <li>3. les précocités les plus précoces en 1<sup>er</sup>,</li> <li>4. les précocités sont semées en une seule session + cas où une seule précocité est semée,</li> <li>5. une variété précoce est semée au départ puis les précocités les plus tardives sont semées en 1<sup>er</sup>)</li> </ol>
$R_p$	Répartition des groupes de précocité dans la sole	<ol style="list-style-type: none"> <li>6. 100% de la sole est occupée par la même précocité,</li> <li>7. équilibré - pour 2 précocités : de 40 à 60% ; pour 3 précocités : de 27 à 40% ; pour 3 précocités : de 20 à 30%.</li> <li>8. déséquilibré tardif, ie. ce sont les précocités tardives qui occupent le plus de surface,</li> <li>9. déséquilibré précoce, ie. ce sont les précocités les plus précoces qui occupent le plus de surface,</li> <li>10. intermédiaire : cas où les précocités intermédiaires occupent le plus de surface (cas de 3 ou 4 précocités)</li> </ol>
$N_j$	Nombre de jours de semis	<ol style="list-style-type: none"> <li>1 : 1, 2</li> <li>2 : 3, 4, 5, 6</li> <li>3 : <math>\geq 7</math></li> </ol>
$N_s$	Nombre de sessions de semis	1, 2, 3, 4
$G_d$	Mode de gestion de la densité	<ol style="list-style-type: none"> <li>11. modulation de la densité selon la précocité,</li> <li>12. densité constante quelle que soit la précocité, la date ou la variété,</li> <li>13. modulation sans raison identifiée</li> </ol>

Les stratégies diffèrent par la distribution des modalités de chaque variable (Figure 53). Par exemple, en grande majorité, 2 ou 3 groupes de précocités ( $N_p$ ) sont semés dans la stratégie *a*, 1 seul groupe de précocité est semé dans la stratégie *b*, et principalement 3 dans la stratégie *c*. La variabilité intra-stratégie est plus ou moins importante selon la stratégie: par exemple, l'ordre de semis des groupes de précocité ( $O_p$ ) est très variable dans la stratégie *a* alors qu'il est fixé dans la stratégie *b*.



**Figure 53: Histogrammes des variables décrivant la stratégie de choix de précocité et de semis. L’axe des abscisses représente les modalités des variables (Tableau 23) et l’axe des ordonnées représente le nombre d’individus parmi la population de maïsiculteurs irrigants enquêtés en 2003.**

Afin de déterminer les modalités de variables à partir de la stratégie de l’agriculteur, nous avons identifié les combinaisons de modalités possibles et hiérarchisé les variables en utilisant des arbres de classification. La variable Rp est apparue la plus discriminante pour les stratégies *a* et *b*. Elle conditionne les modalités des variables Nj, Np et Op pour la stratégie *a* et Nj et Np pour la stratégie *b*. Les variables pour la stratégie *c* présentent moins de variabilité et peuvent être déterminées indépendamment les unes des autres (Tableau 24).

Maton et al. (2005) ont montré que la précocité majoritaire en surface varie d’une PRA à l’autre une année donnée et nous avons vu qu’elle varie d’une année à l’autre en fonction du climat. Pour la détermination des types de précocité semés par chaque agriculteur, nous avons choisi de fixer des distributions d’association suivant la localisation de l’agriculteur à partir des données observées.

**Tableau 24: Présentation des modalités possibles des variables pour chaque stratégie. Entre parenthèse, figure la probabilité associée à la (les) modalité(s)**

	Stratégie a	Stratégie b	Stratégie c
$R_p$	de 2 à 5 (0.25)	1 (0.85) ou 2 à 4 (0.15)	3 (0.5) ou 4 (0.5)
$N_j$	$= f(R_p)$ Si $R_p = 2$ ou 3 alors $N_j = 2$ à 5 Si $R_p = 4$ alors $N_j = 1$ à 6 Sinon, $N_j = 3$ ou 5	$= f(R_p)$ Si $R_p = 1$ , $N_j = 1$ , sinon $N_j = 1$ à 5	$N_j$ : de 3 à 7
$N_p$	$= (R_p)$ Si $R_p = 2$ alors $N_p = 1$ ou 2 Si $R_p = 3$ ou 4 alors $N_p = 1$ à 5 Sinon, $N_p = 2$ à 4	$N_p = f(R_p)$ Si $R_p = 1$ , $N_p = 1$ , sinon $N_p = 2$	$N_p$ : 3 ou 4
$O_p$	$= f(R_p)$ Si $R_p = 2$ alors $O_p = 2$ à 5 Si $R_p = 4$ alors $O_p = 1$ à 6 Sinon, 3 ou 5	4	2
$N_s$	1 (0.5), 2 (0.5)	1	1(0.33), 2(0.33), 3(0.33)
$G_d$	1(0.33), 2(0.33), 3(0.33)	2	1(0.33), 2(0.33), 3(0.33)
$A_p$	Non utilisé		

### ➤ L'algorithme

Les entrées du sous-module sont pour chaque agriculteur, sa PRA, sa date de démarrage, sa stratégie de choix de précocité et de mode de semis et le calendrier de jours disponibles correspondant à sa zone climatique.

Pour une stratégie donnée, les modalités des variables  $R_p$ ,  $N_j$ ,  $N_p$ ,  $O_p$ ,  $N_s$ ,  $G_d$  sont soit déterminées en fonction de la valeur prise par une autre variable ( $R_p$ ), soit tirées aléatoirement en fonction des probabilités d'occurrence des modalités (cf. Tableau 24).

Une fois le nombre de jours  $N_j$  et le nombre de sessions de semis  $N_s$  déterminés, les dates de semis suivant la date de démarrage sont déterminées en fonction du calendrier de jours disponibles. Quand l'agriculteur sème en plusieurs sessions, le nombre total de jours de semis est réparti de manière uniforme entre les différentes sessions. Le premier groupe de jours est affecté à la première session. Les dates de semis correspondantes sont déterminées parmi les jours disponibles suivant la date de démarrage. Le deuxième groupe de jours est affecté à la deuxième session. Pour la détermination de la date à laquelle commence la deuxième session, on fixe un nombre de jours disponibles non utilisés avant de redémarrer la session de semis suivante. Celui-ci a été fixé à 7 dans l'algorithme. Ce nombre est une valeur moyenne cohérente avec les données observées chez les agriculteurs enquêtés. Les dates de semis suivantes sont déterminées en fonction du nombre de jours de semis de la session et du calendrier de jours disponibles. La même procédure a lieu si l'agriculteur sème en trois ou quatre sessions.

En fonction du nombre de précocités  $N_p$  et de la localisation de l'agriculteur, une distribution de types d'associations de groupes de précocité est affectée à l'agriculteur. Ces distributions ont été établies en calculant les distributions moyennes à partir des données observées en 2000, 2001 et 2003 (Annexe 12). Un tirage aléatoire suivant la distribution permet de déterminer les types de précocité semés.

Une fois les dates de semis déterminées, les types de précocité sont affectés aux dates en respectant l'ordre de semis des précocités  $O_p$ . La surface semée par jour est ajustée en fonction de la surface de maïs grain à semer et de la répartition des types de précocités dans la sole.

Suivant le mode de gestion de la densité  $G_d$ , des valeurs de densité ou une distribution de densité est affectée pour chaque date :

- si  $G_d=1$ , la densité est affectée selon le type de précocité semé (75000 pieds/ha pour une variété très tardive, 80000 pour une variété tardive, 90000 pour une variété demi-tardive et 95000 pour une variété demi-tardive, 100000 pour les variétés demi-précoce et précoce).
- si  $G_d=2$ , la densité est fixée à 80000 pieds par hectares,
- si  $G_d=3$ , la densité est tirée au hasard parmi {75000, 80000, 85000, 90000, 95000}.

#### V.4.7 Estimation de la demande en eau au sein de la zone de la Baïse-Amont

Dans cette partie, il s'agit de présenter le couplage de SIMITKO à MODERATO ainsi que les multisimulations de MODERATO permettant de prendre en compte la dimension spatiale de la demande en eau et les distributions de probabilité des pratiques pour chaque unité de simulation.

##### V.4.7.1 **Le paramétrage de la stratégie d'irrigation et du contexte d'irrigation**

Un type de stratégie d'irrigation a été déterminé pour la zone de la Baïse-Amont. Elle se caractérise par une durée de tour d'eau supérieure à 6 jours et une dose journalière inférieure à 5 mm. Les détails de cette stratégie peuvent être trouvés dans Maton et al. (2005). Ce résultat a orienté le choix de ne représenter qu'une stratégie d'irrigation, c'est-à-dire de définir les mêmes indicateurs, opérateurs, seuils et actions pour l'ensemble des agriculteurs de la zone d'étude.

Pour les valeurs des paramètres des règles de décision de retour et de délai, nous avons choisi d'utiliser ceux identifiés spécifiquement pour la zone de la Baïse à partir des enquêtes réalisées dans la zone dans le cadre du développement d'un modèle spatialisé appelé ADEAUMIS (Leenhardt et al., 2004a; Leenhardt et al., 2004b) (Annexe 13).

Pour la règle de démarrage, il a été choisi de se baser sur les données d'enquête utilisées pour l'élaboration de SIMITKO et d'intégrer les résultats d'entretiens réalisés auprès d'agriculteurs. Ces entretiens ont permis d'identifier deux stratégies de démarrage de l'irrigation: la première stratégie est basée sur la volonté de l'agriculteur de couvrir au mieux les besoins en eau du maïs et de prévenir tout signe de stress hydrique. La seconde est basée sur la volonté de «faire souffrir<sup>14</sup>» le maïs afin qu'il s'enracine. Tendanciellement, les agriculteurs ayant parlé de la première stratégie sont ceux dont le système de production est peu diversifié, où le maïs est la seule culture d'été et ayant une ressource en eau adéquate

---

<sup>14</sup> La citation en italique est tirée des entretiens réalisés en 2004 auprès de 20 maïsiculteurs

tandis que la seconde stratégie a été présentée par des agriculteurs ayant une ressource en eau limitante. Afin de traduire ces deux stratégies, nous nous sommes basés sur un indicateur représentant le système de production utilisé par les services statistiques agricoles (Agreste, 2004): le pourcentage de maïs dans la SAU et un indicateur biophysique : le nombre de feuilles du maïs. Nous avons considéré que : (i) la première stratégie est utilisée dans les exploitations à dominante « maïs irrigué » (surface de maïs grain > 25% de la SAU) et que le seuil du stade cultural est de 8 feuilles et que la seconde est utilisée par les exploitations à « dominante culture sèche » (surface de maïs grain < 25% de la SAU) avec un seuil de stade cultural égal à 12 feuilles.

Pour la règle d'arrêt, la dose et les critères d'arrêt ont été choisis telle que dans ADEAUMIS. Ces critères sont :

- la somme de température correspondant à l'atteinte du stade 50% d'humidité du grain (valeur spécifique pour chaque précocité)
- un déficit en eau : si le déficit en eau dépasse 70 mm, un dernier tour d'eau est effectué.

Le contexte d'irrigation est celui utilisé dans le modèle ADEAUMIS (annexe 14).

Notons que globalement, les données d'enquêtes auprès des irrigants ont montré que les agriculteurs ne prennent pas en compte explicitement les précocités et les dates de semis dans leurs règles de décision d'irrigation. L'irrigation est en général démarrée sur la parcelle la plus sèche, qui correspond parfois à la première semée. L'arrêt de l'irrigation sur les différentes parcelles peut être décidé en fonction de la précocité des variétés. Les proportions des des agriculteurs arrêtant l'irrigation en tenant compte de la précocité des variétés n'ont pas été estimées.

#### **V.4.7.2 Le couplage**

Chaque Quadruplet {date de semis, précocité, densité, surface} obtenu grâce à SIMITKO (sous R) est utilisé comme éléments des données d'entrée pour MODERATO (date de semis, groupe de précocité et densité de semis). Ainsi, le nombre de simulations de MODERATO est égal au nombre  $N$  de quadruplets produits par SIMITKO.

En début de simulation de MODERATO, chaque quadruplet est affecté à un point de grille climatique en fonction de la commune de l'exploitation auquel il se rattache. Comme dans SIMITKO, seul un sol de type terrefort est simulé. Les variables d'entrée de SIMITKO concernant les agriculteurs sont enregistrés dans le fichier d'entrée de MODERATO et permettent de fournir la variable nécessaire au paramétrage de la règle de démarrage de l'irrigation (surface de maïs grain dans la SAU). Pour chaque type de précocité, une variété représentative a été choisie.

Les résultats des simulations de MODERATO sont synthétisés sous la forme d'un tableau à  $N$  lignes avec des colonnes représentant l'ensemble des informations utilisées au cours des répétitions de SIMITKO et des simulations de MODERATO.

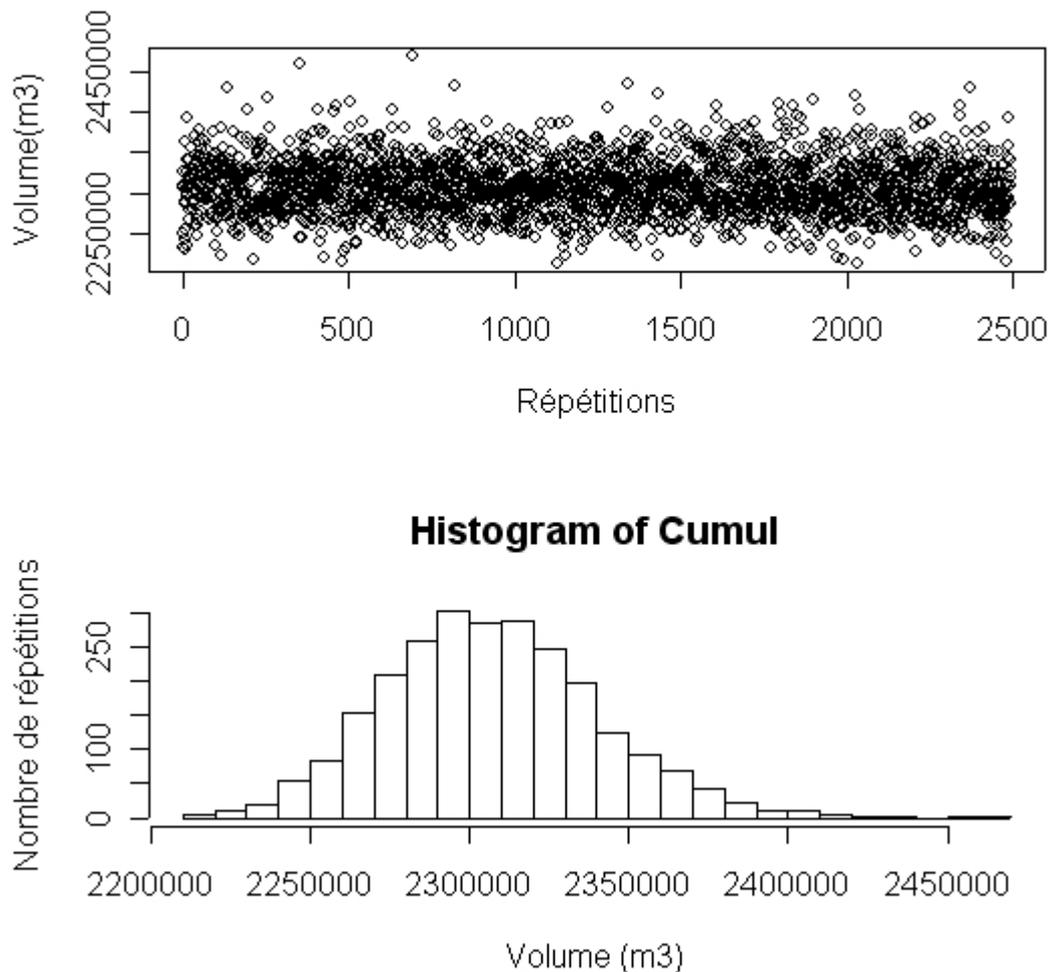
## V.4.8 Résultats et discussion

### V.4.8.1 **Estimation de la demande en eau, des quantités d'eau unitaires, des dates de démarrage de l'irrigation et du rendement**

#### V.4.8.1.1 *Estimation de la demande en eau*

Deux mille cinq cents répétitions M de SIMITKO ont été réalisées pour l'échantillon de 47 agriculteurs ayant fait l'objet de l'enquête en 2005. Le choix des 2500 répétitions a été raisonné à partir de la loi des grands nombres. Les données climatiques en point de grille de l'année 2005 ont été utilisées. N simulations de MODERATO ont été réalisées à la suite afin d'obtenir la demande en eau d'irrigation.

Le volume d'eau moyen demandé par les 47 agriculteurs en 2005 pendant la campagne d'irrigation est estimé pour chaque répétition. Les résultats sont représentés Figure 54 pour les 2500 répétitions effectuées. La distribution du volume sur l'ensemble des répétitions présente une distribution gaussienne avec une moyenne de 2 307 000 m<sup>3</sup> et un écart type de 33 680 m<sup>3</sup>. Le coefficient de variation, égal à 1.5%, est donc très faible. La quantité d'eau moyenne demandée est de 160 mm, ce qui correspond aux valeurs habituelles pour le maïs irrigué dans le sud ouest de la France sur des sols argileux et limoneux (Arvalis-Institut du végétal, 2004a).

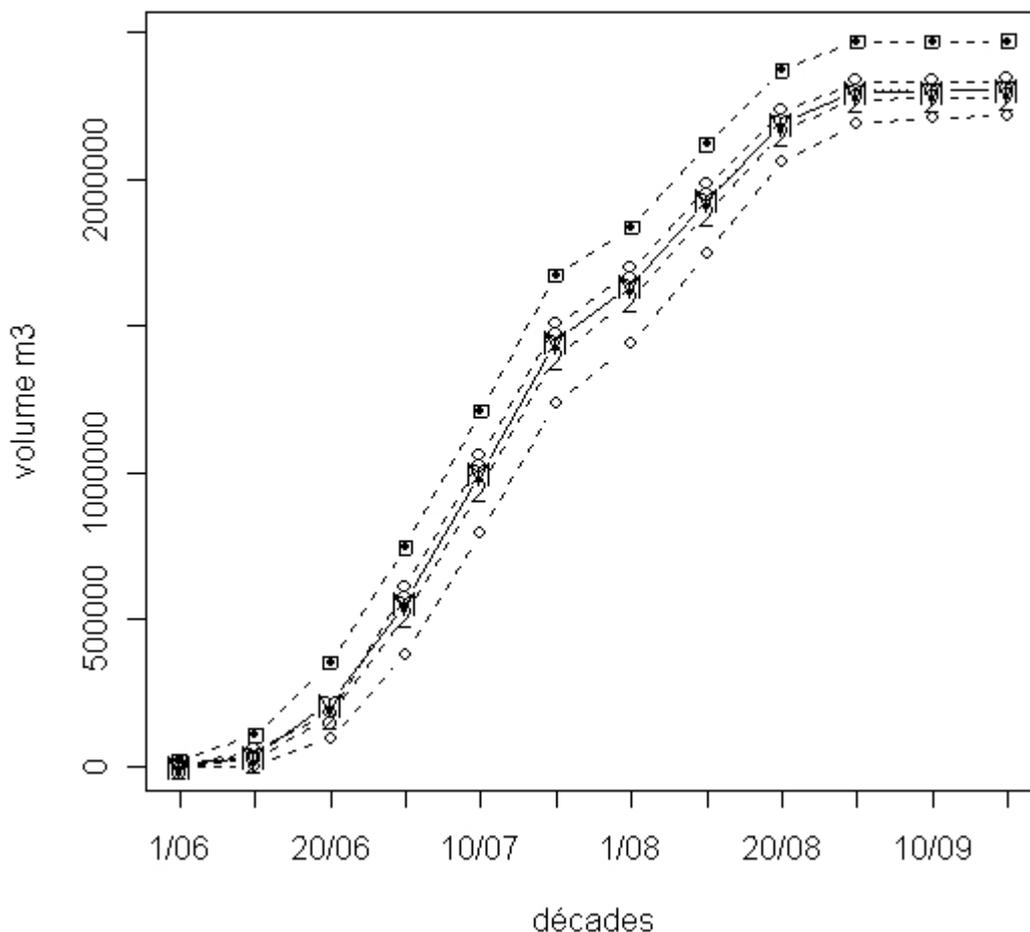


**Figure 54 : (a) Distribution des volumes d'eau pour chaque simulation et (b) distribution des volumes d'eau demandés (pour 2500 répétitions)**

Les volumes moyens des premier, deuxième, cinquième, huitième et dixième déciles ont été calculés pour les 2500 répétitions pour chaque décade de juin à fin septembre. La dynamique de la demande en eau est représentée Figure 55 pour ces différents déciles. La demande en eau démarre à partir de la première décade de juin et se stabilise à partir de la première décade de septembre, ce qui correspond aux périodes habituelles de démarrage et d'arrêt de l'irrigation du maïs dans le sud ouest de la France (Lorgeou et Souverain, 2003).

Les volumes d'eau moyens des deuxième, cinquième et huitième déciles demandés au cours du temps sont pratiquement identiques. Les valeurs des premier (minimum) et dixième (maximum) déciles donnent une représentation des queues de distribution des volumes pour une décade donnée. Les queues de distributions sont stables pendant la campagne d'irrigation sauf au cours de la troisième décade de juillet, où une légère augmentation est observable (Figure 55).

## dynamique de demande en eau

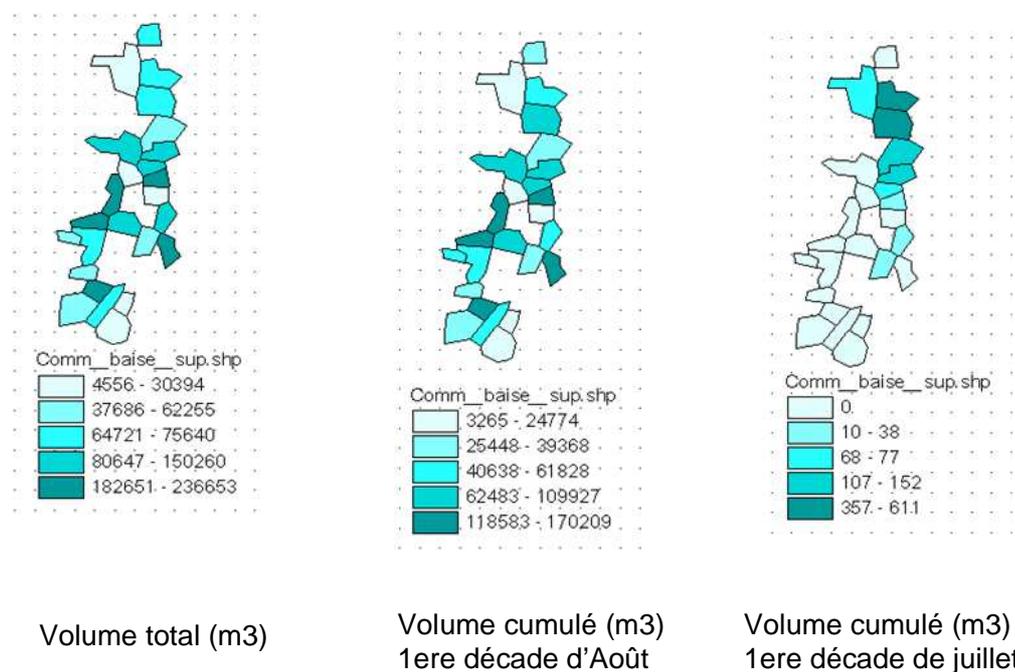


**Figure 55: Dynamique de la demande en eau. Pour chaque décade, la distribution des volumes d'eau demandés est présentée (. : maximum, 8 : huitième quintile, M : moyenne, m : médiane, 2 : deuxième quintile, o : minimum)**

La distribution spatiale du volume demandé par les 47 agriculteurs en 2005 montre qu'il existe une hétérogénéité spatiale au sein de la zone et que cette hétérogénéité évolue dans le temps (Figure 56). A la première décennie de juillet, les communes situées au nord de la zone ont globalement une demande plus élevée que celles situées au sud. Cela traduit les décalages de démarrage de l'irrigation du nord au sud en fonction du climat. A la première décennie d'août et à la fin de la campagne, on ne retrouve plus le gradient de demande orienté Nord Sud. Les communes ayant une demande nettement plus élevée que d'autres sont situées dans les PRA BIG, GAS et ASY.

L'analyse la distribution spatio-temporelle de la demande en eau nécessiterait la visualisation de la distribution spatio-temporelle des déterminants de la demande tels que les surfaces de maïs grain, la quantité d'eau unitaire, la pluviométrie (Annexe 15). Cela permettrait notamment de voir si les communes où la demande en eau totale est la plus forte correspondent systématiquement aux communes où la surface de maïs grain est la plus élevée et/ou si la répartition spatiale de la demande est liée également à la variabilité spatiale du

climat. Une analyse basée sur d'autres années et sur un échantillon d'agriculteurs permettant de couvrir entièrement la zone (RGA par exemple) permettrait une analyse plus complète de la distribution spatiale de la demande en eau d'irrigation de la zone de la Baise Amont.



**Figure 56: Distribution spatiale du volume total demandé, et des volumes demandés à la première décade d'août et la première décade de juillet.**

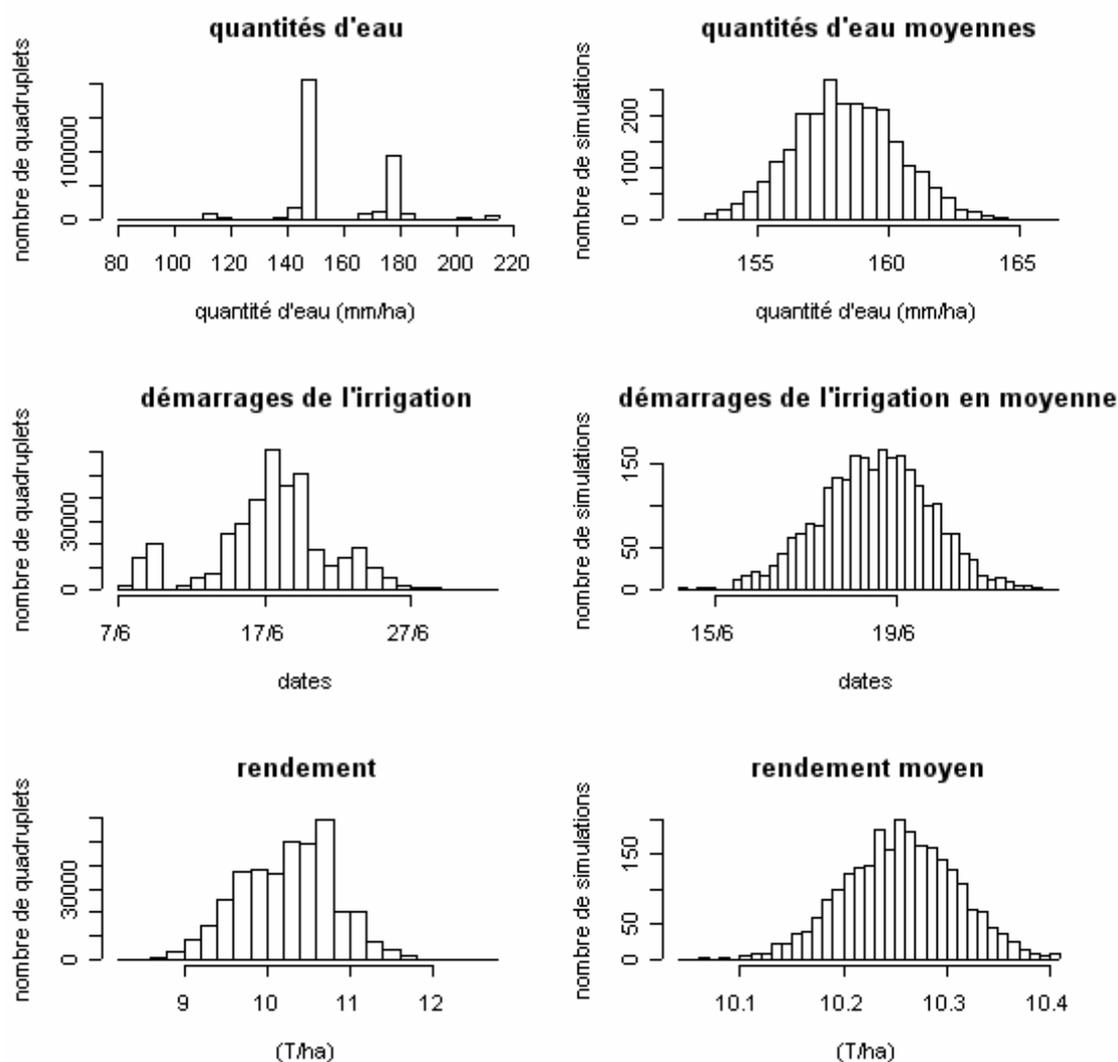
#### V.4.8.1.2 Estimation des quantités d'eau par unité de surface, des dates de démarrage de l'irrigation et du rendement

Les quantités d'eau consommées par unité de surface, calculée pour chaque quadruplet, pendant la campagne varient entre 110 et 216 mm avec une nette prédominance pour deux valeurs : 148 mm/ha et 178 mm (Figure 57a). La distribution des moyennes par répétition confirme la valeur moyenne estimée à partir du volume total (160 mm) : les moyennes s'échelonnent entre 153 et 165 mm. Ces valeurs sont concordantes avec l'ordre de grandeur des besoins en eau d'irrigation du maïs (200 mm en année sèche) (Arvalis-Institut du végétal, 2004a)

Les démarrages de l'irrigation s'échelonnent du 7 au 29 juin avec une valeur médiane autour des 18 et 19 juin (Figure 57b). Pour un nombre non négligeable de quadruplets, les démarrages ont lieu entre le 7 et le 9 juin. Ces démarrages plus précoces que pour l'ensemble des autres quadruplets peuvent être dus à des dates de semis précoces (cf. § 7.4.1). Les démarrages reprennent progressivement ensuite à partir du 11 juin. Ces dates sont en accord avec les dates habituelles de démarrage de l'irrigation dans la zone (mi juin, mi juillet) et correspondent aux dates de démarrage de l'irrigation recommandées par les avertissements

irrigation de 2005 dans la région Midi-Pyrénées (semaine du 13 au 19 juin 2005 pour l'Ariège par exemple).

Les rendements s'échelonnent entre 9 et 12 T ha<sup>-1</sup> avec une prédominance des surfaces dont le rendement est compris entre 10 et 10.8 T ha<sup>-1</sup>. La moyenne par simulation est comprise entre 10 et 10.4 T ha<sup>-1</sup> (Figure 57c). Ces valeurs sont en accord avec les rendements obtenus par les maïsiculteurs dans la zone (AGPM TECHNIQUE, 2001).



**Figure 57: Distribution en fonction du nombre de quadruplets (colonne de gauche) et du nombre de répétitions de SIMITKO (colonne de droite) des (a) quantités d'eau par unité de surface, (b) dates de démarrage de l'irrigation et (c) du rendement. Les valeurs moyennes (colonne de droite) correspondent à la distribution des valeurs moyennes de chaque répétition**

#### V.4.8.2 Evaluation du modèle

L'évaluation du modèle porte (i) sur les sorties de SIMITKO relatives aux {date, précocité, densité, surface} et (ii) sur les sorties de SIMITKO-MODERATO, c'est-à-dire les quantités d'eau unitaires, la dynamique de la demande en eau et le volume d'eau final demandé.

Etant données les hypothèses de construction du modèle, et notamment sur l'aspect stochastique des réalisations, la comparaison des données simulées et observées porte sur les distributions des données. Nous nous interrogeons sur la précision du modèle (les valeurs

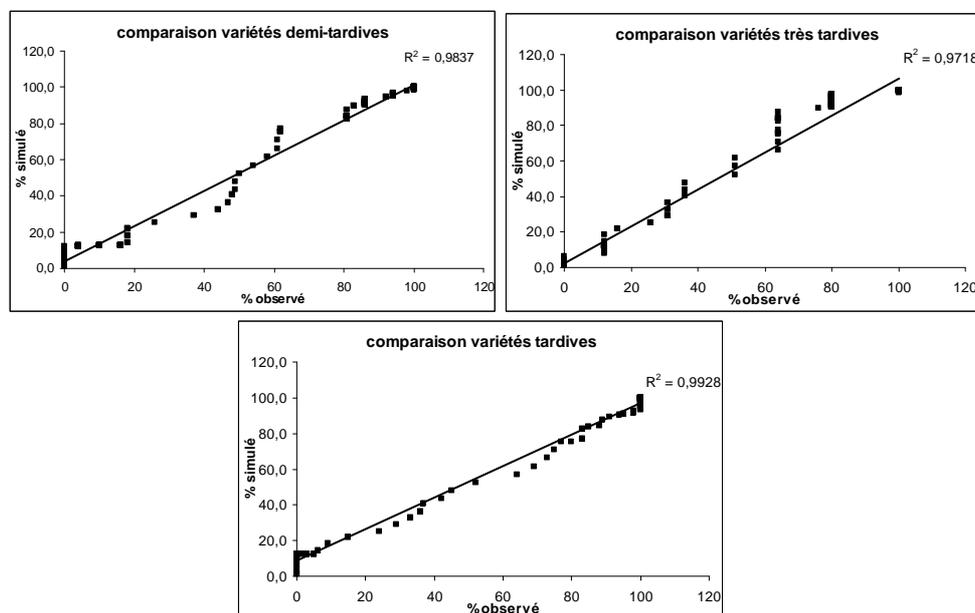
simulées sont-elles comprises dans l'intervalle des valeurs observées ?) et non son « exactitude » (les valeurs simulées sont elles égales aux valeurs observées ?) (Tedeschi, 2006).

#### V.4.8.2.1 Evaluation de SIMITKO

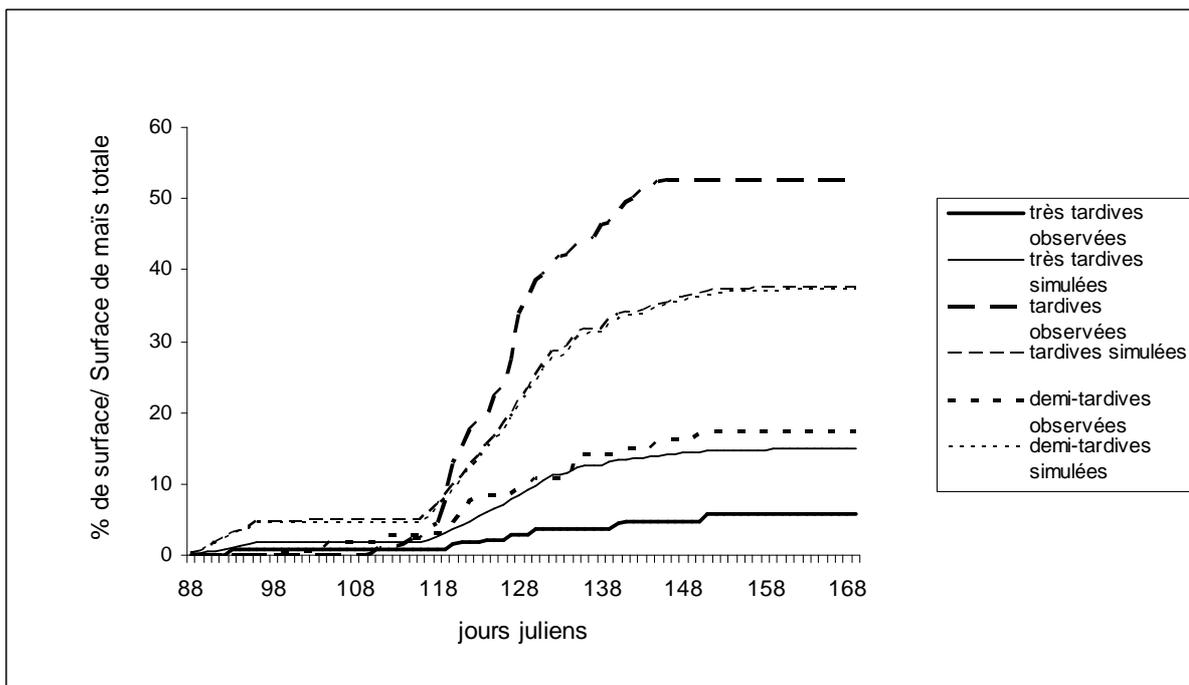
Les données observées proviennent de l'enquête postale menée en 2005 qui a permis de collecter les quadruplets de 47 maïsiculteurs de la zone de la Baïse pour cette année là. Les données simulées sont obtenues à partir des 2500 répétitions effectuées pour ces 47 agriculteurs. Nous comparons les données observées à la moyenne des données issues des 2500 répétitions.

##### ➤ Pourcentage cumulé de surface semée au cours de la période de semis pour chaque groupe de précocité.

Les données observées et simulées sont bien corrélées (Figure 58). Les coefficients de corrélation pour les variétés très tardives, tardives et demi tardives sont respectivement : 0.97, 0.99 et 0.98. Pour les variétés très tardives, les pourcentages de surface semée par jour ont cependant tendance à être surévalués par SIMITKO; pour les variétés tardives, elles sont globalement sous évaluées par SIMITKO et pour les variétés demi-tardives, elles sont sous évaluées jusqu'au 5 mai et surévaluées après. La représentation des pourcentages de surface semée par rapport à la surface de maïs grain totale observés et simulés pour chaque précocité confirme ces tendances (Figure 58): les surfaces des variétés très tardives sont surestimées de 10 % par SIMITKO, celles des variétés tardives sont sous estimées de 15 % et celles des variétés demi-tardives sont surestimées de 30%. La dynamique des semis est bien représentée sauf pour les variétés tardives pour lesquelles les premières dates de semis sont trop anticipées par le modèle.



**Figure 58: Pourcentage cumulé observé et simulé de surface semée journalièrement au cours de la période de semis pour chaque groupe de précocité**

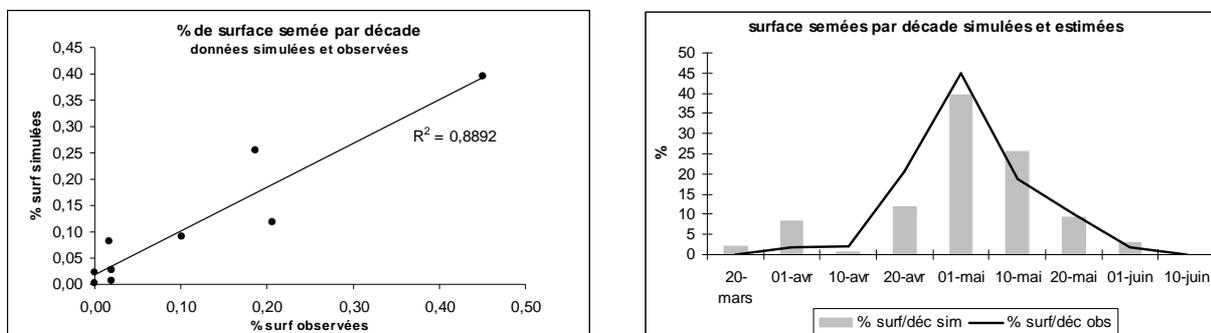


**Figure 59 : Dynamique de semis des trois groupes de précocité très tardif, tardif, demi-tardif (données observées et simulées)**

Les différences entre données simulées et données observées peuvent être dues à une évolution de l'offre variétale et/ou aux conditions météorologiques de l'année. Dans le modèle, les types de précocité semés dépendent de la localisation de l'agriculteur mais pas des conditions météorologiques de l'année en cours. Afin de rendre ce choix plus sensible aux conditions météorologiques de l'année en cours, deux cas pourraient par exemple être distingués à partir de nos données: si le nombre de jours disponibles en avril est inférieur à 8, les distributions de probabilités de semer les différentes associations de précocité pourraient être basées sur les données d'enquête de 2000 ; si le nombre de jours disponibles en avril est supérieur à 8, pourraient être basées sur les données de l'enquête 2003.

➤ **Le pourcentage de surface semée par décade**

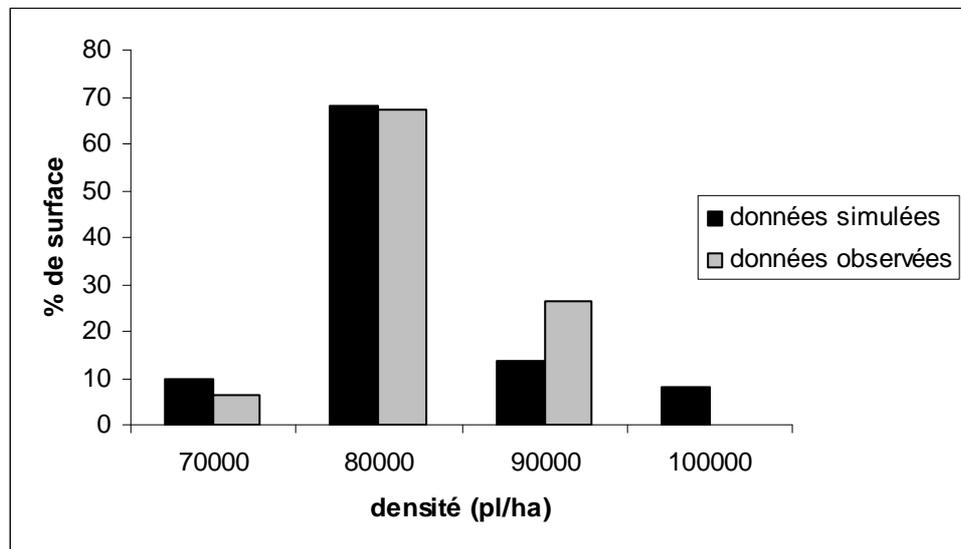
Le pourcentage de surface semée par décade, toutes précocités confondues, est assez bien estimé par SIMITKO. Le coefficient de corrélation est de 0.89. Les surfaces semées la première décade d'avril sont surévalués (8% au lieu de 2%) et légèrement sous-estimés la deuxième décade de mai. (27% au lieu de 18%). (Figure 60)



**Figure 60: Comparaison des pourcentages de surface semée par décade observée et simulée**

➤ **Pourcentage de surface pour chaque groupe de densité**

Pour la comparaison des surfaces semées avec les différentes densités simulées et observées, les données observées ont été regroupées dans quatre classes : 70 000, 80 000, 90 000, et 100 000 en suivant la règle: si la densité est inférieure à 75 000 pl ha<sup>-1</sup>, la donnée est affectée à la classe 70 000, si elle est comprise entre 75 000 et 84 000 pl ha<sup>-1</sup>, elle est affectée à la classe 80 000, si la densité est comprise entre 85 000 et 94 000 pl ha<sup>-1</sup>, elle est affectée à la classe 90 000 et si elle est supérieure ou égale à 95 000 pl ha<sup>-1</sup>, elle est affectée à la classe 100 000.



**Figure 61: Pourcentage en surface de chaque densité (données observées et simulées)**

Les données observées et simulées sont comparables pour les groupes de densité 70 000 et 80 000 : les surfaces observées et simulées sont respectivement de l'ordre de 10% et 70% (Figure 61). Pour les groupes de densité 90 000 et 100 000, l'estimation par SIMITKO est moins bonne : le modèle surestime la part des surfaces semées avec une densité égale à 100 000 au dépend des surfaces semées avec une densité égale à 90 000.

#### V.4.8.2.2 Evaluation de SIMITKO-MODERATO

##### ➤ Les dates de démarrage de l'irrigation

Les périodes de démarrage observées et simulées sont comparables : les dates observées s'échelonnent du 3 juin au 29 juillet mais pour 98% des quadruplets l'irrigation a démarré avant le 1 juillet (Figure 62) ; les dates simulées s'échelonnent entre le 7 juin et le 29 juin. Les périodes de démarrage observées et simulées (cf. § 7.1 et Figure 57b) présentent des similitudes :

- Dans les données observées, on observe un premier groupe de démarrage avant le 9 juin puis quelques jours d'arrêt entre le 9 et le 16 juin. La reprise s'amorce réellement après le 16 juin. Dans les données simulées, on trouve un arrêt des démarrages les 9, 11, 13 et 14 juin où il n'y a pas ou très peu de démarrages de l'irrigation. Ces arrêts peuvent être expliqués par la pluviométrie : par exemple, la pluviométrie est de 18 mm du 12 au 14 juin pour le point de grille 26.
- Dans les données observées, deux pics de démarrage ont lieu les 20 juin et 25 juin. Dans les données simulées, on observe également des pics mais ceux-ci ont lieu légèrement plus tôt (les 18 et 20 juin).

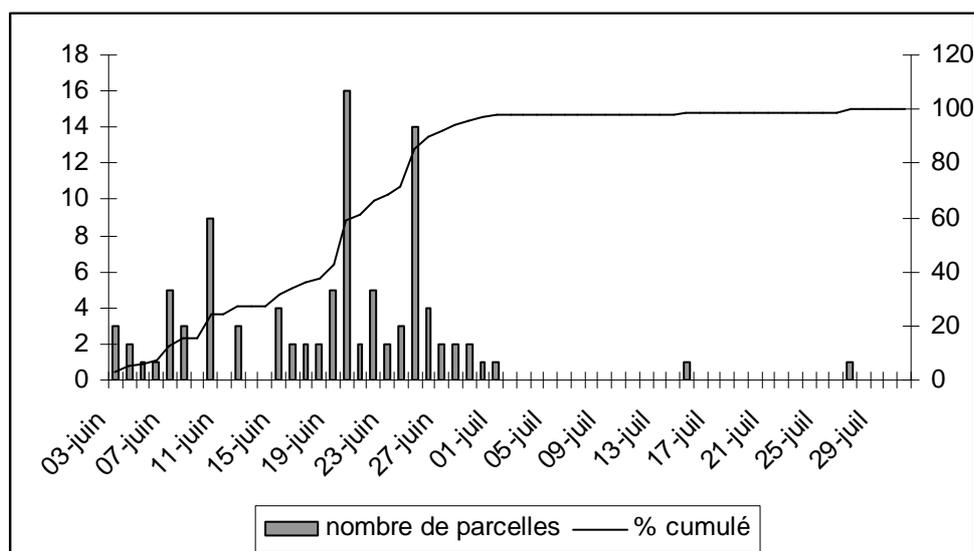


Figure 62: Dates de démarrage de l'irrigation observées en 2005

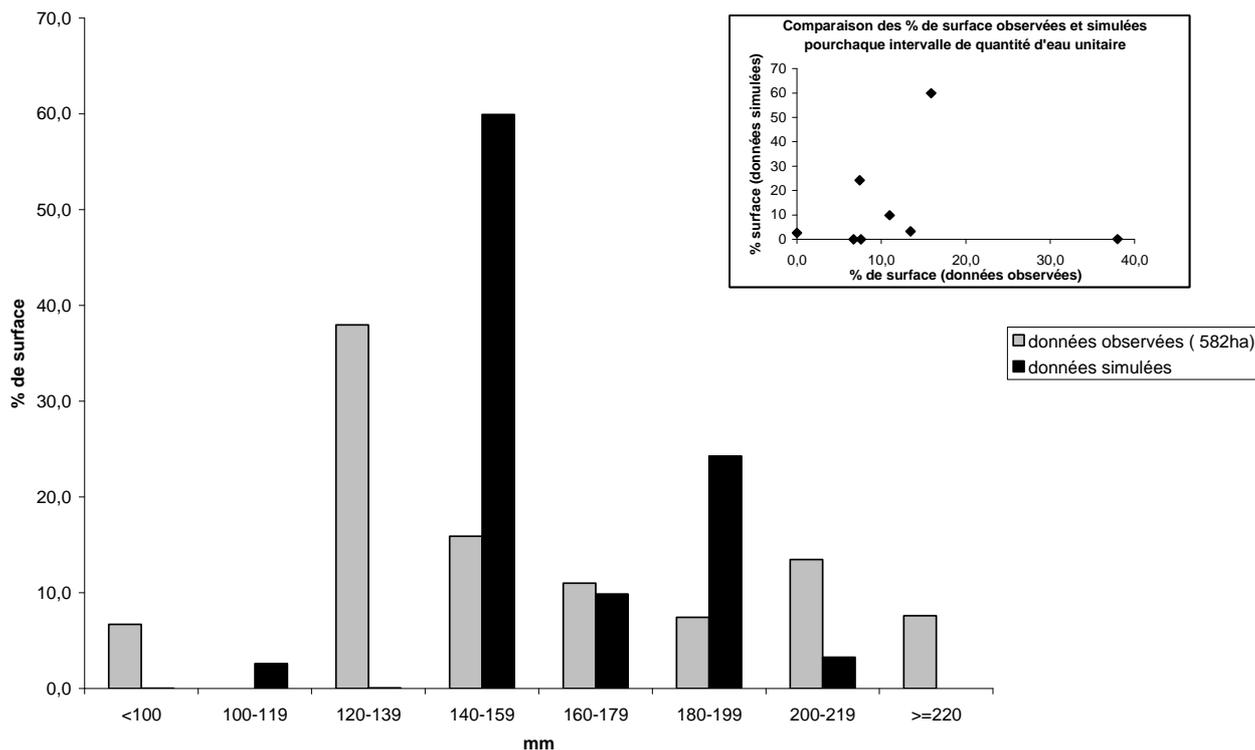
#### ➤ Quantités d'eau unitaires

L'évaluation de l'estimation des quantités d'eau unitaires s'appuie sur l'enquête postale de 2005. Les quantités d'eau unitaires par parcelle d'une part et par agriculteur d'autre part ont été calculées.

Pour la comparaison des quantités d'eau unitaires par parcelle observées et simulées, nous avons calculé le pourcentage de surface couverte par les parcelles irriguées par des quantités unitaires comparables regroupées en intervalles de 20 mm. Les données simulées et observées ne sont pas corrélées ( $R^2=0.05$ ) (encadré de la Figure 63).

La représentation des distributions montre que le modèle estime une distribution de moins grande amplitude que celle observée : les surfaces irriguées avec moins de 100 mm et plus de 200 mm représentent moins de 1% de surface alors qu'elles représentent entre 5 et 10% de surface dans les données observées (Figure 63). Dans les données simulées, 90% des surfaces sont irriguées avec des quantités comprises entre 140 et 200 mm alors que dans les données observées, elles représentent 34% des surfaces et que ce sont les surfaces irriguées avec 120 mm qui sont majoritaires (38%).

La zone de la Baïse est soumise à des orages très localisés en juillet et août qui peuvent engendrer le report d'un tour d'eau ou l'arrêt de l'irrigation quand ils surviennent fin août. Le décalage entre la distribution des quantités d'eau simulées et observées, de l'ordre de 20 à 30 mm, peut être dû à une mauvaise représentation des orages locaux dans les données climatiques en point de grille étant donné qu'ils sont issus d'interpolation de données météorologiques provenant de stations situées autour de la zone.



**Figure 63: Distribution des pourcentages de surface observés et simulés pour chaque intervalle de quantité d’eau unitaires par parcelle et comparaison des pourcentages de surface observés et simulés pour chaque intervalle de quantité d’eau unitaire**

Pour comparer les quantités d’eau unitaires par agriculteur, nous avons calculé le pourcentage d’agriculteurs utilisant le même ordre de grandeur de quantités d’eau selon les mêmes intervalles que précédemment. La répartition des agriculteurs dans chaque intervalle montre qu’à l’échelle de la sole de maïs grain, la distribution des quantités d’eau unitaires couvre tous les intervalles de moins de 100 mm à plus de 220 mm, avec une prédominance des agriculteurs utilisant entre 120 et 139mm et entre 180 et 199 mm d’eau (Figure 64).

Les distributions observée et simulée des quantités d’eau unitaires par agriculteurs sont présentées (Figure 65). Afin de comparer quantitativement ces distributions, nous avons calculé les valeurs minimales, maximales et médianes ainsi que les 1<sup>ème</sup> et 3<sup>ème</sup> quartiles des deux distributions. Les valeurs observées et simulées sont bien corrélées ( $R^2=0.91$ ). La distribution simulée est donc comparable à la distribution observée.

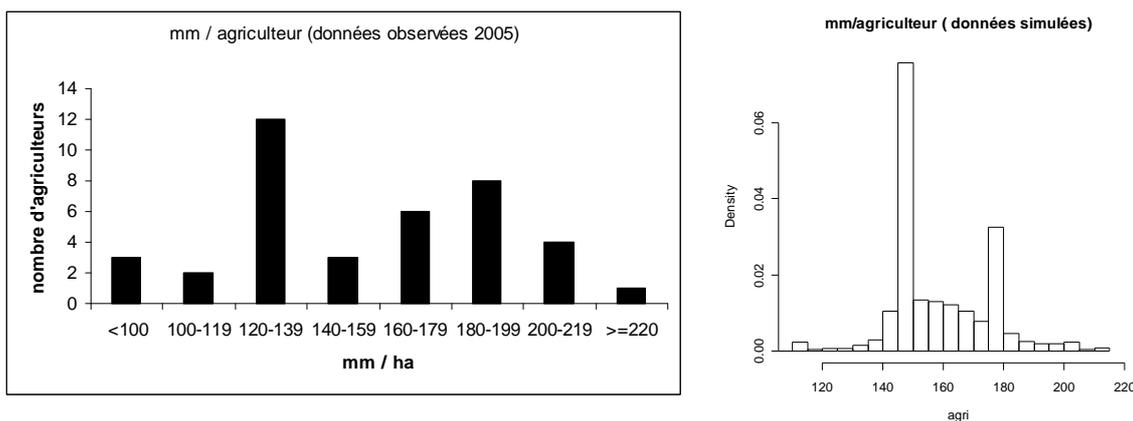


Figure 64: Distribution des agriculteurs selon leur quantité d'eau unitaire observées et simulées (données

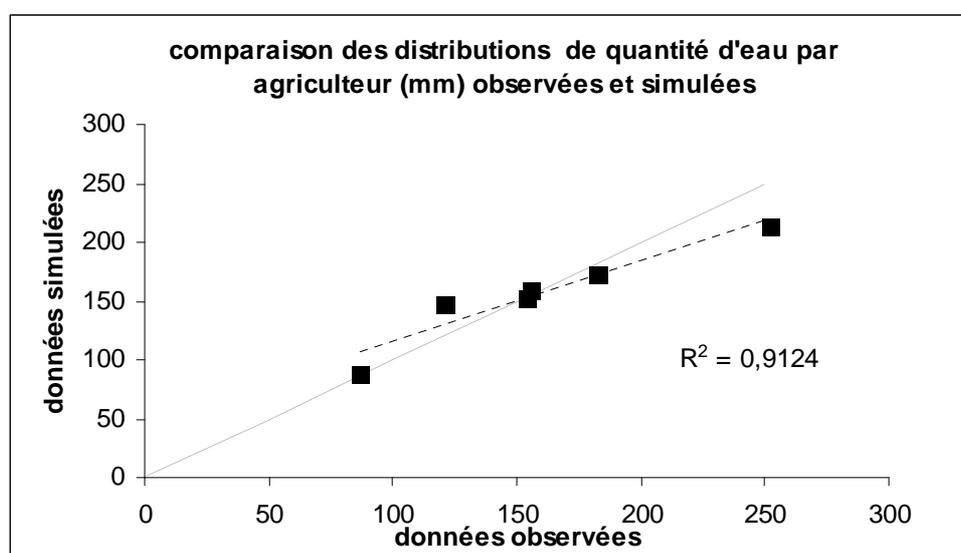


Figure 65: Comparaison des valeurs minimales, du 1<sup>er</sup> quartile, de la médiane, de la moyenne du 3<sup>ème</sup> quartile et de la valeur maximale des distributions observées et simulées

➤ **Dynamique de la demande en eau et volume total demandé**

La dynamique de la demande en eau et le volume estimés par SIMITKO-MODERATO à partir des données d'enquête 2005 ont été comparés à la dynamique et au volume estimés pour la zone de la Baïse Amont par le modèle ADEAUPI (Leenhardt et al., 2005) en 2005. ADEAUPI est un modèle utilisé par la CACG pour la gestion stratégique et tactique au sein du système Neste. Il simule le même ensemble de règles d'irrigation qu'ADEAUMIS.

La dynamique estimée par SIMITKO-MODERATO est donnée par décade. Le volume estimé par SIMITKO-MODERATO est calculé par extrapolation du résultat obtenu pour les 47 agriculteurs sachant qu'ils représentent 13% des surfaces de maïs irrigué selon les surfaces de maïs (grain+ semence) extraites à partir du RGA 2000.

Les différences d'estimation entre ADEAUPI et SIMITKO-MODERATO peuvent provenir (i) du paramétrage des règles de démarrage et d'arrêt de l'irrigation, (ii) de la prise en compte de la diversité des dates de semis, des précocités et densité dans SIMITKO-

MODERATO, (iii) de l'échantillonnage d'agriculteurs et (iv) des surfaces de maïs grain et des données climatiques utilisées.

Les volumes estimés par ADEAUI et SIMITKO-MODERATO sont respectivement égaux à 17,5 Mm<sup>3</sup> et 17,7 (+/- 0.26) Mm<sup>3</sup> (Tableau 25). Les deux volumes sont donc très proches. SIMITKO –MODERATO apporte une précision sur la variabilité possible. En 2005, elle est de 260 000 m<sup>3</sup>. Les consommations relevées ont également le même ordre de grandeur et sont très légèrement supérieures aux volumes estimés. SIMITKO-MODERATO donne donc une estimation qui paraît fiable.

La quantité d'eau unitaire moyenne peut être calculée à partir du volume total et des surfaces. Estimée à partir des données issues des relevés de consommations, elle est plus importante (170 mm) que celles estimées par les deux modèles (158 mm). Les surfaces de maïs utilisées dans les deux modèles sont très comparables (Tableau 25). Les surfaces correspondant aux relevés sont inférieures de 1000 ha à celles utilisées dans les deux modèles mais leur détermination est basée sur le débit souscrit, dont il a été montré que c'est un indicateur peu fiable de la surface irriguée (Salles, 2003). Il n'est donc pas possible de conclure que les deux modèles sous estiment la demande en eau unitaire moyenne.

Les données climatiques utilisées sont identiques pour les deux modèles jusqu'au 22 juillet. Des chroniques statistiques sèches sont ensuite utilisées pour ADEAUI alors que les données en point de grille complètes ont été utilisées dans SIMITKO-MODERATO. L'utilisation de chroniques sèches à partir de fin juillet peut induire une surestimation du volume d'eau demandé mais les relevés de consommation montrent que la demande estimée par ADEAUI n'est pas supérieure au volume consommé. Une analyse des différences entre les données météorologiques 2005 et les chroniques sèches permettrait de donner des éléments de conclusion sur l'impact de l'utilisation de telles données météorologiques.

**Tableau 25: Volumes estimés par les relevés de consommation et par les modèles ADEAUI et SIMITKO-MODERATO et surfaces de maïs et données climatiques correspondants à ces estimations.**

	<b>Consommations relevées (données CACG)</b>	<b>Estimation ADEAUI (données CACG)</b>	<b>Estimation SIMITKO- MODERATO</b>
<b>Climat</b>	-	Données en point de grille 2005 jusqu'au 22 juillet puis chroniques sèches (quantile statistique)	Données en point de grille 2005
<b>Surfaces</b>	10 768 ha (source : CACG 2005)	11 130 ha (source : CACG 2000 )	11 197 ha (source : RGA 2000)
<b>Volume</b>	18.2 Mm <sup>3</sup>	17.5 Mm <sup>3</sup>	17.7 Mm <sup>3</sup> (+/- 0.26)

Excepté au démarrage, les deux dynamiques de la demande en eau sont comparables (Tableau 26): Pour 10%, 25%, 50% de volume demandé, les décades correspondant au volume moyen estimé par SIMITKO-MODERATO englobent les dates estimées par ADEAUI. Pour 75% et 100% de volume demandé, les dates estimées par ADEAUI correspondent au dernier jour de la décade précédent celle estimée par SIMITKO-MODERATO. La différence est donc minime. Pour le démarrage de la demande, les dates estimées par SIMITKO-MODERATO correspondent à la décade précédant celle dans laquelle est incluse la date estimée par ADEAUI.

Les différences en fin de dynamique peuvent être dues au fait que dans ADEAUI, à partir du 22 juillet, les données climatiques utilisées sont des chroniques statistiques sèches: un climat sec peut augmenter la demande en eau mais également anticiper la date d'atteinte de la maturité du maïs et ainsi provoquer un arrêt de l'irrigation plus tôt qu'en réalité.

**Tableau 26: Date correspondant au démarrage, à 50% des volumes demandés et à l'arrêt des irrigations estimées par ADEAUI et par SIMITKO-MODERATO**

Périodes	Dynamique ADEAUI	Dynamique de SIMITKO MODERATO
Démarrage	15 juin	Entre le 1 <sup>er</sup> et le 10 juin
10% des volumes demandés	25 juin	Entre le 20 et le 30 juin
25% des volumes demandés	5 juillet	Entre le 1 <sup>er</sup> le 10 juillet
50% des volumes demandés	18 juillet	Entre le 11 et le 21 juillet
75% des volumes demandés	31 juillet	Entre le 1 <sup>er</sup> et le 10 août
Arrêt	20 août	Entre le 21 et 31 août

#### **V.4.8.3 Eléments d'analyse de la sensibilité du modèle aux dates de semis et groupes de précocité et aux stratégies de choix de précocité et de semis**

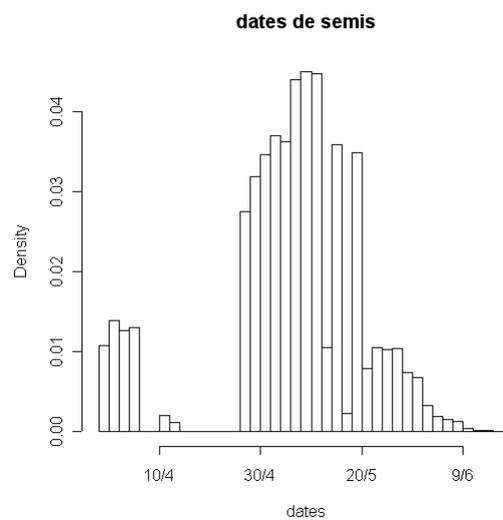
Cette partie présente les premiers éléments d'analyse de sensibilité du modèle à partir des résultats obtenus pour l'année 2005. Pour pouvoir conclure sur la sensibilité du modèle aux valeurs de paramètres choisies et à la simulation des stratégies de choix de précocité et de semis, Ces résultats devront être complétés par une analyse sur plusieurs années.

##### *V.4.8.3.1 Variations des quantités d'eau selon les dates de semis et les précocités*

La quantité d'eau selon les dates de semis et la précocité est présentée Figure 67 pour les 2500 répétitions des données des 47 agriculteurs avec le climat 2005.

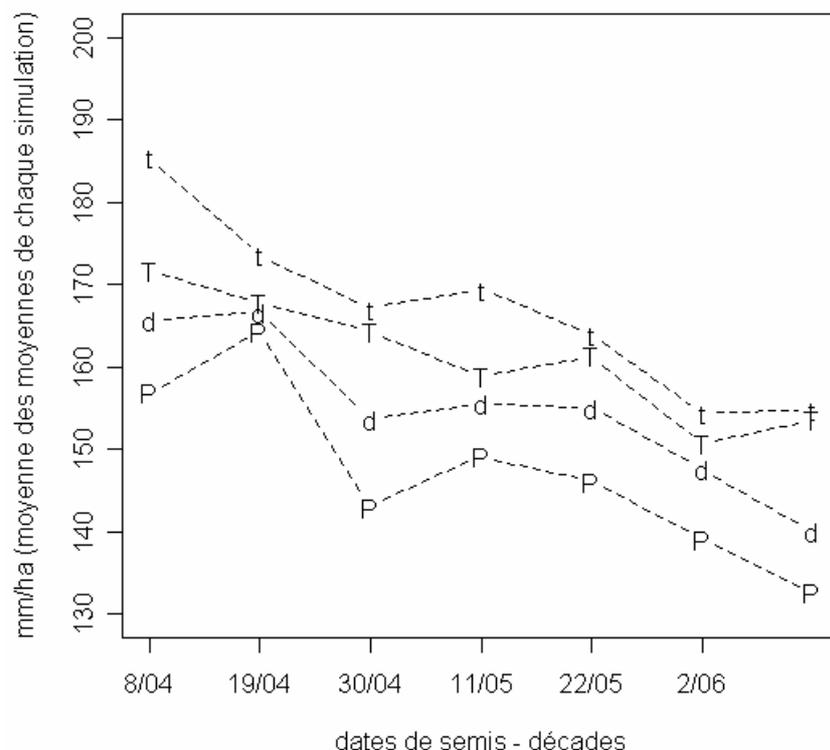
Les dates de semis et les groupes de précocités estimés ont un effet sur la quantité d'eau unitaire demandée : plus on sème tard, plus la quantité d'eau unitaire demandée diminue. Par exemple, la demande en eau unitaire pour une variété très tardive (t) semée la première décade d'avril est de 185 mm alors qu'elle n'est plus que de 155 mm quand elle est semée la première décade de juin. Cette tendance est identique pour les trois autres groupes de

précocité. Notons que l’inflexion pour les groupes de précocité demi tardif et demi précoces semées la décade du 19 avril est liée à la quasi absence de semis entre le 12 et le 28 avril (Figure 66). Pour des semis réalisés pendant une décade de semis donnée, les quantités d’eau demandées décroissent des variétés très tardives au variétés demi précoces. Par exemple, pour des semis réalisés la première décade de mai, les quantités d’eau pour les variétés très tardives, tardives, demi-tardives et demi-précoces sont respectivement 169, 160, 158 et 148 mm. Les différences entre groupes de précocité peuvent être parfois minimales (cas des variétés tardives (T) et demi-tardives (d) dans notre exemple). Il est possible que cela soit lié au climat 2005 et au faible nombre d’agriculteurs. Notons que les résultats sont également dépendants de la sensibilité du modèle biophysique de MODERATO aux dates de semis et à la précocité de la variété.



**Figure 66: Distribution des dates de semis estimées par SIMITKO**

### quantité d'eau selon les dates de semis et la précocité



**Figure 67: Quantité d'eau estimée selon les dates de semis et les groupes de précocité simulés**

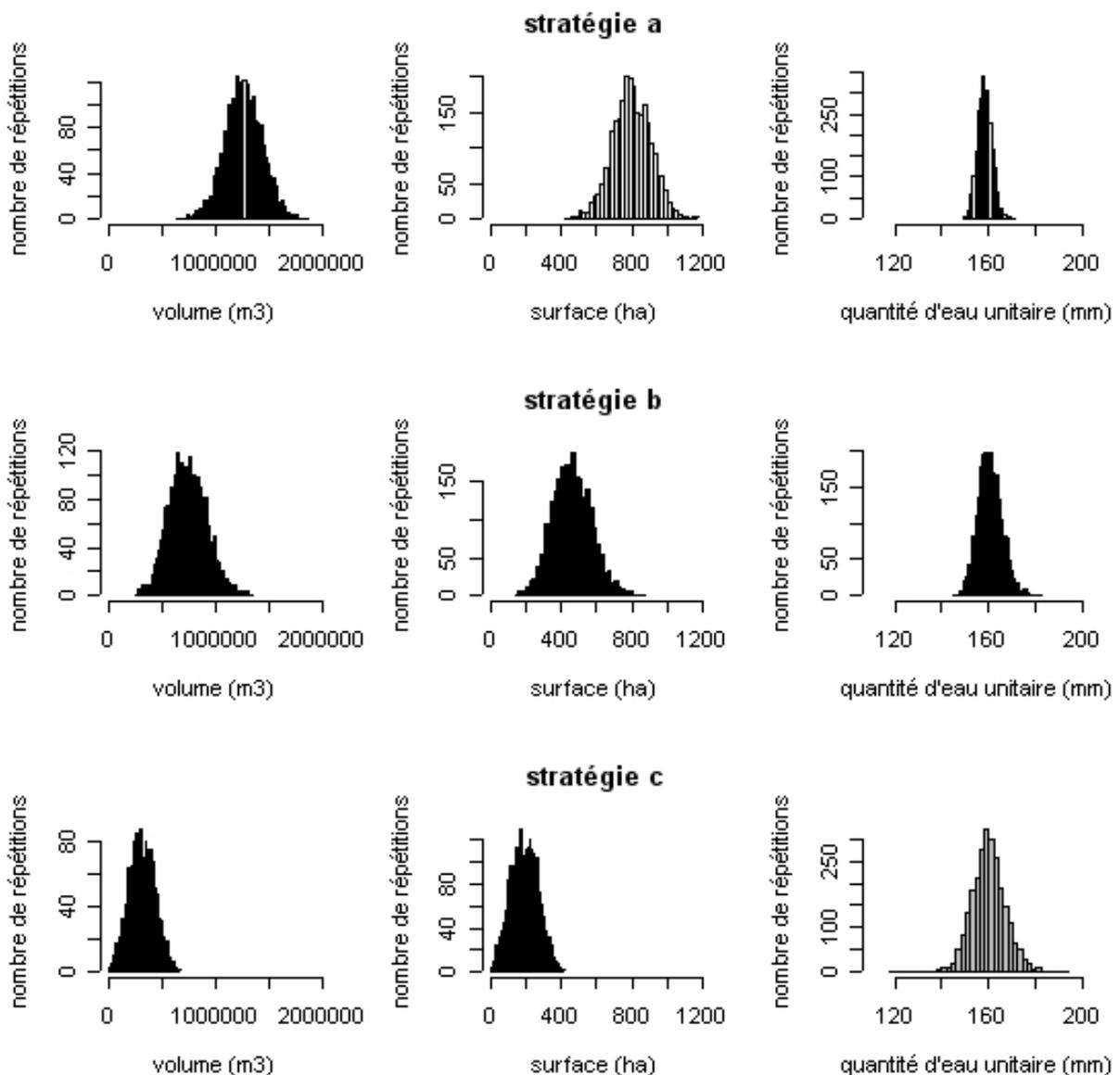
Ces résultats sont cohérents avec les connaissances éco-physiologiques sur les besoins en eau des différents groupes de précocité semés pour une date de semis donnée: plus la variété est tardive, plus ses besoins en eau sont élevés (Girardin, 1998). Pour un groupe de précocité donné semé à différentes dates, il n'existe pas à ma connaissance de données publiées sur la variation des besoins en eau en fonction de la date de semis. On peut supposer que le résultat est variable étant donné que la période de sensibilité au stress est décalée suivant la date de semis et ne peut être mise systématiquement en correspondance avec les mêmes conditions climatiques. Le modèle pourrait permettre d'explorer cette question sur des séries climatiques passées et représentant des situations de changement climatique et avec des stratégies d'irrigation optimisées ou non. Il pourrait ainsi permettre la comparaison de différents groupes de précocités semés à des dates différentes et fournir des données de référence telle que « 8 années sur 10, avec telle stratégie d'irrigation, une variété demi-précoce semée la troisième décade d'avril demande autant d'eau qu'une variété tardive semée la troisième décade de mai » ou « quantité d'eau demandée 8 années sur 10 par une variété tardive pour différentes dates avec telle stratégie » etc.

Le modèle pourrait permettre également d'identifier la période de pic de demande pour les différentes situations (dates de semis, précocités) envisagées ci-dessus. Cela pourrait alimenter les recherches menées actuellement sur les stratégies d'évitement consistant à semer tôt des variétés plus précoces qu'à l'accoutumée afin d'avancer les stades d'élaboration du rendement par rapport aux périodes de restriction d'eau (Lorgeou et al., 2006).

V.4.8.3.2 Effet des stratégies de semis et de choix de précocité

Afin d'analyser la demande en eau en fonction de la stratégie de semis et de choix de précocité, les distributions des volumes, des surfaces et des quantités d'eau unitaires pour les quadruplets correspondant à chaque stratégie ont été calculées pour 2500 répétitions (Figure 68).

Les volumes d'eau demandés pour les stratégies *a*, *b* et *c* sont respectivement 1 250 000, 750 000 et 250 000 m<sup>3</sup> en moyenne (Figure 68). Ils représentent respectivement 54%, 33% et 13% du volume moyen total. Pour les stratégies *a* et *b*, les écarts-types des distributions sont comparables (173 600 et 176 240) tandis que l'écart type de la distribution de la stratégie *c* est moins important (121 100).



**Figure 68: Distributions des volumes et des quantités d'eau unitaires pour chaque stratégie. Les résultats sont présentés de haut en bas pour les stratégies *a* à *c*.**

Ces différences peuvent s'expliquer par des quantités d'eau unitaires et des surfaces différentes. En moyenne, les surfaces couvertes par chaque stratégie *a*, *b* et *c* sont égales à 800, 450 et 200 ha. Elles varient respectivement entre 400 et 1 200 ha, 180 et 900 ha, et de

quelques hectares à 400 ha (Figure 68). En moyenne, les quantités d'eau unitaires des stratégies *a*, *b* et *c* sont égales à 160 mm mais avec des variabilités différentes autour de la moyenne (Figure 68). Pour la stratégie *a* on observe peu de variabilité de quantité d'eau unitaire tandis que pour la stratégie *c* on en observe plus. Pour la stratégie *b*, la variabilité autour de la moyenne est intermédiaire entre les deux autres.

SIMITKO-MODERATO est sensible aux dates de semis et aux groupes de précocité (cf ; § 7.3.1). Les stratégies sont définies par un nombre de groupes de précocité et une organisation du chantier de semis différents. Le fait que la quantité d'eau unitaire moyenne soit très faiblement sensible aux stratégies de semis et de choix de précocité nous amène alors à penser que la représentation de la variabilité intra stratégie grâce aux 2500 répétitions de SIMITKO induit une similitude de la dynamique de semis des différents groupes de précocité d'une stratégie à l'autre. Cela appelle des vérifications des sorties de SIMITKO.

#### **V.4.8.4 Eléments d'analyse de la sensibilité du modèle au nombre de répétitions de SIMITKO**

L'aspect stochastique du modèle mène à des résultats différents d'une répétition de SIMITKO à l'autre et ainsi à des distributions du volume d'eau différentes d'une répétition à l'autre après simulation par MODERATO. Nous analysons ici la sensibilité de la dynamique de semis des différents groupes de précocité (sortie de SIMITKO) et de la dynamique de la demande en eau (sortie de MODERATO) au nombre de répétitions de SIMITKO.

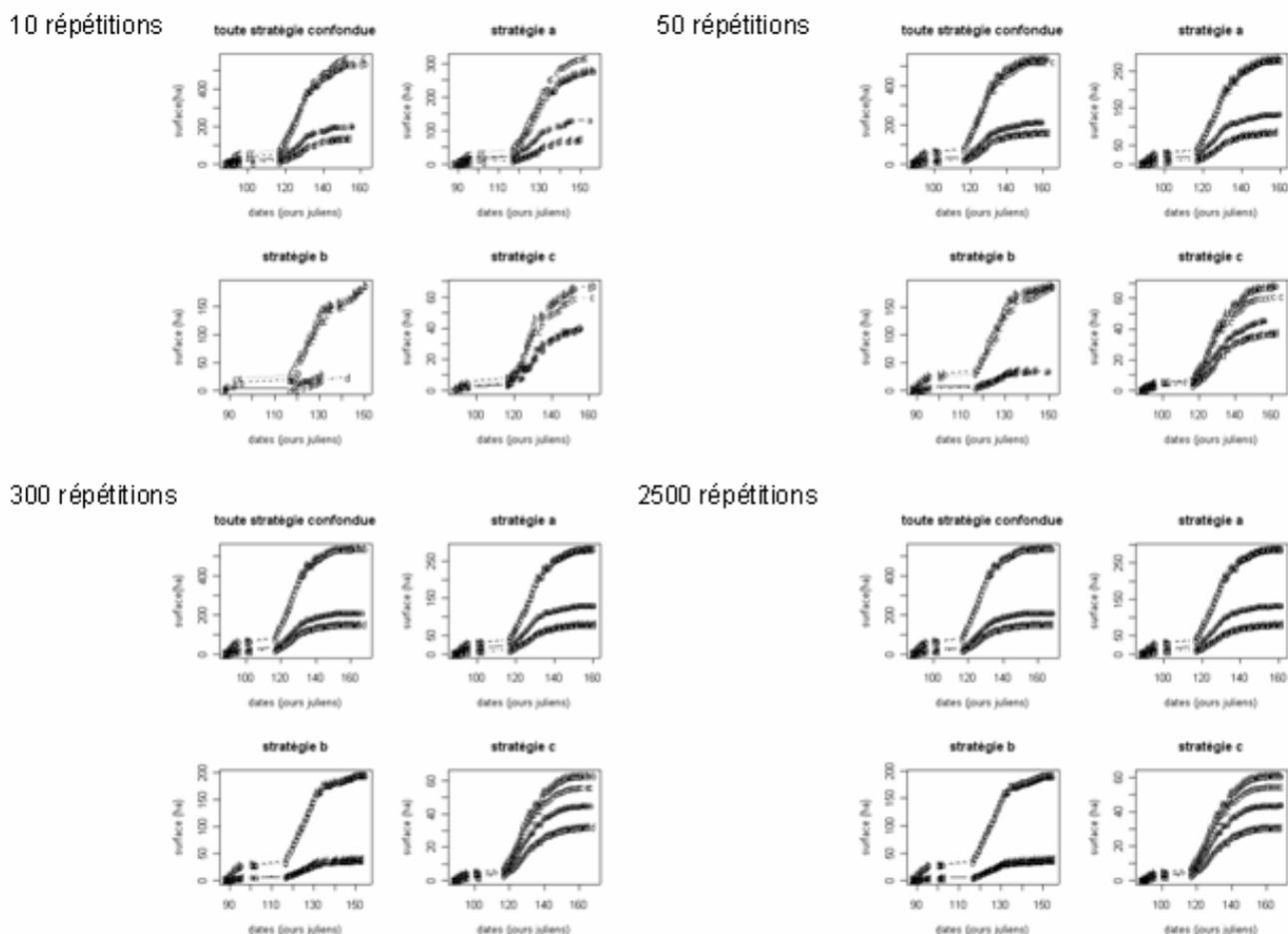
##### *V.4.8.4.1 Sensibilité de la dynamique de semis des différents groupes de précocité*

Afin de donner des éléments d'analyse sur la sensibilité de la dynamique de semis des différents groupes de précocité au nombre de répétitions de SIMITKO, nous avons représenté les dynamiques moyennes pour 10, 50, 300 et 2500 répétitions. Nous avons distingué quatre cas : le cas où toutes les données sont considérées (« toutes stratégies confondues »), puis les données correspondant à la stratégie *a*, à la stratégie *b* et à la stratégie *c* (Figure 69).

Dans l'ensemble, pour 10, 50, 300 et 2500 répétitions, les dynamiques des 4 cas sont très proches. Pour 10 répétitions, la dynamique « toutes stratégies confondues » est très proche de celles obtenues avec 50, 300 et 2500 répétitions. Les dynamiques des 3 stratégies *a*, *b*, *c* présentent peu de différences également selon le nombre de répétitions.

Ces résultats permettent de conclure que malgré l'aspect stochastique de la simulation des stratégies, elles engendrent des dynamiques moyennes de semis des groupes de précocité assez stable à partir de quelques répétitions (une dizaine).

D'une stratégie à l'autre, ces dynamiques sont très comparables par rapport aux dates de semis. De plus, pour chaque date de semis, on trouve tous les groupes de précocité quelque soit la stratégie. Enfin, les proportions des groupes de précocités en surface sont comparables également : les surfaces semées avec des variétés tardives et demi tardives prédominent devant celles semées avec des variétés très tardives puis demi précoces. Ceci peut expliquer que, malgré la sensibilité du modèle aux dates de semis et aux groupes de précocités des variétés, les stratégies impliquent en moyenne des quantités d'eau unitaires identiques.



**Figure 69: Dynamiques moyennes des semis de chaque groupe de précocité toutes stratégies confondues et pour chaque stratégie (cf. Annexe 16)**

#### V.4.8.4.2 Sensibilité de la dynamique de la demande en eau

Afin de représenter la variabilité de l'estimation du volume en fonction du nombre de répétitions, nous représentons la distribution cumulée des volumes pour différents nombres de répétitions (10, 100, 500, 1000, 1500, 2000) en effectuant cinq tirages au hasard du nombre de répétitions désirées parmi les 2500 répétitions effectuées avec SIMITKO. Ne connaissant pas a priori le nombre de répétitions nécessaires, cette analyse fournit des éléments de réponse pour une stabilisation de la distribution du volume d'eau demandé.

Pour le volume d'eau total consommé au cours de la campagne, les distributions se stabilisent entre 100 et 500 répétitions (Figure 70) : la distribution des volumes est pratiquement identique pour les 5 tirages des 100 répétitions. Dès  $N_{sim}=100$ , la gamme de volumes estimés (225 000-242 500 m<sup>3</sup>) est identique pour les 5 tirages. Pour  $N_{sim}=1000$ , 1500 et 2000 répétitions les distributions des volumes d'eau sont complètement stabilisées. Pour les distributions des volumes d'eau de la dernière décade de juillet, on trouve le même résultat : à partir de  $N_{sim}=100$ , les distributions paraissent stabilisées (Figure 71).

Il est cependant délicat de conclure pour les cas où  $N_{sim}$  est supérieur à 500 car les tirages ont été réalisés dans un échantillon de 2500 répétitions. Pour conclure il faudrait obtenir d'autres échantillons de 2500 répétitions. Ceci n'a pu être fait malgré une gestion semi-automatisée de MODERATO car le temps de réalisation du modèle est de 48h pour 2500 simulations de SIMITKO pour les 47 agriculteurs et ensuite, 8h de simulation de

MODERATO pour 20 000 quadruplets (soit 3 semaines pour l'ensemble des quadruplets en utilisant plusieurs ordinateurs).

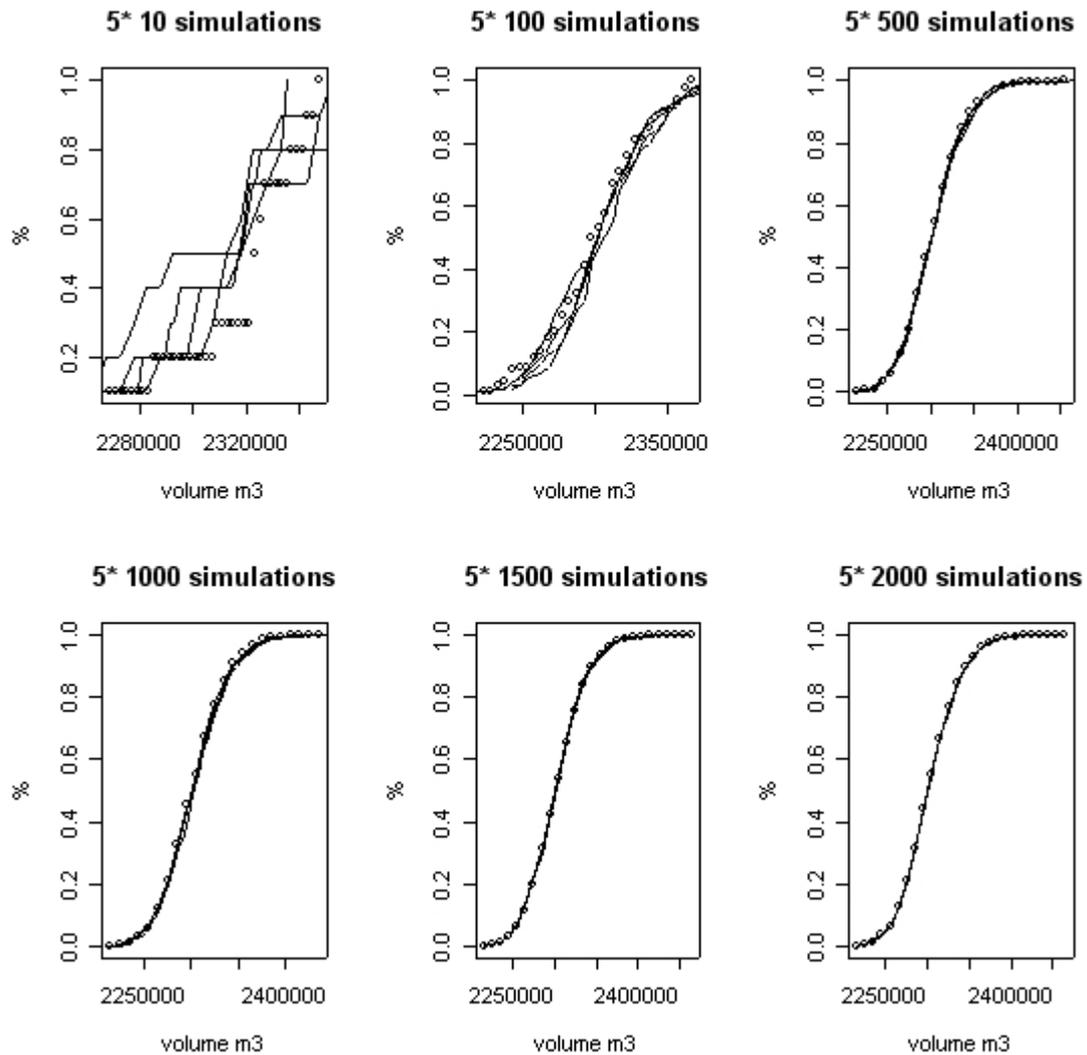
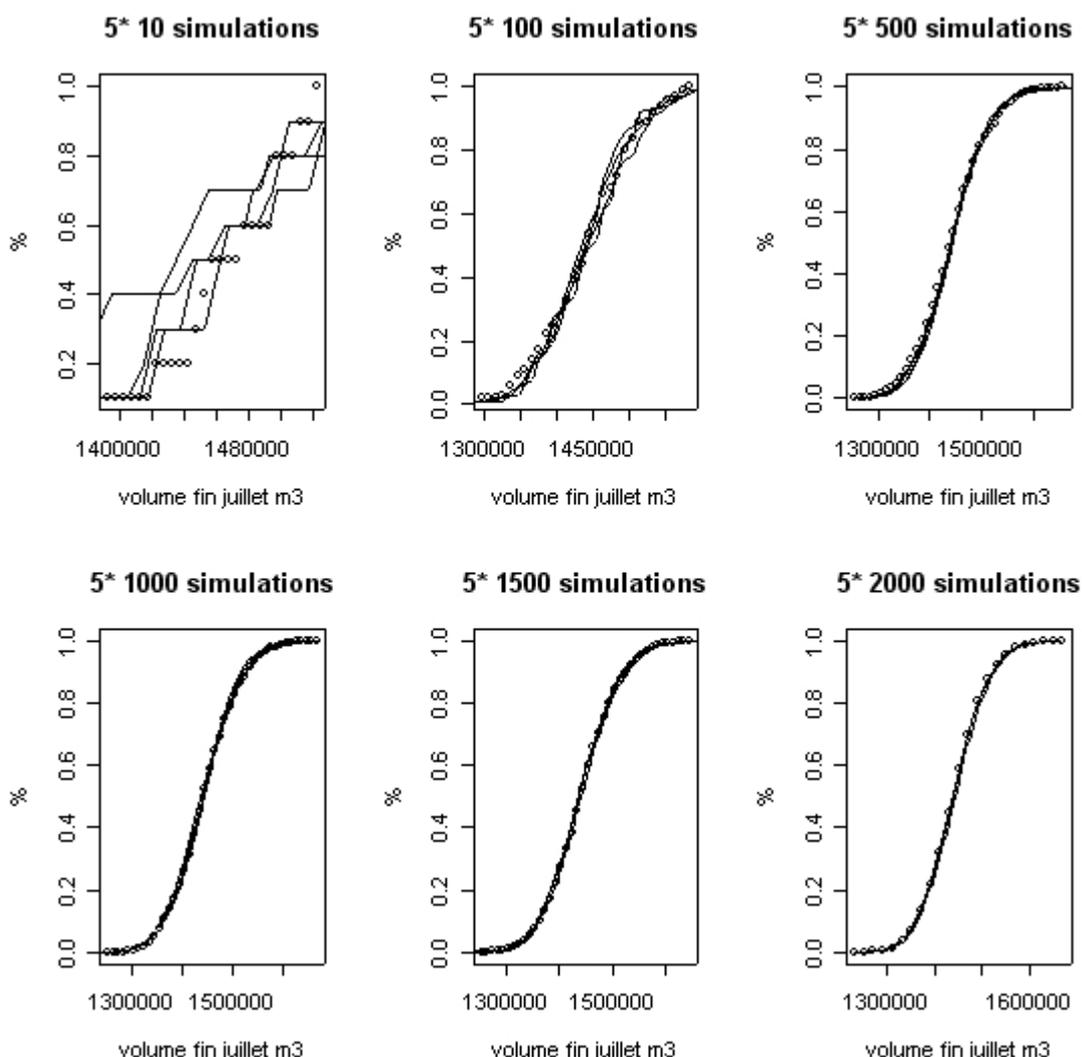
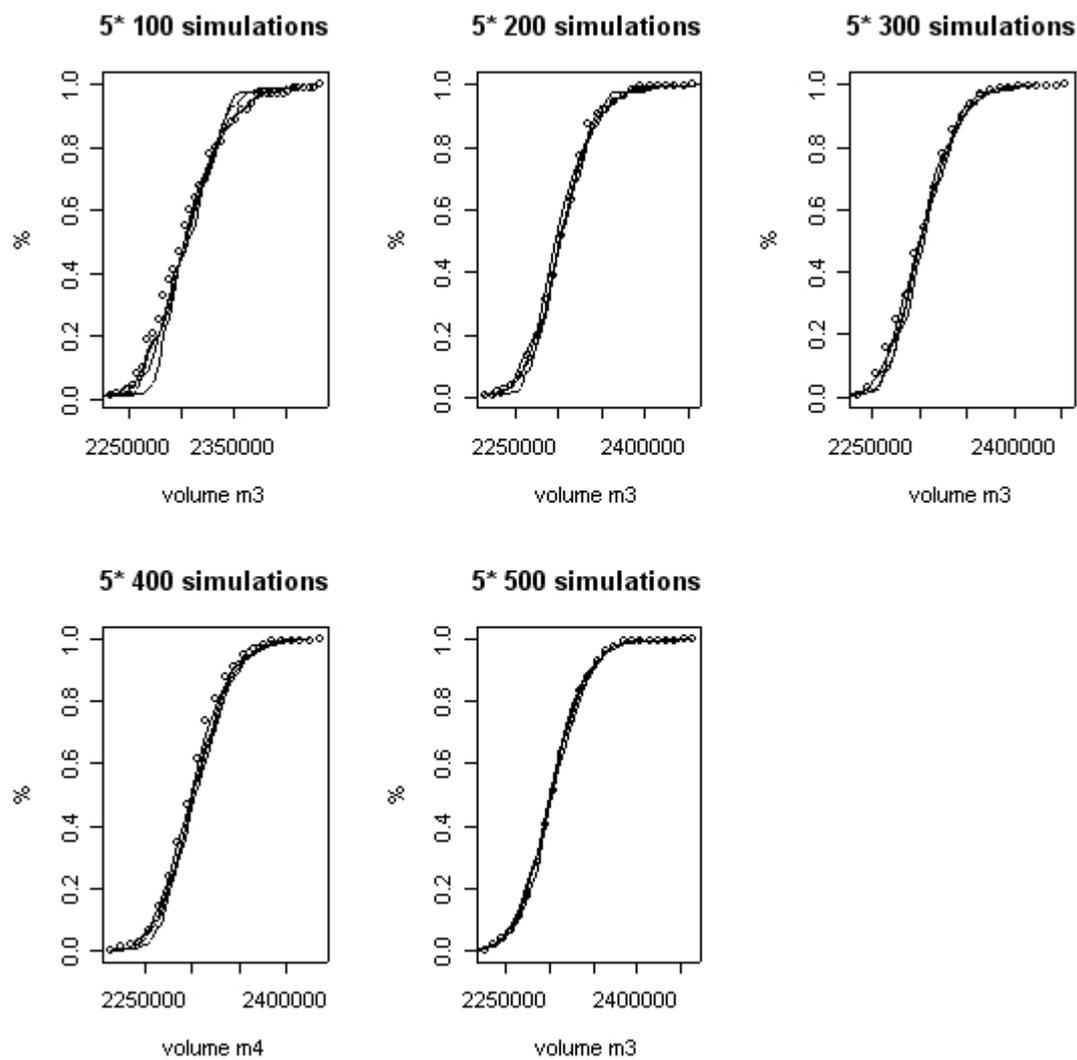


Figure 70: Distributions cumulées du volume final pour différents nombres de répétitions (10, 100, 500, 1000, 1500, 2000) pour 5 tirages aléatoires



**Figure 71 : Distributions cumulées du volume fin juillet pour différents nombres de répétitions (10, 100, 500, 1000, 1500, 2000) pour 5 tirages aléatoires**

Pour  $N_{sim} < 500$ , l'évolution des distributions de 100 à 500 répétitions (Figure 72) montre que 200 ou 300 répétitions peut être un choix pragmatique :  $N_{sim}=200$  ou 300 est d'une part un nombre de répétitions suffisant pour obtenir une estimation de la dynamique de la demande en eau stable et d'autre part un nombre de répétitions intéressant pour une réduction du temps de simulation.



**Figure 72: Distributions cumulées du volume total pour différents nombres de répétitions (100, 200, 300, 400, 500) pour 5 tirages aléatoires**

## VI. DISCUSSION - CONCLUSION GENERALE

Pour répondre à la question de la représentation et la simulation des pratiques culturelles à l'échelle régionale dans le but d'estimer la demande en eau d'irrigation, le modèle SIMITKO a été développé puis couplé à MODERATO. Dans ce chapitre, nous reviendrons sur la démarche de construction du modèle de représentation et de simulation des pratiques culturelles à l'échelle régionale puis nous discuterons de l'apport et des limites de ce modèle pour estimer la demande en eau d'irrigation en fonction de scénarios. Les atouts et limites mises en évidence ouvrent des perspectives de recherche.

### VI.1 Retour sur la démarche

#### VI.1.1 Analyser l'opportunité des pratiques culturelles pour en connaître les modalités et l'efficacité à l'échelle régionale

Les pratiques culturelles sont un des objets d'étude privilégiés de l'agronomie. L'étude des pratiques peut être structurée selon que l'on s'intéresse à l'opportunité, aux modalités ou à l'efficacité des pratiques (Landais et Deffontaines, 1990). En effet, classiquement les agronomes se posent deux grandes catégories de questions sur les pratiques (Gras et al., 1989) :

- La première concerne l'opportunité des pratiques: « Pourquoi, quand et comment l'agriculteur met-il en œuvre ses interventions techniques? » ; on recherche les facteurs influençant les décisions de l'agriculteur en s'appuyant sur les modalités des pratiques réalisées.
- La seconde porte sur l'efficacité des pratiques « Comment caractériser les états de l'écosystème cultivé résultant de sa dynamique propre et des interventions humaines ? » ; on s'intéresse alors aux conséquences des interventions techniques (décrites par leurs modalités) sur l'écosystème et le milieu.

Dans les deux cas, la connaissance des modalités des pratiques est centrale.

Mon travail avait pour objectif de développer une méthode d'estimation des modalités des pratiques sur un territoire. Cet objectif était guidé par la volonté de connaître l'impact des pratiques en systèmes maïsicoles sur la demande en eau du territoire : on se situait donc dans un questionnement sur l'efficacité des pratiques. Pour atteindre cet objectif, nous avons procédé à une analyse de l'opportunité des pratiques (identification de la diversité des pratiques culturelles étudiées, formalisation des pratiques culturelles sous forme de stratégies et recherche d'indicateurs des stratégies).

L'étude de l'opportunité des pratiques vise à identifier l'ensemble des déterminants des pratiques et peut déboucher sur l'élaboration de modèles d'action de l'agriculteur.

Les travaux portant sur l'identification des déterminants des pratiques font en général appel à des entretiens approfondis avec les agriculteurs (Attonaty et al., 1990; Aubry, 1995; Dounias, 1998; Mathieu et Joannon, 2003; Maxime et al., 1995). Ces déterminants peuvent en effet être des contraintes physiques et organisationnelles mais peuvent aussi correspondre aux conceptions que l'agriculteur possède sur son activité et son environnement (Darré, 1985), ou à des règles contractuelles (Navarrete et al., 1999), etc. Pour aller jusqu'à l'élaboration d'un modèle d'action de l'agriculteur, Cerf et Sébillotte (Cerf et Sébillotte, 1988) proposent une méthode basée sur l'observation de l'agriculteur et une demande d'explicitation « des raisons d'être de chacune des opérations culturelles qu'il effectue ».

Dans le travail de thèse, ce genre de démarche, basé sur quelques entretiens individuels, n'était pas adapté car s'il permet d'accéder à la diversité des pratiques et de leurs déterminants, il ne permet pas d'avoir une bonne estimation de la distribution de ces pratiques sur une vaste étendue : où se rencontrent-elles ? Et dans quelles proportions ? Or notre objectif ultime d'évaluation de l'efficacité des pratiques impliquait une telle estimation.

La connaissance des pratiques et de leur distribution spatiale peut se faire par enquête exhaustive ou par télédétection mais ces deux possibilités ont été abandonnées. A l'échelle régionale, une enquête exhaustive ayant pour vocation d'identifier les justifications des pratiques n'est pas réalisable étant donné le temps qu'elle implique (Biarnès et al., 2004). De plus, la démarche de la thèse ayant été pensée dans un souci de généralité, elle repose sur la contrainte implicite de mobiliser le moins possible d'enquêtes approfondies en exploitation (de type monographiques) et de se baser au maximum sur des données facilement accessibles à l'échelle régionale. La télédétection, qui peut permettre d'accéder à une photographie de certaines pratiques une fois réalisées (Launay et Guerif, 2005), ne convient pas dans le cadre prospectif que nous nous sommes fixés.

Afin de pouvoir simuler les pratiques en fonction d'un scénario décrivant les exploitations agricoles et leur environnement (climat, sol), mon travail d'analyse de l'opportunité des pratiques culturales a reposé sur l'analyse de deux types de déterminants :

- des déterminants permettant de décrire les pratiques culturales sous forme d'un ensemble de règles de décisions, correspondant à ce que je propose d'appeler « l'opportunité tactique » des pratiques culturales.
- des déterminants permettant de donner une description de la distribution spatiale des ensembles de règles de décision (correspondant à l'opportunité tactique) à l'échelle régionale. Ces déterminants ont été recherchés parmi les données facilement accessibles à l'échelle régionale. Ils sont identifiés parmi les données décrivant le système de production des exploitations. Je propose donc de parler d'analyse de l'« opportunité stratégique » pour cette étape.

Pour l'identification de l'opportunité tactique, les approches menées sur les pratiques d'irrigation et sur les pratiques de semis et de choix de précocité sont différentes :

- Pour les pratiques d'irrigation, les résultats de précédents travaux sur les modèles d'action ont été utilisés. Il s'agit de la formalisation des pratiques d'irrigation sous forme d'un ensemble de règles de décision identifiées à partir de d'enquêtes et d'expertise (Bergez et al., 2001; Leroy et al., 1996). Les règles de décision sont définies par des indicateurs (sol, plante), des seuils et des opérateurs qui définissent l'opportunité du démarrage de l'irrigation, de la gestion des tours d'eau, de l'arrêt en cas de pluie et de l'arrêt définitif de l'irrigation. Reprenant le vocabulaire utilisé par les développeurs de ce formalisme, j'ai appelé cet ensemble de règles de décision « stratégie d'irrigation »<sup>15</sup>. Le travail a donc consisté à utiliser ce formalisme et à identifier les valeurs des paramètres des règles. Nous avons utilisé des entretiens réalisés spécifiquement auprès d'un groupe d'irrigants et, afin de donner une représentation simplifiée de l'ensemble des variables décrivant les stratégies, des analyses multivariées et une classification ascendante hiérarchique ont été réalisées. Ainsi, dans ce cas, l'opportunité des pratiques avait une forme connue au préalable et sa détermination a consisté à paramétrer des règles à partir d'entretiens auprès d'un groupe d'agriculteur.

---

<sup>15</sup> Je reviens sur ce vocabulaire dans le § 1.2

- Pour les pratiques de semis et de choix de précocité, les travaux préexistants portaient essentiellement sur la détermination des jours disponibles pour le semis et sur la détermination du débit de chantier, données permettant d'estimer le nombre de jours nécessaires pour le semis d'une culture dans une exploitation agricole (Papy et Servetaz, 1986 ; Leenhardt et Lemaire, 2002). Le choix de précocité (combien de groupes de précocité, lesquels et avec quelle répartition spatio-temporelle dans la sole) n'avait pas été à notre connaissance l'objet de travaux de modélisation. Sa nature de « choix technique » réalisé en début de campagne et non « d'intervention technique », tel que le semis et l'irrigation, impliquait à la fois une analyse de l'opportunité stratégique et une analyse de l'opportunité tactique en lien avec le semis. Pour cette analyse, nous nous sommes basés sur la confrontation de différents types de données : des calendriers de semis d'une centaine d'irrigants au cours de trois années différentes, les pratiques recommandées par les conseillers des organismes d'approvisionnement et de stockage, et les données d'expertise sur l'opportunité stratégique et tactique des pratiques de semis qui avaient été utilisées pour développer le modèle SIMSEM (Leenhardt et Lemaire, 2002a). Les pratiques recommandées et l'expertise ont permis d'identifier des variables permettant de décrire les pratiques indépendamment du climat (par exemple, nombre de jours de semis, nombre de sessions, nombre de groupes de précocité etc). Celles-ci ont été établies à partir des calendriers obtenus par enquêtes postales pour chaque agriculteur et les agriculteurs ayant les mêmes combinaisons de variables ont été regroupés par analyses multivariées et classification. Ces groupes de variables ont été appelés « stratégies de semis et de choix de précocité ». Ainsi, dans ce deuxième cas, l'opportunité tactique des pratiques de semis et de choix de précocité est construite à partir des données concernant la modalité des pratiques. On remonte de la modalité à l'opportunité.

Pour l'analyse de l'opportunité stratégique, la démarche est comparable pour les pratiques d'irrigation et pour les pratiques de semis et de choix de précocité. Nous avons recherché des relations statistiques entre des données facilement accessibles à l'échelle régionale et les stratégies d'irrigation et de semis/choix de précocité identifiées. (Les stratégies de semis et de choix de précocité ne représentent pas réellement les stratégies des agriculteurs mais des combinaisons de pratiques permettant de représenter les effets des pratiques culturelles réelles au sein du territoire.) La recherche de données facilement accessibles à l'échelle régionale limite le type de données à analyser. Cela ne permet pas de prendre en compte des facteurs pouvant être réellement déterminants tels que les modes d'organisation des chantiers ou le type de semoir car ce ne sont pas des données enregistrées dans des bases de données régionales. Comme les stratégies ne représentent pas des stratégies réelles d'agriculteurs, il serait plus juste de parler d' « indicateurs » ou de « clefs de détermination » que de déterminants. Ces « indicateurs » sont les données les plus discriminantes des stratégies obtenues.

Ainsi, au final, les relations entre indicateurs et stratégies qui ont été obtenues relèvent d'une construction théorique permettant de donner une représentation de la réalité mais ne sont pas nécessairement des relations de cause à effet. En cela, cette approche est comparable à celle menée par le courant de recherche visant à concevoir des modèles de changement d'utilisation du territoire à des échelles régionales (Veldkamp et Lambin, 2001). Comme dans notre cas, les méthodes mobilisées permettent généralement de déterminer de manière empirique les déterminants de l'utilisation du territoire (et de quantifier le poids respectif des facteurs bio-géophysique et socio-économiques). Ces méthodes présentent l'avantage d'être facilement implémentées et, malgré l'absence de garantie des liens de cause à effet entre les facteurs et les modes d'utilisation des terres (de

Koning et al., 1999), elles permettent la simulation de scénarios quand les scénarios portent sur des facteurs bio-géophysiques ou socio-économiques.

Notons enfin que pour représenter les pratiques culturelles à l'échelle régionale, l'ensemble de la démarche d'analyse de leur opportunité repose sur des connaissances des pratiques acquises à l'échelle de la parcelle, de la sole ou de l'exploitation agricole. Le travail est basé sur l'articulation entre une approche des décisions individuelles et une approche régionale impliquant des simplifications.

### VI.1.2 Du concept d'itinéraire technique à celui de « stratégie » à l'échelle régionale

Pour décrire les pratiques culturelles, nous nous sommes basés sur le concept d'itinéraire technique avec notamment l'idée de tenir compte des interrelations entre interventions techniques (Gras et al., 1989; Meynard et al., 2001; Papy, 2001; Sébillotte, 1990). Le concept d'itinéraire technique présente un intérêt pour la simulation de scénario car la prise en compte des interrelations entre interventions techniques permet de reproduire le comportement adaptatif de l'agriculteur et de prendre en compte les contraintes qui expliquent que toutes les combinaisons de pratiques ne sont pas possibles.

Etant donné l'étendue spatiale considérée, l'itinéraire technique a été simplifié : nous nous sommes focalisés sur un choix technique, le choix de précocité des variétés, et deux interventions techniques, le semis et l'irrigation. Voyons comment les interrelations ont été identifiées et formalisées pour une représentation des itinéraires techniques à l'échelle régionale.

Compte tenu des données disponibles, l'irrigation a été analysée séparément des pratiques de semis et de choix de précocité. Les liens entre stratégie d'irrigation et stratégies de semis et de choix de précocité n'ont pas été directement analysés car seule une stratégie d'irrigation a été identifiée mais ils ont été recherchés lors des entretiens réalisés auprès des conseillers des O.A.S. et des agriculteurs. Les questions portaient alors sur la prise en compte des dates de semis et/ou des groupes de précocité semés pour le déclenchement et l'arrêt de l'irrigation. Il est apparu que le démarrage de l'irrigation était conditionné par les dates de semis car elles conditionnent le stade de développement de la plante et ainsi que ce lien pouvait être pris en compte à travers la simulation du développement de la culture par un modèle bio-physique. Il est apparu de plus que la précocité des variétés était prise en compte indirectement à travers le stade de développement de la plante pour le déclenchement et de manière plus explicite pour l'arrêt de l'irrigation. Mais dans l'ensemble, les réactions d'étonnement ou d'incompréhension à ce type de question laissent penser que ces liens ne sont pas consciemment réalisés ou explicités par les agriculteurs.

A partir des calendriers de semis observés, il n'a pas été possible de déterminer de liens de cause à effet entre dates de semis et la précocité des variétés. Par contre, les entretiens ont fait apparaître que les dates de semis et les précocités semées forment un système correspondant aux objectifs de production de l'agriculteur et à ses contraintes. Le choix de précocité se réalise avant le début de la campagne et peut être considéré comme un choix stratégique. Il est en général pris en fonction des dates de semis habituelles de l'agriculteur. Si la période de semis est un choix stratégique, les dates de semis proprement dites relèvent plutôt de décisions tactiques. Elles peuvent cependant être influencées par la précocité quand l'agriculteur a suffisamment de marge de manœuvre. L'objectif d'étalement de la récolte est apparu comme un élément structurant à partir des entretiens réalisés auprès des O.A.S. mais les deux stratégies permettant de l'atteindre (semis concentré autour d'une date de plusieurs groupes de précocité ou semis étalé d'un groupe de précocité), n'ont pas été identifiées telles quelles à partir des analyses statistiques. Ainsi, les liens entre le semis et le choix de précocité

sont pris en compte de manière implicite au sein des 3 stratégies identifiées statistiquement. Les stratégies de semis et de choix de précocité ne sont pas des règles de décision reliant mécaniquement le choix technique et l'intervention mais ce sont des combinaisons de variables. Ces stratégies peuvent donc être comparées à des combinaisons de pratiques (Cristofini et al., 1978) définies dans notre cas pour l'itinéraire technique.

L'itinéraire technique que nous décrivons par les deux stratégies est donc une construction théorique permettant de reproduire l'effet des liens entre les opérations culturales. En cela, il peut être comparé à la logique d'action décrite pour « reproduire l'effet des processus de décision de l'agriculteur dont l'agriculteur n'a pas forcément conscience » (Papy, 1999).

Cette représentation des interrelations entre le semis et les choix de précocité peut présenter des limites pour la simulation de scénarios. Par exemple, l'évaluation des résultats de simulation de SIMITKO sur l'année 2005 montrent que les surfaces des groupes de précocités très tardifs et demi-tardifs sont surestimées au dépend des surfaces des variétés tardives. Cela peut être dû au fait que les stratégies de semis et de précocité sont des combinaisons de variables simulées de manière quasi-indépendantes dans SIMITKO. Cela amène à se demander si, maintenant que de grands types de stratégies de semis et de choix de précocité ont été identifiés à l'échelle régionale, il serait possible d'identifier des agriculteurs représentatifs de ces stratégies afin de mener une analyse compréhensive de leurs itinéraires techniques et d'identifier des règles de décision individuelles explicites.

La terminologie de « stratégie » mérite d'être discutée. Une stratégie est en effet un ensemble de règles qui, compte tenu de contraintes, permet d'atteindre un objectif. Concernant les règles de décision décrivant l'irrigation, la règle de durée du tour d'eau a pu être mise en relation avec une contrainte matérielle (la capacité théorique d'irrigation) mais les groupes de règles n'ont pas pu être mis en relation avec des contraintes d'exploitation et un objectif de production. L'ensemble de règles décrivant l'irrigation permet de décrire l'opportunité dite « tactique » des pratiques. On pourrait plus justement dans ce cas parler de « conduite de l'irrigation » que de « stratégie d'irrigation ». Les combinaisons de variables décrivant les pratiques de semis et de choix de précocité indépendamment du contexte climatique ont pu être mises en relation avec des données décrivant de manière simplifiée un système de production (SAU, part de surface irriguée dans la SAU, part de maïs dans la SAU et présence d'un atelier d'élevage ou non). Parmi cet ensemble de variables, trois sont utilisées par les services statistiques agricoles de Midi-Pyrénées pour décrire les systèmes de grande culture (Agreste, 2004). Elles traduisent des contraintes et un objectif de production. Par contre, comme les stratégies sont possibles quelque soit la combinaison de variables décrivant le système de production, une stratégie de semis et de choix de précocité ne correspond pas à un unique ensemble de contraintes et d'objectif de production. Un terme plus exact que « stratégie » serait donc dans notre cas « combinaisons de pratiques de semis et de choix de précocité ».

### VI.1.3 Influence de l'échelle sur la démarche adoptée

Dans notre travail, l'échelle spatiale d'estimation de la demande en eau est l'échelle régionale car pour un gestionnaire, c'est une problématique qui se raisonne à cette échelle. Dans notre cas d'étude, cela correspond à un espace de plusieurs centaines de km<sup>2</sup> et comprenant environ 500 exploitations agricoles produisant du maïs grain irrigué.

Dans la modélisation, nous prenons en compte deux couches d'informations pour la détermination de la distribution spatiale des pratiques : l'exploitation agricole et le maillage climatique en point de grille. Les indicateurs des stratégies de semis et de choix de précocité que nous avons identifiés permettent une description simple des systèmes de production,

système relevant de la micro-économie de l'exploitation et pouvant être définis comme « la combinaison des productions et des facteurs/moyens de production de l'exploitation » (Gras et al., 1989). Les indicateurs identifiés ne donnent pas une description précise des différents systèmes de culture présents dans les systèmes de production mais, en estimant la part de maïs grain dans la SAU ou la part de surface irriguée dans la SAU, ils permettent de prendre en compte l'interdépendance des systèmes de culture (Papy, 2001). La couche formée par le maillage climatique en point de grille permet de décrire les conditions météorologiques qui déterminent les calendriers de semis et d'irrigation, une fois les stratégies fixées.

Nous avons exploré d'autres couches d'information telles que les types de sol, la topographie, l'appartenance à un bassin d'approvisionnement d'un organisme d'approvisionnement et de collecte mais nous n'avons pas pu identifier de liens suffisamment robustes avec les pratiques culturales. Elles n'ont donc pas été retenues dans la modélisation.

L'impact des variables macro-économiques et en particulier du prix de l'eau n'a pas été analysé. Nous avons supposé que dans le contexte de l'étude, le prix de l'eau n'était pas déterminant des pratiques culturales mais des choix stratégiques des irrigants et que l'analyse des déterminants liés au système de production permettait de prendre implicitement en compte l'impact du prix de l'eau. Pour ce choix, nous nous sommes basés sur les analyses de Montginoul (1998) qui ont montré qu'en contexte très subventionné, le prix de l'eau n'est pas très incitatif pour les agriculteurs. Cette hypothèse mérite d'être discutée pour la simulation de scénarios. Nous y revenons dans la partie 2.2.2.

L'analyse qualitative des déterminants des pratiques de semis et de choix de précocité a montré que de nombreux déterminants des pratiques ne font pas partie des données régionales sur les exploitations agricoles. Ces déterminants relèvent en effet en général de contraintes organisationnelles, dans les exploitations et entre exploitations, qui ne sont pas géoréférencées. Or l'enregistrement de ces données permettrait de mobiliser des indicateurs reliant de manière plus mécaniste et moins empirique le contexte agricole aux pratiques culturales. Ce type d'analyse des déterminants pourrait donc alimenter les observatoires de pratiques qui se mettent en place actuellement dans le cadre de projets ADAR et ADD sur des territoires où un problème de gestion quantitative de l'eau se pose (Benoit, 2005). Ces observatoires cherchent en effet à « inventorier les variables et les indicateurs appropriés à chaque système de production, permettant une approche des déterminants, des modalités et des effets des pratiques agricoles et des systèmes de production sur leur environnement physique et socio-économique » (Benoît, 2005).

On peut se demander si les résultats obtenus par rapport aux couches d'information mobilisées sont directement liés à l'étendue considérée et si les mêmes niveaux d'information seraient mobilisés si nous cherchions à simuler la diversité des pratiques culturales sur un espace plus vaste, comme le système Neste par exemple (12 000 km<sup>2</sup>) ou le bassin Adour-Garonne. Dans les travaux sur les changements d'usage des terres, les facteurs de changement d'utilisation des terres dépendent des échelles auxquelles on travaille : à l'échelle de l'exploitation, ce sont des facteurs sociaux et d'accessibilité aux terres, à l'échelle « locale » (paysage), ce sont la topographie et le potentiel agroclimatique et à l'échelle régionale (y compris nationale etc), ce sont le climat, des variables macroéconomiques et démographiques (Veldkamp et Lambin, 2001). On peut effet penser que passer à un espace plus vaste que la zone de la Baïse-Amont ferait apparaître des situations plus contrastées par rapport au climat, aux types de sol, aux systèmes de production, à la ressource en eau etc. et que des itinéraires techniques plus divers pourraient exister. Néanmoins, pour cela, peut-être faudrait-il revoir la façon dont nous avons décrit les pratiques. En effet, dans le travail de thèse, on est à une échelle intermédiaire entre « l'échelle locale » et « l'échelle régionale » de Veldkamp et

Lambin (2001) mais il n'a pas été possible d'identifier la topographie et le potentiel agroclimatique comme facteurs déterminants des « stratégies de semis et de choix de précocité » ni des « stratégies d'irrigation ». Cela peut être dû à notre choix de décrire les pratiques par des « stratégies » à l'échelle de la sole de maïs grain, choix lui-même lié à la volonté de simuler des scénarios portant sur l'évolution des exploitations. L'exploitation agricole est en effet l'unité de décision qu'étudient les analystes des politiques publiques appliquées à l'agriculture et l'environnement (McGregor et al., 2001). Une description plus détaillée des pratiques par blocs de parcelles voire par parcelle aurait peut être permis de prendre plus explicitement en compte la gestion territoriale des pratiques au sein des exploitations (Le Ber et Benoît, 1998) et ainsi d'identifier des facteurs déterminants différents, et en particulier non exclusivement rattachés à la structure des exploitations agricoles. Cet essai de description des pratiques aurait permis une réelle comparaison du travail mené pendant la thèse et des travaux sur l'usage des terres. Peut être Il n'est pas certain cependant qu'il aurait permis de simuler des scénarios portant sur les exploitations agricoles.

## **VI.2 Apports, limites et propositions d'amélioration du modèle**

### **VI.2.1 Pour le diagnostic de l'existant**

#### **VI.2.1.1 Une représentation correcte de l'existant intégrant une représentation de la variabilité de la demande régionale en eau...**

Pour estimer la demande en eau, la simulation des pratiques (du moins d'irrigation) est incontournable car la demande en eau régionale est calculée par agrégation des montants utilisés par chaque agriculteur pour son irrigation. La question qu'on peut alors se poser est de savoir jusqu'à quel détail de représentation des pratiques il faut aller : simuler les pratiques d'irrigation seulement ou l'ensemble des pratiques culturales ? Notre hypothèse est que les pratiques sont liées (cf. concept d'itinéraire technique) et que si un scénario joue sur une pratique, il aura un impact sur les autres. Nous avons donc retenu de représenter les pratiques ayant le plus d'influence sur la demande en eau d'irrigation par l'agriculteur.

SIMITKO-MODERATO permet la simulation des pratiques de semis (en prenant en compte le choix de précocité) et des pratiques d'irrigation. La simulation des pratiques de semis est stochastique tandis que celle des pratiques d'irrigation a été choisie déterministe dans un premier temps afin de pouvoir évaluer l'apport de SIMITKO par rapport à un autre modèle (ADEAUMIS) entièrement déterministe et dans lequel la date de semis et la précocité des variétés sont uniformes pour la région (Leenhardt et al., 2005). Ce modèle déterministe fait l'objet de validation (Leenhardt et al., 2004b) et est actuellement utilisé par le gestionnaire (ce qui constitue une validation par « l'usage ») (Le Bars, 2005). Les résultats d'ADEAUMIS et ceux de SIMITKO-MODERATO sur 2005 étant très proches, cela constitue une validation partielle de SIMITKO-MODERATO.

Le caractère stochastique de SIMITKO permet d'obtenir des prédictions de demande en eau (totale et au cours de la saison) sous forme de distribution. Cela permet d'accéder non seulement à des prédictions moyennes mais également aux valeurs d'écart types associés. En 2005, l'écart type de demande en eau totale est égal à 33680 m<sup>3</sup>, ce qui correspond à un faible coefficient de variation par rapport au total (2,3 Mm<sup>3</sup>). Cela peut être expliqué par des conditions climatiques ayant retardé et groupé les semis, amenant ainsi à une homogénéisation des pratiques. Pour vérifier l'influence des pratiques et de leur diversité au sein de la zone d'étude sur la demande régionale en eau, une analyse sur plusieurs années aux conditions météorologiques contrastées serait nécessaire.

La variabilité de la demande régionale en eau représentée est double :

- une variabilité due à la diversité des pratiques culturelles. Connaître cette variabilité de la demande en eau peut présenter un intérêt pour les gestionnaires quand ils sont amenés à prendre des décisions sur la création de ressource. Ils peuvent par exemple ainsi avoir le choix d'assurer la satisfaction de la demande en eau de la moyenne ou dans 80% des cas. Par ailleurs, les queues de distribution de la quantité d'eau unitaire peuvent permettre de révéler aux gestionnaires des pratiques peu consommatrices pouvant servir d'exemple et des pratiques très consommatrices que des conseils ciblés pourraient limiter.
- une variabilité spatiale. Dans le modèle actuel, la représentation de cette variabilité est faite sur la base d'exploitations réelles géoréférencées par rapport à une commune. Elle peut également être faite à partir d'une base communale en utilisant la base de données du RGA. L'utilisation d'une typologie d'exploitation est possible (et permet par ailleurs une diminution du temps de simulation) ; la base de représentation (unité de support) serait alors celle de la typologie (PRA si la typologie régionale SICOMORE est utilisée). La représentation de cette variabilité spatiale permet au gestionnaire une localisation des pratiques économes et des pratiques très consommatrices.

#### **VI.2.1.2 ... mais des améliorations sont possibles**

L'évaluation du modèle a notamment montré qu'il présente certaines limites dans l'estimation de la part de surface des différents groupes de précocité. Les différences d'estimation de la part en surface des différents groupes de précocité entre données observées et simulées peuvent être dues à une prise en compte insuffisante de l'impact de la variabilité interannuelle du climat dans les choix de précocité. Elles peuvent être dues également à des règles sur les dates de semis possibles de différents groupes de précocité.

##### *VI.2.1.2.1 Une plus grande prise en compte de la variabilité climatique interannuelle*

Nous avons supposé que les stratégies de semis et de choix de précocité sont indépendantes du climat de l'année. Cela concerne la durée du chantier et le nombre de groupes de précocité. Par contre, les dates effectives de semis sont déterminées en fonction des jours disponibles. Le type de précocité est fixé par des distributions de groupes de précocité en fonction de la localisation de l'exploitation.

Une analyse des distributions des groupes de précocité dans les PRA de la zone en fonction du climat sur un nombre suffisamment grand d'années permettrait de déterminer des règles d'adaptation des choix du groupe de précocité au climat de l'année. On peut se demander par ailleurs si l'hypothèse de stabilité de la stratégie de semis et de choix de précocité est valable quelque soit les conditions météorologiques. Les agriculteurs gardent-ils la même organisation en cas de semis trop retardés par exemple ? Etant donné que le modèle repose sur l'agrégation de processus individuels, ces questions pourraient faire l'objet d'une enquête auprès de quelques agriculteurs représentatifs.

##### *VI.2.1.2.2 Représenter la variabilité des règles de décision d'irrigation*

Dans le temps imparti à la thèse, il a été choisi de simuler une conduite de l'irrigation de manière déterministe afin d'explorer la sensibilité de la demande en eau aux pratiques de semis et de choix de précocité. Etant donné l'aspect déterminant de la conduite d'irrigation sur la demande en eau, ce choix peut s'avérer limitant. Lors de notre étude sur les stratégies

de l'irrigation, la conduite identifiée présentait une importante variabilité pour certaines règles (« arrêt en cas de pluie », « arrêt entre deux tours d'eau ») qu'une simulation stochastique permettrait de représenter. Nous avons tous les éléments pour le faire. Reste à programmer les tirages aléatoires.

Certains irrigants de la zone ont contracté un CTE qui impose de ne pas dépasser 150 mm d'eau consommée par an sur maïs. Pour cela, ils raisonnent leur irrigation différemment, en cherchant à placer leurs trois tours d'eau de 30 mm au meilleur moment (Salles, 2003). D'autres conduites de l'irrigation pourraient donc être prises en compte. Encore faut-il avoir une estimation de l'importance de ces pratiques sur la zone d'étude. Des travaux menés dans le but d'identifier des pratiques d'irrigation diverses et d'estimer leur représentativité au sein du système Neste ont été menés sans succès dans le cadre du projet ADEAUPI (Leenhardt et al., 2005).

#### *VI.2.1.2.3 Approfondir l'analyse de l'impact des stratégies de semis et de choix de précocité sur la demande unitaire en eau*

Les stratégies de semis et de choix de précocité ont été déterminées à partir de données observées. Ces données révélaient une grande diversité d'associations {date, précocité}, notamment pendant la période où la majorité des surfaces sont semées (entre 20 et 80% des surfaces). La simulation stochastique de cette diversité conduit, après une dizaine de répétitions du modèle, à ce que, pour une même date, toutes les précocités soient semées (même si elles le sont dans des proportions différentes). On peut se demander si ce phénomène explique le peu de différences de demande en eau unitaire observées pour les trois stratégies de semis et de choix de précocité. Afin d'approfondir l'impact des stratégies de semis, estimer la variation de demande en eau qu'impliquerait une modification de leur distribution spatiale et juger de l'intérêt d'avoir décrit la diversité des pratiques culturales de semis et de choix de précocité pour l'estimation de la demande régionale en eau, des analyses complémentaires, assorties d'une analyse de sensibilité du modèle, s'avèrent nécessaires.

### VI.2.2 Pour l'évaluation de scénarios prospectifs

#### **VI.2.2.1 Un modèle permettant la simulation de scénarios climatique et « socio-économique »...**

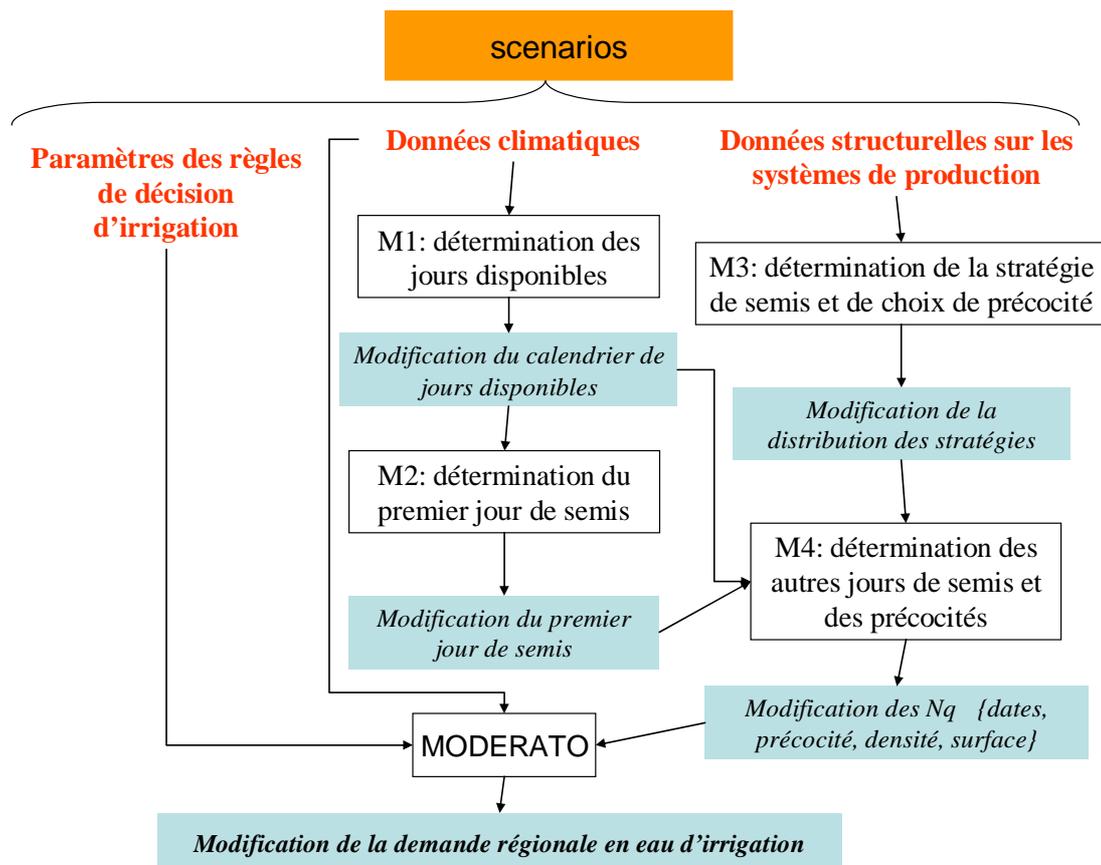
Nous avons vu que les données d'entrée de SIMTKO-MODERATO sont :

- les indicateurs des stratégies de semis et de choix de précocité. Ce sont des données décrivant le système de production des exploitations de manière simple : la SAU, le pourcentage de surface irriguée dans la SAU, le pourcentage de maïs grain dans la SAU et la présence d'un atelier d'élevage ou non.
- les fichiers climatiques en point de grille pour une année
- des données d'entrée spécifiques à MODERATO concernant le contexte d'irrigation et les paramètres des règles de décision de la stratégie d'irrigation.

En considérant qu'un scénario peut être traduit ou défini par les modalités des données d'entrée du modèle (Cordier, 2004), SIMTKO-MODERATO peut permettre la simulation de scénarios climatiques, de scénarios sur l'évolution des stratégies d'irrigation et de scénarios sur l'évolution de la structure des exploitations agricoles que nous nommerons scénarios « socio-économiques ».

La figure illustre comment les scénarios peuvent faire varier la demande en eau régionale. Des modifications des conditions météorologiques devraient faire varier les calendriers de jours disponibles et en conséquence impliquer des modifications des quadruplets {date, précocité, densité, surface} qui eux même peuvent avoir des conséquences sur les calendriers d'irrigation et la demande en eau. Des modifications des paramètres de la stratégie d'irrigation devraient impliquer directement des modifications de calendriers d'irrigation et de demande en eau. Enfin, des modifications des variables décrivant les systèmes de production devraient impliquer une modification de la distribution des stratégies de semis et de choix de précocité.

Notons qu'en plus de la demande en eau, le modèle permet d'estimer le rendement et la marge brute unitaires. L'évaluation des scénarios peut donc porter sur plusieurs critères.



**Figure 73 : Illustration de l'impact potentiel des scénarios**

La perspective de simuler des scénarios climatiques s'avère particulièrement intéressante dans le cadre du changement climatique. Puisqu'il est attendu une modification de la durée du cycle cultural et la réduction de nombre de jours disponibles pour les travaux de printemps (Delécolle et al., 1999; Seguin, 2004), cela devrait conduire à une variation de la demande régionale en eau d'irrigation. On pourra simuler des années extrêmes ou utiliser des séries climatiques simulées pour des conditions futures par les climatologues.

Dans le cadre de la réforme de la politique agricole commune et de l'application de la directive cadre européenne sur l'eau, le modèle peut permettre de simuler des scénarios d'évolution des assolements émergeant de modèles d'optimisation économique sous contraintes (par exemple, (Boussemart et al., 1996; Leroy et al., 1996; Louhichi et al., 2004)). Par la simulation du comportement économique optimum des exploitants, ces modèles permettent d'estimer les superficies irriguées des différentes cultures compte tenu du système de prix et de la politique agricole. Leur utilisation à l'échelle régionale est possible grâce aux

bases de données agricoles exhaustives de type RICA, RGA ou aux déclarations PAC. La simulation de ces modèles à l'échelle régionale peut également reposer sur l'utilisation de typologies d'exploitations (Rounsevell et al., 2003).

Des scénarios indépendants des sorties d'un modèle économique peuvent également être envisagés. Il peut s'agir par exemple de tester l'impact de restrictions de l'usage de l'eau grâce aux fonctionnalités du modèle MODERATO (Bergez et al., 2002b) ou de simuler l'impact du passage de la monoculture de maïs à des rotations maïs/maïs/blé ou maïs/blé ou maïs/triticales pouvant être favorisées par des mesures de diversification de l'assolement prévues par la réglementation européenne (Cultivar hors série, 2005). La simulation des différents assolements possibles permettra d'estimer la variation de demande en eau une année donnée suite à de telles mesures.

Dans un cadre normatif, des scénarios basés sur des stratégies d'irrigation optimisées par rapport à des critères économiques pourraient également être envisageables (Bergez et al., 2004).

#### **VI.2.2.2 ... sous réserve d'améliorations**

Le modèle SIMITKO-MODERATO est un modèle empirique assez dépendant du jeu de données utilisé pour l'élaborer. Ce jeu de données correspond aux pratiques observées sur 4 années (2000, 2001, 2003, 2004). Depuis 2003/2005, une évolution du contexte de la production irriguée dans les zones sensibles aux risques de pénurie est perceptible. En 2005, les agriculteurs se sont adaptés à la pénurie d'eau annoncée en réduisant les surfaces de maïs et en adoptant des pratiques spécifiques, telles que le semis de variétés plus précoces. En 2006, dès la fin janvier-début février, la Ministre de l'Ecologie a demandé aux préfets de réunir les instances de concertation départementales afin de faire un état des lieux des ressources et de sensibiliser aux risques de pénurie estivale. Cela a poussé la CACG à avancer le calendrier des réunions de Commissions de gestion par rapport aux autres années afin de sensibiliser les usagers de l'eau.

Pour la simulation de scénarios avec notre modèle, ce contexte changeant amène trois perspectives d'améliorations : (i) l'identification des points de rupture, c'est-à-dire les états du système où un changement de règles s'imposerait, (ii) une analyse de la sensibilité potentielle des pratiques au niveau de ressource en eau et (iii) une recherche sur l'impact des changements de contexte sur la conduite de l'irrigation, définie par notre ensemble de règles de décision.

##### *VI.2.2.2.1 Identifier les « points de rupture »*

Les limites du modèle et la perspective de son usage pour la simulation de scénarios amènent à s'interroger sur la délimitation du contexte dans lequel il peut être utilisé. Après avoir acquis suffisamment de connaissance sur les variables à prendre en compte et les liens entre elles, ne faut-il pas identifier les « points de rupture » ?

Certaines périodes sont caractérisées par l'obsolescence des pratiques courantes, l'apparition de « nouvelles »<sup>16</sup> pratiques, liées à une innovation technique par exemple, et ainsi l'apparition de nouveaux déterminants de pratiques. Quand le modèle repose sur des

---

<sup>16</sup> Notons que parfois, ce que nous appelons « nouvelle pratique » n'est pas nouveau pour un agriculteur ayant une certaine expérience et peut être plutôt du ressort de l'adaptation des pratiques. Un agriculteur ayant connu la sécheresse de 1976 a pu utiliser son expérience pour adapter ses pratiques en 2003 ou 2005 par exemple. La différence entre nouveauté et adaptation est relative.

règles individuelles bien identifiées, une recherche participative basée sur l'utilisation de jeux de rôles peut être mise en œuvre pour appréhender et simuler les périodes de ruptures (Barreteau et al., 2004). Dans notre cas, cela pourrait être utilisé pour la partie simulant la conduite de l'irrigation. Pour les pratiques de semis et de choix de précocité et le lien entre ces pratiques et la conduite de l'irrigation, étant donnée leur nature fictive, une méthodologie serait peut être à aménager.

#### *VI.2.2.2 Rendre le modèle sensible au niveau de la ressource en eau*

Dans la perspective de scénarios de changement climatique, le fait que le modèle ne soit pas sensible à la ressource en eau peut présenter une limite importante. Tenir compte de la ressource donnerait en outre une plus grande généralité au modèle.

Le modèle actuel ne tient pas compte de la ressource en eau car il a été élaboré pour une zone d'étude située au sein du système Neste peu contrainte par la ressource mais pour laquelle les années 2003 et 2005, considérées comme les prémices du changement climatique, ont révélé une fragilité potentielle du système d'approvisionnement en eau<sup>17</sup>. Il est donc possible que les irrigants de la zone aient d'avantage conscience, depuis, de la fragilité de la ressource et en tiennent compte de manière plus systématique dans leurs choix.

Pour rendre le modèle sensible à la ressource, une recherche pour spatialiser la partie « contexte d'irrigation » de MODERATO pourrait être menée. Le contexte d'irrigation se définit par des contraintes matérielles, de ressource et humaines. Il s'agirait d'identifier la diversité de ces contextes dans la zone et de déterminer leur distribution spatiale. De plus, des enquêtes pourraient être réalisées pour identifier des déterminants (décrivant la ressource) des conduites d'irrigation et des pratiques de semis et de choix de précocité potentiellement adoptées en cas de contexte limitant. Un programme de recherche sur l'identification des stratégies d'irrigation en contexte limitant démarrant actuellement en Midi-Pyrénées (Deumier, comm pers) pourrait être le support de cette étude.

#### *VI.2.2.3 Approfondir les connaissances sur l'impact d'un changement de contexte sur les conduites de l'irrigation*

Dans le modèle actuel, la conduite de l'irrigation n'est pas sensible à un changement de contexte socio-économique. Pour la simulation de scénarios, cela suppose de considérer que quelque soit le scénario socio-économique (ou climatique par rapport au niveau de ressource), les irrigants ne modifient pas leur conduite. Cette hypothèse peut paraître restrictive mais le contraire n'est pas une évidence :

- Les dernières années ont montré que le contexte (le niveau de ressource en eau notamment) influence les choix stratégiques des maïsiculteurs (AGPM maiz'europ', 2005). L'année 2005 a été marquée par une prise en compte généralisée du niveau des

---

<sup>17</sup> Lors des enquêtes menées en 2003 auprès des conseillers des OAS et en 2004 auprès d'agriculteurs de la zone, il avait été constaté une non prise en compte du niveau de ressource et des contraintes liées à l'irrigation dans le choix de précocité des variétés et des dates de semis. Or, depuis 2005, la profession agricole identifie les précocités et les dates de semis comme des leviers d'action en cas de problèmes de ressource en eau pour décaler temporellement le pic de demande en eau (Lorgeou et al., 2006; Ruelle P. et al., 2001). Pour l'irrigation, la recherche d'indicateurs parmi les variables structurelles des exploitations avait mis en évidence un lien entre le niveau de ressource en eau journalier (la capacité théorique d'irrigation) et la variable la plus discriminante des stratégies d'irrigation, la durée des tours d'eau mais la question n'a pas été approfondie étant donnée l'unicité de la stratégie d'irrigation identifiée pour la zone.

ressources en eau dans le choix des assolements et les surfaces de maïs ont été réduites de 6.5% en France et de 10% en Midi-Pyrénées. Ce phénomène d'anticipation a été expliqué par la crainte de difficultés d'irrigation comparables à celles de l'année 2003 et par l'effet de la future PAC. Ainsi, le scénario climatique a joué sur le choix de culture. On peut se demander s'il a joué sur la conduite de l'irrigation. Les agriculteurs ont-ils changé leurs culture afin d'éviter un bouleversement de leur conduite de l'irrigation ou celle-ci a-t-elle également changé?

- L'analyse des pratiques des irrigants par un sociologue a montré que certains agriculteurs anticipent les restrictions d'usage de l'eau en concentrant le volume dont ils disposent sur une plus petite surface de maïs irrigué que s'il n'y avait pas de problème de ressource (Salles, 2003). Ce comportement est-il observable au sein de la zone d'étude ? Est-il généralisé ? Le font-ils pour éviter un bouleversement de conduite de l'irrigation ?
- L'analyse des conduites d'irrigation a montré que par rapport au nombre de tours d'eau et à leur durée, les conduites sont peu variables (Maton et al., 2005b). Elles paraissent très contraintes par la gestion des moyens d'irrigation et l'organisation des tours d'eau. On peut donc se demander si les agriculteurs, dont le matériel est adapté au système d'irrigation et à l'objectif de production, ont de réelles marges de manœuvre de changement sans que cela trop préjudiciable pour le rendement.

Ainsi, une recherche sur l'impact des changements de contexte (niveau de ressource en eau, prix de l'eau, prix des cultures, politique agricole) sur les conduites de l'irrigation s'avère nécessaire.

## VI.3 Conclusion

### VI.3.1 Une contribution à l'agronomie du territoire

Les pratiques culturelles apparaissent de plus en plus centrales par rapport aux questions environnementales et de durabilité de l'agriculture. L'aide à la décision publique et l'évaluation de politiques publiques nécessitent une connaissance des pratiques et de leur répartition spatiale. Pourtant les travaux portant sur la détermination de la distribution spatiale des pratiques sont peu développés et peu génériques. Ils sont ponctuels, souvent en liaison avec des programmes de recherche intervention (Benoît et Papy, 1997). A l'échelle du grand bassin versant (plusieurs centaines de km<sup>2</sup>), il n'existe pas à notre connaissance de modèles permettant de déterminer la distribution des pratiques (stratégies) et d'aller jusqu'à la détermination des modalités des pratiques (dates, et modalités des interventions culturelles). Ce travail de thèse, en continuité des travaux de Leenhardt et Lemaire (2002) sur les dates de semis, peut être considéré comme une contribution aux recherches portant sur la représentation de l'agriculture sur de vastes territoires.

Le modèle SIMITKO réalisé à partir de l'analyse des pratiques de semis et de choix de précocité à l'échelle régionale permet de déterminer les dates de semis, les précocités, les densités de semis et les surfaces de l'ensemble des maïsiculteurs d'une région irriguée. Couplé à MODERATO, il peut être considéré comme un méta modèle spatialisant un modèle bio-décisionnel. Les règles simulées par SIMITKO-MODERATO rendent compte des pratiques culturelles sur le maïs irrigué à l'échelle de l'exploitation agricole et permettent de recomposer la demande en eau. En cela, ce travail peut présenter des similitudes avec le modèle développé par Pierret (1996) pour la recombinaison des paysages dans le cadre des recherches portant sur les relations entre agriculture et paysage (Deffontaines et al., 1995).

La démarche adoptée présente une certaine genericité qui devrait permettre si cela était nécessaire de tenir compte d'autres pratiques. Dans le cadre de la demande en eau d'irrigation, les pratiques de fertilisation pourraient être importantes à simuler en relation avec les autres interventions techniques. Pratiques de fertilisation et d'entretien des sols seraient d'autant plus importantes à prendre en compte si gestion quantitative et gestion qualitative de l'eau étaient un jour traitées simultanément dans un souci de durabilité.

La démarche pourrait également être utilisable pour les questions de qualité au sein des bassins d'approvisionnement, pour lesquelles il est nécessaire de connaître la diversité des pratiques culturales sur un territoire et de les localiser.

### VI.3.2 Un outil pour une meilleure connaissance de la demande en eau

Le modèle SIMITKO n'est pas un modèle pour l'ingénierie (Passouria, 2006). C'est un modèle exploratoire au sens où il permet d'explorer les possibilités d'induire des variations de la demande en eau régionale à partir des pratiques culturales.

A travers le modèle SIMITKO-MODERATO, nous avons fait un travail d'investigation des liens entre les itinéraires techniques, la demande en eau et le contexte climatique et certaines contraintes d'exploitation à l'échelle régionale. C'est donc un outil de simulation montrant l'impact du contexte sur les itinéraires techniques puis des itinéraires techniques sur la demande en eau. Notons que cet outil ne permet pas de prendre en compte l'existence d'initiatives prises collectivement ou individuellement par les agriculteurs pour la gestion des ressources et de leur territoire.

Il peut jouer le rôle de « modèle–argument » (Kieken, 2003), c'est-à-dire de modèle, souvent en « concurrence » avec d'autres modèles développés sur le même sujet, permettant d'éclairer un débat en général plus large que celui abordé dans le modèle. Il devrait par exemple permettre de fournir des données à un modèle de gestion intégrée et remplacer ainsi les fonctions de production d'ingénieur (Flichman et Jacquet, 2001). La comparaison des résultats obtenus avec SIMITKO-MODERATO et une fonction de production pour différents scénarios socioéconomiques permettrait de savoir si le développement d'un tel modèle peut être un apport pour les démarches économiques habituellement basées sur ces fonctions simplificatrices ou des développement économétriques.



## VII. BIBLIOGRAPHIE

- AGPM - TECHNIQUE, 2001. Manuel de référence technique, maïs grain maïs fourrage. AGPM TECHNIQUE.
- AGPM - Maiz'Europ', 2005. France: maïs grain 100000 hectares de moins. AGPM-INFO Economie.
- AGPM - TECHNIQUE, 2002. Besoins en degrés jours des variétés de maïs. Juin 2002 n°293.
- Agreste, 2002. Recensement général agricole 2000. Cartes thématiques Midi-Pyrénées. CR-Rom édité par le Service Régional de la Statistique Agricole de Midi-Pyrénées.
- Agreste, 2003. Recensement agricole 2000. Le recensement agricole en bref. <http://www.agreste.agriculture.gouv.fr/>
- Agreste, 2004. Grandes cultures: Fragilité des avantages du système "irrigué" sur les systèmes "sec" et "mixte". Midi Pyrénées, données n°17.
- Amigues, J.-P., 1999. La gestion intégrée de la ressource en eau. Communication aux ateliers de la recherche EDF, Clamart, 28 oct. 1999.
- Antona, M., D'Aquino, P., Aubert, S., Barreteau, O., Boisseau, S., Bousquet, F., Daré, W., Etienne, M., Le Page, C., Mathevet, R., Trébuil, G., Weber, J., (Collectif, C., 2003. Our companion modelling approach (La modélisation comme outil d'accompagnement). Journal of Artificial Societies and Social Simulation 6(2).
- Arvalis-Institut du végétal, 2001. Résultats des essais de variétés maïs grain et maïs fourrage 2000. Arvalis-Institut du végétal.
- Arvalis-Institut du végétal, 2002. Résultats des essais de variétés maïs grain et maïs fourrage 2001. Arvalis-Institut du végétal.
- Arvalis-Institut du végétal, 2004. Eau source de cultures.
- Arvalis-Institut du végétal, 2004. L'irrigation demain dans le nouveau contexte réglementaire. Compte rendu de la Commission Technique du Maïs, Mardi 6 avril 2004.
- Arvalis-Institut du végétal, 2004. Résultats des essais de variétés maïs grain et maïs fourrage 2003. Arvalis-Institut du végétal.
- Arvalis-Institut du végétal, 2004a. Eau source de cultures. Colloque au champ. Vendredi 11 juin 2004. Losse (40)
- Arvalis-Institut du végétal, 2004c. Résultats des essais de variétés maïs grain et maïs fourrage 2003. Arvalis-Institut du végétal.
- Arvalis-Institut du végétal, 2005. Résultats des essais de variétés maïs grain et maïs fourrage 2004. Arvalis-Institut du végétal.
- Attonaty, J. M., Chatelin M.H., Poussin J.C.Soler L.G., 1990. Un simulateur à base de connaissance pour raisonner équipement et organisation du travail en agriculture. 291-297.
- Aubry, C., 1995. Gestion de la sole d'une culture dans l'exploitation agricole. Cas du blé d'hiver en grande culture dans la région picarde. -271p.
- Aubry, C., Biarnès, A., Maxime, F., Papy, F., 1998. Modélisation de l'organisation technique de la production dans l'entreprise agricole: la constitution de systèmes de culture du Bassin Parisien. Etud.Rech.Syst.Agraires Dév.31: 25:43.
- Aubry, C., Chatelin, M. H., Verjux, N., 1996. Déciblé: guide de l'utilisateur. ITCF.
- Aubry, C., Papy, F., Capillon, A., 1998. Modelling decision-making processes for annual crop management. Agricultural Systems, 56: 45-65.
- Axes, F., Morardet, S., 1994. Impact économique de l'irrigation sur la production agricole: utilisation d'un système d'information géographique et de la télédétection. Economie rurale n°222, Juillet août 1994.

- Barreteau, O., 1998. Un système Multi-Agent pour explorer la viabilité des systèmes irrigués: dynamique des interactions et modes d'organisation. ENGREF Montpellier (FR), 260 pp.
- Barreteau, O., 2003. The joint use of role-playing games and models regarding negotiation processes: characterization of associations. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation* 6(2)..
- Barreteau, O., Bousquet, F., Millier, C., Weber, J., 2004. Suitability of Multi-Agent Simulations to study irrigated system viability: application to case studies in the Senegal River Valley. *Agricultural Systems*, 80: 255-275.
- Baudry, J., 1996. "Approche spatiale des systèmes techniques agricoles et environnement". Nouvelles fonctions de l'agriculture et de l'espace rural, actes du colloque de Toulouse. 17 et 18 déc. 1996: 123-137.
- Benoît, M., 2005. Résumé du projet: Conception d'Observatoires Territorialisés de Pratiques "Copt". Projet retenu dans le cadre du programme fédérateur "Agriculture et développement durable".
- Benoît, M., Papy, F., 1997. Pratiques agricoles et qualité de l'eau sur le territoire alimentant un captage. in : L'eau dans l'agro-écosystème, Riou, C., Bonhomme R., Chassin P., Neveu A., Papy, F.(eds), INRA Editions, 323-338.
- Bergez, E., 2001. MODERATO/ A decision tool for designing maize irrigation schedules.131-136.
- Bergez, J. E., 2003. De la parcelle au périmètre irrigué: développement et transfert d'outils pour une meilleure gestion de l'eau. Projet DADP.
- Bergez, J.-E., Debaeke, P., Deumier, J.-M., Lacroix, B., Leenhardt, D., Leroy, P., Wallach, D., 2001. MODERATO: an object-oriented decision tool for designing maize irrigation schedules. *Ecological Modelling*, 137: 43-60.
- Bergez, J.-E., Deumier, J.-M., Lacroix, B., Leroy, P., Wallach, D., 2002. Improving irrigation schedules by using a biophysical and a decisional model. *European Journal of Agronomy*, 16: 123-135.
- Bergez, J.-E., Garcia, F., Lapasse, L., 2004. A hierarchical partitioning method for optimizing irrigation strategies. *Agricultural Systems*, 80: 235-253.
- Bertin J., 1977. Le graphique et le traitement graphique de l'information.
- Bertran de Balanda, P., 2002. Etude de l'irrigation des agriculteurs du système Neste: paramétrage d'un modèle d'aide à la décision. ESAP Toulouse(FR), 101 pp.
- Biarnès, A., Colin, F., Rio, P., 2005. Evaluation de l'impact hydrologique de pratiques d'entretien du sol en vue de l'aide à la gestion de bassins versants viticoles méditerranéens. Communication au symposium PSDR "Territoire et enjeux du développement régional".Lyon, 9-11 mars 2005.
- Biarnès, A., Rio, P., Hocheux, A., 2004. Analyzing the determinants of spatial distribution of weed control practices in a Languedoc vineyard catchment. *Agronomie*, 24: 187-196.
- Bierkens, M. F. P., Burrough, P. A., Van Deursen, W. P. A., Heuvelink, G. B. M., 1990. Sources of error and error propagation in groundwater models linked to GIS. 33-43.
- Blanchet, A., Gotman, A., 1992. L'enquête et ses méthodes: l'entretien. *Sociologie* 128: 125p.
- Boiffin, J., Malezieux, E., Picard, D., 2002. Cropping Systems for the Futur. 261-279.
- Bonneviale, J.R., Russiau, R., Marshall, E., 1989. Approche globale de l'exploitation agricole. Comprendre le fonctionnement de l'exploitation agricole: une méthode pour la formation et le développement. INRAP. Dijon (FR), 329 pp.
- Bontemps, C., Couture, S., Favard, P., 2003. Estimation de la demande en eau d'irrigation sous incertitude. *Economie rurale* n°276 Juillet-Août 20 03.
- Bordenave, P., Oelhre, F., Turpin, N., Serrand, P., Saint Cast, P., Le Saos, E., 2005. Application de la simulation et de la modélisation numérique à l'évaluation sur le long terme des effets des pratiques agricoles sur les flux et concentration d'azote dans l'eau et dans l'air à l'échelle de trois bassins versants d'élevage. 6<sup>ème</sup> conférence internationale de l'EWRA. Menton. 7-10 Septembre 2005.
- Bourgeat, F., Coves, H., Delaunois, A., 1987. Etude des sols de la région Tarn-Agout – Valorisation agronomique, Chambre d'agriculture du Tarn, 44 pp.

- Boussemart, J. P., Flichman, G., Jacquet, F., Lefer, H. B., 1996. Predicting the effects of Common Agricultural Policy reform on two French agricultural regions: Application of a bio-economic model. *Canadian Journal of Agricultural Economics-Revue Canadienne d' Economie Rurale*, 44: 121-138.
- Breiman, L., Friedman, J.H., Olshen, R., Stone, C.J., 1984. *Classification And Regression Trees*, Wadsworth, Belmont CA.
- 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., Delécolle, R., 1998. STICS: a generic model for the simulation of crops and their water and nitrogen balances. I. Theory and parametrization applied to wheat and corn. *Agronomie*, 311-346.
- Buisson, G., 2005. Les effets de la réforme de la PAC de juin 2003 sur la consommation d'eau par l'agriculture. Rapport MEDD D4E.39p.
- Burnham, K.P., Anderson, D.R., 2000. *Model selection and inference, a practical Information-Theoretic Approach*. Springer.
- Butault, J.P., 1985. La nomenclature OTEX/CDEX. Intérêts et limites, Systèmes de production et transformations de l'agriculture. 2 annexes: notes de lecture. INRA-ESR. pp 51-56.
- Caballero, R., 2001. Typology of cereal-sheep farming systems in Castile-La Mancha (south-central Spain). *Agric. Syst.* 68, 215-232.
- Cabelguenne, M., Debaeke, P., Puech, J., Bosc, N., 1997. Real time irrigation management using the EPIC-PHASE model and weather forecasts. *Agricultural Water Management*, 32: 227-238.
- CACG, 2001. ADEAUMIS : Analyse des besoins pour l'analyse de la demande en eau d'irrigation. Cas du modèle de gestion stratégique du Système NESTE. Note technique, Juin 2001, Tarbes, 21 pp.
- CACG, 2006. Analyse prospective de l'économie de l'agriculture irriguée en Midi-Pyrénées avec l'application de la réforme de la PAC "Accords du Luxembourg". Note de synthèse des résultats provisoires. CACG, DRAF MIDI-PYRENEES-AGENCE DE L'EAU ADOUR GARONNE.
- Cancel P., 2002. Etude préliminaire à la réactualisation du plan de gestion des étiages du Bassin de l'Adour en amont d'Aire sur Adour. mémoire présenté pour l'obtention du diplôme d'ingénieur de l'ENGEES.
- Casterad, M. A., Herrero, J., 1998. Irrivol: A method to estimate the yearly and monthly water applied in an irrigation district. *Water Resources Research*, 34: 3045-3049.
- Cerf, M., Sébillotte, M., 1988. Le concept de modèle général et la prise de décision dans la conduite d'une culture. *Compte rendu de l'Académie d'Agriculture de France*, 74: 71-80.
- Chatelin, M.-H., Aubry, C., Leroy, P., Papy, F., Poussin, J.-C., 1993. Pilotage de la production et aide à la décision stratégique. *Cahiers Econ.Sociol.Rur.*, 28: 119-138.
- Clavé, J., 2001. Irrigation du maïs. Représentation des règles de décision des irrigants de la vallée du Tran et de l'Agout dans l'outil informatique MODERATO. ENITA Clermont Ferrand (FR) 46 pp + appendices
- CNCER, 2003. Les conséquences de la réforme sur l'agriculture française. Académie d'Agriculture, 3 décembre.
- Cogoluèhnes, C., 2005. Réforme de la PAC 2003 : Quel impact sur la demande agricole en eau ? Master's thesis, Université des Sciences Sociales de Toulouse, mémoire de DEA.
- Cordier, M.-O., 2004. Système d'acquisition de connaissance pour l'aide à la décision sur la qualité de l'eau. Rapport intermédiaire- projet SACADEAU Mai 2004.
- Cosgrove, W. J., Rijsbergman, F. R., 2000. *World Water Vision. Make water everybody's business*. Earthscan Publication Ltd: -108p.
- Courtois, N., Lanini, S., Guimarães Pereira, A., Petit, V., Renda, O., Rinaudo, J.-D., 2003. Un outil multimédia pour faciliter la concertation sur l'eau, appliqué à la moyenne vallée de l'Hérault (France). ICID-CIID, 20th European Regional Conference «Consensus to resolve irrigation and water use conflicts in the european region», 17-19th September 2003, Montpellier, France..

- Cristofini, B., Defontaines, C., Raichon, C., 1978. Pratiques d'élevage en Castagniccia. Exploration d'un milieu naturel et social en Corse. *Etudes Rurales*, 71-72: 89-109.
- Darracq, S., 1996. Identification et modélisation des règles de décision utilisées par les maïsiculteurs en Aquitaine. Mémoire d'ingénieur INA-PG Paris.
- Darré, J. P., 1985. La parole et la technique. L'univers de pensée des agriculteurs du Ternois. Ed.L'Harmattan, Paris, 196pp.
- de Koning, G. H. J., Verburg, P. H., Veldkamp, A., Fresco, L. O., 1999. Multi-scale modelling of land use change dynamics in Ecuador. *Agricultural Systems*, 61: 77-93.
- Debaeke, P., Aboudrare, A., 2004. Adaptation of crop management to water-limited environments. *European Journal of Agronomy*, 21: 433-446.
- Delécolle, R., Soussana, J.-F., Legros, J.-P., 1999. Impacts attendus des changements climatiques sur l'agriculture française. *Compte rendu de l'Académie d'Agriculture de France*, 85: 45-51.
- Désangle, P., 2004. Conséquences de la réforme de la PAC avec le découplage des aides ha et de la loi sur l'eau sur l'évolution du maïs. Point de vue d'un organisme stockeur. *Compte rendu de la Commission Technique du Maïs*.
- Deumier, J. M., Leroy, P., Peyremorte, P., 1995. Tools for improving management of irrigated agricultural crop. 39-50.
- Dobremez, L., Bousset, J.P., 1995. Rendre compte de la diversité des exploitations agricoles. Une démarche d'analyse par exploration conjointe de source statistiques, comptables et technico-économiques. *Etudes Gestion des territoires*, Cemagref (FR).
- Donet, I., 1999. Etude de l'interpolation de l'ETP quotidienne en points de grille. Report SCEM/SERV/AGRO, Toulouse, Feb.1999.
- Dounias, I., 1998. Prise de décision et réalisation des semis de la culture cotonnière dans la région Nord du Cameroun. *IRD Editions*: 219-243.
- Ducau, M., Leibreich, J., 2001. Mise en oeuvre des CTE dans le département de la Dordogne : diagnostic territorial sur le thème de l'eau. *Ingénieries - E A T*, n° spécial Multifonctionnalité de l'agriculture et CTE, 2001, p.107-117.
- Ehrhard, F., Escoffier, I., Omnès, G., 2006. L'Imagination au secours du maïs irrigué. *La France Agricole* 6 mai 2005.
- Estimation de la demande en eau d'irrigation sous incertitude, avec C. Bontemps et P. Favard. *Economie rurale*, 276, 17-24, 2003
- Faivre, R., Leenhardt, D., Voltz, M., Benoit, M., Papy, F., Dedieu, G., Wallach, D., 2004. Spatialising crop models, *Agronomie* 24, 205-217.
- FAO, 1998. Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements -. *FAO Irrigation and drainage paper* 56.
- FAO, 2002. Water: Precious and finite resource. Published by FAO multimedia group, October 2002. <http://www.fao.org/ag/magazine/0210sp1.htm>
- Fenelon, J. P., 1981. Qu'est ce que l'analyse de données? LEFONEN.311p.
- Feuillette, S., 2001. Towards a demand management on a free-accessible watertable: exploring interactions between water resource and uses by multi-agent systems. Application to the Kairouan watertable, Center of Tunisia. Montpellier, Ecole Nationale du Génie Rural, des Eaux et des Forêts.350p.
- Flichman, G., Jacquet, F., 2001. Le couplage des modèles agronomiques et économiques: intérêt pour l'analyse des politiques. Communication au Séminaire Economie de la production du département ESR/INRA Paris, 28 et 29 novembre 2001.
- Fontane, D.G., 1995. Initiating a Water Management Decision Support System for the South Platte River Basin. <http://www.cwrri.colostate.edu/pubs/balance/no.2/bal2.html>
- France Agricole, 2003. Sécurité du revenu, Se lancer dans le tabac en limitant les frais. n°3002, pp 33.

- Gibon, A., 1999. Etudier la diversité des exploitations agricoles pour appréhender les transformations locales de l'utilisation de l'espace. L'exemple d'une vallée du Versant Nord des Pyrénées. Options méditerranéennes, Série B. Etudes et recherches, 27: 197-215p.
- Girard, N., 2003. Catégoriser les pratiques d'agriculteurs pour reformuler en partenariat un "problème" : une méthode pour construire des typologies situées.
- Girard, N., Bellon, S., Hubert, B., Lardon, S., Moulin, C.H., Osty, P.L., 2001. Categorising combinations of farmers' land use practices : an approach based on examples of sheep farms in the south of France. *Agronomie* 21, 435-459.
- Girardin, P., 1998. Ecophysiologie du maïs. *AGPM*, 323p., *AGPM*: 323p.
- Glenn De Ath, Fabricius, K. E., 2000. Classification and regression trees: a powerful yet simple technique for ecological data analysis. *Ecology*, 81(11), pp.3178-3192.
- Glenn De Ath, 2002. Multivariate regression trees: a new technique for modeling species-environment relationships. *Ecology*, 83(4), pp 1105-1117.
- Godet, M., 1997. Manuel de prospective stratégique. Dunod.
- Gouet, J. P., 1978. L'élaboration d'un protocole d'enquête. Proposition d'un plan - type détaillé et quelques commentaires. ITCF Bureau d'études statistiques: 98p.
- Gras, Benoît, Deffontaines, Duru, Lafarge, Langlet, Osty, 1989. Le fait technique en agronomie. éd INRA- L'Harmattan, coll. Alternatives rurales, 183p.
- Guerif, M., Duke, C., 1998. Calibration of the SUCROS emergence and early growth module for sugar beet using optical remote sensing data assimilation. *European Journal of Agronomy*, 9: 127-136.
- Guines, F., 2003. Etude des besoins des utilisateurs en outils de gestion de l'eau à l'échelle d'un territoire. 107 p.
- Hammel, V., 1994. Planning and management of water resources in the Southwest of France in a dynamical, social and economic environment. In: Duckstein, L., Parent, E. (Eds.), *Engineering Risk in Natural Resources Management*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, pp. 449-454.
- Hartkamp, A.D., White, J.W., Hoogenboom, G., 1999. Interfacing geographic information systems with agronomic modelling: a review. *Agron. J.* 91, 761-772.
- Hartkamp, A. D., White, J. W., Rossing, W. A. H., van Ittersum, M. K., Bakker, E. J., Rabbinge, R., 2004. Regional application of a cropping systems simulation model: crop residue retention in maize production systems of Jalisco, Mexico. *Agricultural Systems*, 82: 117-138.
- Heinemann A.B., Hoogenboom G, de Faria R.T., 2002. Determination of spatial water requirements at county and regional levels using crop models and GIS. An example for the State of Parana, Brazil. *Agricultural Water Management*, 52 (2002): 177-196.
- Hénin, S., Fedoroff, N., Monnier, G., 1969. Le profil cultural : l'état physique du sol et ses conséquences agronomiques. 1969. Masson Paris, 332p. 2ème édition.
- Herrero, J., Casterad, M. A., 1999. Using satellite and other data to estimate the annual water demand of an irrigation district. *Environmental Monitoring and Assessment*, 55: 305-317.
- Hurand, P., Tardieu, H., 1998. Gestion de la demande en eau dans un contexte de ressource limitée. *Lavoisier TEC&DOC*: 882-899.
- Jarrier, N., 2002. Elaboration d'une maquette informatique de prévisions des besoins en eau sur un secteur donné. ENIT (FR) CACG. 26 pp.
- Joannon, A., 2004. Coordination spatiale des systèmes de culture pour la maîtrise de processus écologiques. Cas du ruissellement érosif dans les bassins versants agricoles du pays de Caux, Haute Normandie. Thèse INA P-G, Paris, 230p+ annexes.
- Jones, C. A., Kiniry, J., 1986. CERES-Maize, a simulation model of maize growth and development. Texas A. and M university Press, 194p.
- Kieken, H., 2003. Le rôle des modèles dans la gestion de l'environnement. in *Le statut épistémologique de la simulation*. Actes des 10èmes journées de Rochebrune: rencontres interdisciplinaires sur les systèmes complexes naturels et artificiels. ENST 2003.

- Klatzmann, J., 1955. La localisation des cultures et des productions animales en France. Imprimerie nationale: 477p.
- Knox, J. W., Weatherhead, E. K., Bradley, R. I., 1996. Mapping the spatial distribution of volumetric irrigation water requirements for maincrop potatoes in England and Wales. *Agricultural Water Management*, 31: 1-15.
- Knox, J. W., Weatherhead, E. K., Bradley, R. I., 1997. Mapping the total volumetric irrigation water requirements in England and Wales. *Agricultural Water Management*, 33: 1-18.
- Köbrich, C., Rehman, T., Khan, M., 2003. Typification of farming systems for constructing representative farm models: two illustrations of the application of multi-variate analyses in Chile and Pakistan. *Agricultural Systems*, 76: 141-157.
- Kristensen, S. P., 2003. Multivariate analysis of landscape changes and farm characteristics in a study area in central Jutland, Denmark. *Ecol. Model.* 168, 303-318.
- Krol, M., Jaeger, A., Bronstert, A., Guntner, A., 2006. Integrated modelling of climate, water, soil, agricultural and socio-economic processes: A general introduction of the methodology and some exemplary results from the semi-arid north-east of Brazil. *Journal of hydrology*, In Press, Corrected Proof.
- Kropff, M. J., Bouma, J., Jones, J. W., 2001. Systems approaches for the design of sustainable agro-ecosystems. *Agricultural Systems*, 70: 369-393.
- Kropff, M. J., Jones, J. W., Laar van, G., 2001. Advances in systems approaches for agricultural development. *Agricultural Systems*, 70: 353-354.
- Labbe, F., Ruelle, P., Garin, P., Leroy, P., 2000. Modelling irrigation scheduling to analyse water management at farm level, during water shortages. *European Journal of Agronomy*, 12: 55-67.
- Lacroix, B., 2004. Aides aux décisions d'irrigation en grandes cultures. Quelques outils et méthodes. Rencontre AGROMETEO INRA Avignon 14 octobre 2004.
- Landais, E., Deffontaines, J. P., Benoit, M., 1989. Les pratiques des agriculteurs, point de vue sur un courant nouveau de la recherche agronomique. *Etudes Rurales* 109, 125-158.
- Landais, E., Deffontaines, J. P., 1990. Les pratiques des agriculteurs. Point de vue sur un courant nouveau de la recherche agronomique. Brossier, J.; Vissac B.; Le Moigne J.L. - INRA: 31-64.
- Landais, E., 1998. Modelling farm diversity: new approaches to typology building in France. *Agric.Syst.* 58, 505-527.
- Lasserre, F., 2003. Pour une meilleure gestion préventive de l'eau. *Le Monde*. 7 octobre 2003.
- Launay, M., Guérif, M., 2003. Ability for a model to predict crop production variability at the regional scale: an evaluation for sugar beet. *Agronomie*, 23: 135-146.
- Launay, M., Guérif, M., 2005. Assimilating remote sensing data into a crop model to improve predictive performance for spatial applications. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 111: 321-339.
- Le Bars, M., 2005. Quelle validation de modèles dédiés à l'appui de la gestion collective des ressources communes? Atelier Modélisation Environnement IRD-NSS DIALOGUE- Compte rendu de la 19ème session tenue le 3 mars 2005 sur le thème "Validation".
- Le Ber, F., Benoît, M., 1998. Modeling the spatial organization of land use in a farming territory. Example of a village in the plateau Lorrain. *Agronomie*, Vol.18,2:103-115.
- Leenhardt, D., Voltz, M., Bornand, M., 1994. Propagation of the error of spatial prediction of soil properties in simulating crop evapotranspiration, *Eur.J. Soil Sci.* 45, 303-310.
- Leenhardt, D., Lemaire, P., 2002. Estimating the spatial and temporal distribution of sowing dates for regional water management. *Agricultural Water Management*, 55: 37-52.
- Leenhardt, D., Trouvat, J. L., 2004. ADEAUMIS, un outil pour estimer la demande en eau d'irrigation à l'échelle régionale. Exemple d'utilisation en temps de crise. *Ingénieries* n°40, 37-50. Décembre 2004.

- Leenhardt, D., Trouvat J.L., Gonzalès G., Pérarnaud V., Prats S., Bergez J.E., 2004a. Estimating irrigation demand for water management on a regional scale. I. ADEAUMIS , a simulation platform based on biodecisional modelling and spatial information. *Agricultural Water Management*.
- Leenhardt, D., Trouvat J. L. , Gonzalès, G., Pérarnaud, V, Prats, S., Bergez, J.E., 2004b. Estimating irrigation demand for water management on a regional scale. II. Validation of ADEAUMIS, *Agric. Water Manage.* 68, 233-250.
- Leenhardt, D., 2004. Développement, évaluation et utilisation de modèles agronomiques pour l'aide à la décision en gestion de l'eau. Mémoire pour l'obtention du diplôme d'Habilitation à Diriger des Recherches. INP de Toulouse, le 16 décembre 2004.
- Leenhardt, D., Penciolelli, A., Lacroix, B., Cayrol.P.,Lefèvre,V., Prats,S., Gleyses,G., Amen,J.-F., Trouvat, J. L., 2005. Méthodologies mises en œuvre pour la prévision d'irrigation, 47 p. + annexes. In: Réseau RITEAU: Projet ADEAUIPI, Aide à la décision pour la gestion de l'eau en périmètres irrigués: rapport final. INRA, ARVALIS-Institut du Végétal, SCOT, EADS-ASTRIUM, Météo France, Cemagref, CACG. Financement Ministère de l'Economie, des Finances et de l'Industrie Direction Générale de l'Industrie, des Technologies de l'Information et des Postes.
- Leroy, P., Deumier, J.-M., Jacquin, C., et al., 1992. Etude de la faisabilité pour la mise au point d'une méthode de conduite des irrigations. Rapport INRA/ITCF au ministère de l'Agriculture.100p.
- Leroy, P., 1996. Gestion des ressources limitées en eau: conséquences agro-économiques. Rapport de synthèse, CE/INRA 65p.
- Leroy, P., Balas, B., Deumier, J. M., Jacquin, C., Plauborg, F., 1996. Water management at farm level. The management of limited resources in water. Their agronomic consequences. Final report of E.U. CAMAR 8001-CT91-0109 project. pp 89-151.
- Leroy, P., Deumier, J. M., Jacquin, C., 1997. IRMA: un simulateur de l'organisation des chantiers d'irrigation. *Perspectives Agricoles*, 228: 76-83.
- Levy, J. D., Bertin, M., Mazodier, J., Combes , B., Roux, A., 2005. Irrigation durable. Conseil Général du Génie rural,des Eaux et des Forêts, 39 p + annexes.
- L'INRA au Salon International de l'agriculture du 22 février au 2 mars 2003, 2003. Changement climatique, développement durable : quels enjeux pour l'agriculture et la recherche agronomique ? Dossier de presse, 13 février 2003.
- Lorgeou, J., Souverain, F., 2003. Atlas Agroclimatique du maïs. Arvalis-Institut du Végétal; METEO-FRANCE; Céréaliers d'europe; Maiz'Europ: 112p.
- Lorgeou, J., Bouthier, A., Renoux, J.-P., Cloute, G., 2006. Stratégie d'évitement en maïs grain dans le Centre ouest. Adapter le cycle aux contraintes hydriques par la précocité? *Perspectives agricoles* n°321, mars 2006.
- Louhichi, K., Alary, V., Grimaud, P., 2004. A dynamic model to analyse the bio-technical and socio-economic interactions in dairy farming systems on the Réunion Island. *Anim.Res.*53 (2004) 363-382 DOI: 10.1051/animres:2004030.
- Mailhol, J. C., Zairi, A., Slatni, A., Ben Nouma, B., El Amani, H., 2004. Analysis of irrigation systems and irrigation strategies for durum wheat in Tunisia. *Agricultural Water Management*, 70: 19-37.
- Mainie, P., 1971. Les exploitations agricoles en France, 354, PUF collection "Que sais-je?".
- Margat, J., 1996. Les ressources en eau. Manuel et Méthodes n°28. BRGM.
- Mari, F., Le Ber, F., Benoît, M., 2002. Segmentation temporelle et spatiale de données agricoles. *Revue Internationale de Géomatique* 12:439:460.
- Mateos, L., Lopez-Cortijo, I., Sagardoy, J., 2002. SIMIS; the FAO decision support system for irrigation scheme management. *Agricultural Water Management*, 56: 193-206.
- Mathieu, A., Joannon, A., 2003. How farmers view their job in Pays de Caux, France: Consequences for grassland in water erosion. *Environmental Science & Policy*, 6: 29-36.
- Maton, L., Bergez, J. E., Leenhardt, D., 2005a. Identification de la diversité des pratiques culturelles des agriculteurs à l'échelle régionale. Application aux pratiques de choix de précocité et de semis

- des maïsiculteurs de la zone de la Baïse-Amont dans le sud-ouest de la France. Soumis à Cahiers Agriculture.
- Maton, L., Leenhardt, D., Goulard, M., Bergez, J. E., 2005. Assessing the irrigation strategies over a wide geographical area from structural data about farming systems. *Agricultural Systems*, 86: 293-311.
- Maxime, F., Mollet J.M., Papy, F., 1995. Aide au raisonnement de l'assolement en grande culture. *Cahiers Agricultures*, 4: 351-362.
- McGregor, M. J., Rola-Rubzen, M. F., Murray-Prior, R., 2001. Micro and macro-level approaches to modelling decision making, *Agric. Syst.* 69, 63-83
- Meynard, J. M., Doré T., Habib R., 2001. L'évaluation et la conception de systèmes de culture pour une agriculture durable. *Compte rendu de l'Académie d'agriculture de France* 87, 223-236.
- Mielniczek, V., 2001. Analyse économique du comportement des agriculteurs irrigants. DEA MPSE, Toulouse1 (FR), 35 pp + appendices
- Mignolet, C., Benoît, M., Bornerand, C., 2001. Différenciation du bassin de la Seine selon les dynamiques des systèmes de production agricoles depuis les années 1970. *Cahiers d'études et de recherches francophones Agricultures* 10, 377-387.
- Mignolet, C., Schott, C., Benoît, M., 2004. Spatial dynamics of agricultural practices on a basin territory: a retrospective study to implement models simulating nitrate flow. The case of the Seine basin. *Agronomie*, 24: 219-236.
- Mircovich, C., 1999, Evaluation des avertissement collectifs à l'irrigation en Région Midi-Pyrénées. DESS INP-ENSAT Toulouse (FR), 37 pp.
- Mission Eau, 2004. Constat et propositions d'actions. Mission régionale sur l'eau en Midi-Pyrénées.
- Montginoul, M., 1998. Méthodologie pour la détermination des instruments économiques de gestion de l'eau- Application au fleuve Charente. Journées de l'AFSE (Association française des Sciences Economiques), Toulouse, 11-12 mai.
- Mutin, G., 2000. De l'eau pour tous? Documentation photographique, Bimestriel n°8014: -63.
- Navarrete, M., Maxime, F., Bressoud, F., Tordjman, S., Papy, F., 1999. Planification des conduites culturales et différenciation des produits dans des exploitations maraîchères. *Cahiers d'études et de recherches francophones / Agricultures*. Volume 8, Numéro 3, 171, Mai - Juin 1999, Etudes originales.
- Nesme, T., 2005. Utilisation de modèles agronomiques pour analyser les pratiques des agriculteurs. Application à l'irrigation et à la fertilisation azotée en vergers de pommiers au sein d'une petite région.
- Nesme, T., Bellon, S., Lescourret, F., Senoussi, R., Habib, R., 2005. Are agronomic models useful for studying farmers' fertilisation practices? *Agricultural Systems*, 83: 297-314.
- Nolot, J. M., Debaeke, P., 2003. Principes et outils de conception, conduite et évaluation de systèmes de culture. *Cahiers Agricultures*, 12: 387-400.
- Omnès, G., 2004. Irrigation du maïs. Arrêter au bon moment. *La France Agricole*. 6 août 2004.
- Ondersteijn, C. J. M., Giesen, G. W. J., Huirne, R. B. M., 2003. Identification of farmer characteristics and farm strategies explaining changes in environmental management and environmental and economic performance of dairy farms. *Agricultural Systems*, 78: 31-55.
- Oweis, T., Hachum, A., 2001. Reducing peak supplemental irrigation demand by extending sowing dates. *Agricultural Water Management*, 50: 109-123.
- Palacio, V., Gleyses, G., Morardet, S., 1994. Typologies d'exploitations: méthode d'élaboration en vue de la modélisation économique. *Conjectures: dossiers de travail du FERMAT*.
- Papy, F., Servettaz, L., 1986. Jours disponibles et organisation du travail (exemple des chantiers de préparation des semis de printemps). *B.T.I.*, 412/413: 693-703.

- Papy, F., Aubry, C., Mousset, J., 1990. Elements pour le choix des équipements et chantiers d'implantation des cultures en liaison avec l'organisation du travail. In: La structure du sol et son évolution, Laon (France), 9 janvier 1990. Ed. INRA, Paris 1990 (Les colloques de l'INRA, n°53).
- Papy, F., 1999. Agriculture et organisation du territoire par les exploitations agricoles: enjeux, concepts, questions de recherche. C.R.Acad.Agric.Fr., 85, n°7, pp 233-244. Scéance du 27 octobre 1999.
- Papy, F., 2001. Interdépendance des systèmes de culture dans l'exploitation. INRA CIRAD éditions collection REPERES: 51-74.
- Passouria, 2006. Simulation models : Science, Snake oil, Education, or Engeneering ? Agronomy journal. 88 : 690-694.
- Penalver, F., Longueval, C., 1999. Les grands ensembles morpho-pédologiques de Midi-Pyrénées. Chambre Régionale d'Agriculture de Midi-Pyrénées.
- Pereira, L.S., Van den Broeck, B., Kabat, P., Allen, R.G. (Eds.) 1995. Crop Water Simulation Models in Practice. Wageningen Press, Wageningen.
- Perrot, C., Landais, E., 1993. Comment modéliser la diversité des exploitations agricoles? Les cahiers de la Recherche Développement 33, 13-23.
- Pierret, P., 1996. Activité agricole, organisation de l'espace rural et production de paysage. Thèse de 3ème cycle, Université de Bourgogne, 234p+ annexes.
- Polge, M., Kéravec, N., 1997. S.R.I du Tarn, Compte rendu d'activité 1996-1997. Secteur Référence Irrigation, Chambre d'Agriculture du Tarn.
- Puech, J., Cabelguenne, M., Attonaty, J. M., Leroy, P., Amigues, J. P., Balas, B., Perarnaud, V., 1997. Gestion de l'eau à l'échelle de l'exploitation agricole. 101-119.
- Ramonet, I., 2002. Une ressource stratégique. In: La ruée vers l'eau. Le Monde diplomatique, Manière de voir, 65, 6-7.
- Reboul, C., 1965. Les jours disponibles pour les travaux agricoles. Bulletin des C.E.T.A. Janvier 1965. Etude FNCETA. N°1013.
- Ritz, J. 1989. Discours sur la fertilité : l'aperception des agriculteurs. In Sébillotte (éd): Fertilité et systèmes de production. Inra, Paris, pp.308-344
- Rouffaud, H. 2001. Contextes, règles de décision et stratégies de conduite de l'irrigation du maïs dans les vallées du Tarn et de l'Agout. ENESA Dijon (FR), 28 pp + appendices.
- Rounsevell, M. D. A., Annetts, J. E., Audsley, E., Mayr, T., Reginster, I., 2003. Modelling the spatial distribution of agricultural land use at the regional scale. Agriculture, Ecosystems & Environment, 95: 465-479.
- Ruelle P., Benali M., Malhol J.C., Baqri A., Taky A., Zehauf M., 2001. Stratégies d'irrigation et adaptation des cycles de cultures pour maîtriser les consommations en eau. Séminaire Euro-Méditerranéen. La maîtrise de l'irrigation et du drainage pour une gestion durable des périmètres irrigués méditerranéens, Rabat, MAR, 27-29 oct. Cemagref Edition pp183-198.
- Salles, D., 2003. Gestion collective et stratégies individuelles. Gestion de l'eau et pratiques d'irrigation dans le système irrigué Neste. In: 71ème congrès de l'ACFAS, Rimouski (Canada).
- Salles, D., Zelem M.C., Busca D., Gendre C., 1999. Stratégies des agriculteurs face aux dispositifs de gestion de l'eau. CERTOP CNRS.
- Scull, P., Franklin, J., Chadwick, O. A., 2005. The application of classification tree analysis to soil type prediction in a desert landscape. Ecological Modelling, 181: 1-15.
- Sébillotte, M., Servettaz, L., 1989. Localisation et conduite de la betterave sucrière. L'analyse des décisions techniques. in Sébillotte (éd): Fertilité et systèmes de production. Inra, Paris, pp.308-344.
- Sébillotte, S., Soler, G., 1990. Les processus de décision des agriculteurs. 1. Acquis et questions vives. in : Brossier, J., Vissac, B., Le Moigne J.L. (Eds.), Modélisation systémique et systèmes agraires. Décision et organisation. pp. 93-101

- Sébillotte, M., Soler, G., 1990. Les processus de décision des agriculteurs. in : Brossier, J., Vissac, B., Le Moigne J.L. (Eds.), Modélisation systémique et systèmes agraires. Décision et organisation. pp. 93-101.
- Sébillotte, S., 1990. Système de culture, un concept opératoire pour les agronomes. in L.COMBE & D.PICARD (éds): 165-196.
- Sébillotte, M., 1996. Les mondes de l'agriculture. Une recherche pour demain. Sciences en questions. INRA.
- Seguin, B., 2004. Changement climatique, gestion des ressources et territoires, in. Prevost P., Agronomes et territoires, deuxième édition des entretiens du Pradel, L'Harmattan., 35-47.
- Shiklomanov, I. A., 1998. World Water Resources. A new appraisal and assesment for the 21st century. UNESCO: -37p.
- Smith, M., 2000. The application of climatic data for planning and management of sustainable rainfed and irrigated crop production. Agric. For. Meteorol. 103, 99-108.
- Soggiu, L., 1999. Zonage des espaces agricoles. Recherche sur la délimitation d'espaces homogènes en fonction des pratiques agricoles. Le cas de la culture de maïs en Charente.
- Solagro, 2003. Barrage de Charlas (31) : SOLAGRO au service du débat. <http://www.solagro.org/site/141.html>.
- Soulé, G., 2004. Quelles sont les stratégies de conduite du maïs sur la zone de la Baïse-Amont et quelle peut être leur spatialisation? Mémoire de Licence ENFA Toulouse. 53p.
- Sourie, J.-C., Millet, G., Guindé, L., Wepierre, A., 2004. La révision à mi-parcours de la PAC (juin 2003) et les exploitations céréalières des régions intermédiaires. INRA Sciences Sociales 4-5/03.
- Sousa, V., Santos Pereira, L., 1999. Regional analysis of irrigation water requirements using kriging. Application to potato crop (*Solanum tuberosum* L.) at Tras-os-Montes. Agricultural Water Management, 40: 221-233.
- Spessotto, E., 2001. Approche sociologique du comportement des irrigants du secteur des Baïse. IUP Toulouse (FR) 44 pp+ appendices
- Speybroeck, N., Berkvens, D., Mfoukou-Ntsakala, A., Aerts, M., Hens, N., Van Huylenbroeck, G., Thys, E., 2004. Classification trees versus multinomial models in the analysis of urban farming systems in Central Africa. Agricultural Systems, 80: 133-149.
- Stockle, C. O., Donatelli, M., Nelson, R., 2003. CropSyst, a cropping systems simulation model. European Journal of Agronomy, 18: 289-307.
- Tedeschi, L. O., 2006. Assessment of the adequacy of mathematical models. Agricultural Systems, 89: 225-247.
- Thomas, A., 2000. Rendements agricoles, fertilisation et pratiques culturales. Etude sur les données de l'Enquête "Pratiques culturales 1994", SCEES, Ministère de l'Agriculture. Septembre 2000. 40p.
- Tiercelin, J. R., 1998. Traité d'irrigation. Ed. Lavoisier.
- Tron, G., Isbérie, C., Chol, P., 2000. La tensiométrie pour piloter les irrigations. Educagri éditions.
- Trouvat, J.-L., 1997. Concepts de base de la gestion quantitative de la ressource en eau. In: Irrigation, outil de qualité et de régularité de la production agricole pour les marchés et les industries d'aval. Journées Techniques Nationales. AFEID-AGPM, pp. 121-136
- Trouvat, J.-L., Leenhardt, D., Amigues, J. P., Perarnaud, V., Gonzales, G., 2002. ADEAUMIS Aide à la décision pour la gestion de l'eau par la modélisation et l'information spatialisée. Rapport de fin de projet-Novembre 2002.
- UFC Que choisir, 2005. Au péril de l'eau. UFC Que Choisir 30/08/05.
- Vayssières, M. P. R. E. P., Allen-Diaz, B. H., 2000. Classification trees: an alternative non-parametric approach for predicting species distributions. Journal of Vegetation Science 11:679-694.
- Veldkamp, A., Lambin, E. F., 2001. Predicting land-use change. Agriculture, Ecosystems & Environment, 85: 1-6.

- Venables, W.N., Ripley, B.D., 1999. Modern Applied Statistics with S-PLUS. Third Edition. Statistics and Computing, Springer.
- Verburg, P. H., de Koning, G. H. J., Kok, K., Veldkamp, A., Bouma, J., 1999. A spatial explicit allocation procedure for modelling the pattern of land use change based upon actual land use. *Ecological Modelling*, 116: 45-61.
- Verburg, P. H., Veldkamp, A., 2001. The role of spatially explicit models in land-use change research: a case study for cropping patterns in China. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 85: 177-190.
- Wallach, D., Goffinet, B., Bergez, J. E., Debaeke, P., Leenhardt, D., Aubertot, J. N., 2001. Parameter estimation for crop models: A new approach and application to a corn model. *Agronomy Journal*, 93: 757-766.
- Weatherhead, E. K., Knox, J. W., 2000. Predicting and mapping the future demand for irrigation water in England and Wales. *Agricultural Water Management*, 43: 203-218.
- Weber, J. J., 1998. Choix du matériel d'irrigation en Gascogne, *Perspective Agricole* 233, 50-53.
- Williams, J. R., Jones, C. A., Kiniry, J. R., Spanel, D. A., 1989. The EPIC growth model. *Trans ASAE.*, 32:497-511.
- Yun, J. I., 2003. Predicting regional rice production in South Korea using spatial data and crop-growth modeling. *Agricultural Systems*, 77: 23-38.
- Zhang, B., Valentine, I., Kemp, P., Lambert, G.. Predictive modelling of hill-pasture productivity: integration of a decision tree and a geographical information system. *Agricultural Systems*, In Press, Corrected Proof.



## VIII. ANNEXES

### VIII.1 Annexe 1 : Revue sur l'évolution des objets de recherche et de leur modélisation en agronomie

Dans cette annexe, je présente l'évolution des objets de recherche en agronomie comme une réponse à l'évolution des préoccupations sociétales tout en considérant que les apports de l'agronomie ont également nourri cette demande. Cette évolution s'est accompagnée d'un changement d'échelle spatiale et temporelle des processus analysés, ce qui renouvelle les questions de méthodologie de la modélisation en particulier, en ce qui concerne la modélisation agronomique des systèmes de culture.

L'évolution des préoccupations sociétales est divisée en trois périodes allant de la production des années 60-70 à la durabilité des années 2000. Dans chaque partie, les espaces considérés, les concepts utilisés et les modèles développés sont présentés.

#### VIII.1.1 Le champ cultivé et les modèles développés à l'échelle parcellaire

L'objectif de recherche de l'agronomie jusqu'aux années 70 est principalement l'amélioration de la production. Les rendements des cultures doivent être augmentés, la fertilité des sols, améliorée. Les agronomes s'intéressent alors au fonctionnement du peuplement végétal et au milieu qui l'entoure. Ils testent des techniques en les évaluant essentiellement par rapport à des critères quantitatifs de production. L'échelle d'analyse et de propositions de l'agronome est alors la parcelle agricole\* (Papy et Benoit, 1998 ; Sébillotte, 1990 ; Sébillotte, 2005). Les modèles développés à ce moment là sont essentiellement conceptuels. Basés sur les résultats d'expérimentations sur l'identification de facteurs limitant ou augmentant l'expression du rendement, ils représentent le fonctionnement des cultures.

Très vite, il apparaît que le raisonnement d'une technique doit prendre en compte la nature systémique du champ cultivé (Biarnès, 1998). Des concepts insistant sur la dimension systémique de l'espace cultivé sont alors développés et utilisés: le système de culture et l'itinéraire technique.

Le système de culture est « l'ensemble des modalités techniques mises en œuvre sur des parcelles traitées de manière identiques ; chaque système de culture se caractérise par la nature des cultures et leur ordre de succession, et par les itinéraires techniques appliqués à chacune de ces cultures » (Sebillotte, 1990). L'itinéraire technique est l'ensemble des logiques d'action portant sur le choix de variété, puis l'enchaînement des opérations culturales, leurs modalités et les conditions d'intervention sur une parcelle (Sebillotte et Soler, 1990). La définition du système de culture varie d'un auteur à l'autre suivant la façon de considérer ce qu'est une surface « traitée de manière homogène ». Papy (2001), inspiré par les travaux de Burel et Baudry (1999), propose une définition hiérarchisée en fonction du pas de temps et de la résolution spatiale considérée. Il montre que si l'on considère un système de culture au pas de temps du cycle de culture, on parle alors d'itinéraire technique. On ne peut donc parler de « système de culture » sans préciser l'échelle spatio-temporelle étudiée.

Ces deux concepts reposent sur la notion d'interdépendance entre les actes techniques : une culture est cultivée et conduite en fonction de la culture précédente et de la culture suivante ; une opération culturale est réalisée en fonction des autres opérations et de l'évolution du milieu, qui elle-même dépend des opérations réalisées.

Pour l'évaluation de systèmes de culture existant et la conception de nouveaux systèmes, la démarche expérimentale (dite par « essai-erreur ») a longtemps prévalu. Les modèles de fonctionnement des cultures, modèle statiques appelées « fonction de production » alors établis ont ensuite été complétés par des modèles dynamiques. Ce sont les modèles de culture. Les modèles de culture représentent le fonctionnement du système cultural ou système « sol-plante-atmosphère ». Ils peuvent être conçus à des fins didactiques étant donnée la possibilité d'une intégration des connaissances écophysiologicals (De Wit, 1978), et dans des objectifs agronomiques (Brisson et al., 1998) ou pour répondre à des problématiques environnementales (Williams et al, 1984).

Ils sont développés et calibrés pour une parcelle homogène (Faivre et al, 2004). L'unité de simulation est considérée comme homogène : les données d'entrée (climat, type de sol, itinéraire technique) et les paramètres sont uniques pour une simulation. Ces modèles calculent la croissance de la plante, le rendement, les bilans en fonction des conditions du milieu (besoins en eau de plante, lessivage de nitrate, etc.) et de l'itinéraire technique pratiqué. Ces modèles présentent notamment l'avantage de pouvoir tester des systèmes de culture en permettant la simulation d'une variété de solutions dans une large gamme de conditions de sols et de climats inaccessibles à l'expérimentation (Hoogenboom, 2000).

### VIII.1.2 Les pratiques de l'agriculteur et les modèles représentant les processus de décision des agriculteurs

Deux types de travaux se développent sur les pratiques agricoles : l'analyse de l'impact des pratiques et l'analyse des déterminants des pratiques. Je présente le premier type dans la partie 1.1.3, tandis que le second, très franco-français, est présenté ici.

Devant le constat d'une importante variabilité des pratiques agricoles et les difficultés d'adoption par les agriculteurs des propositions techniques des agronomes, l'agriculteur et ses pratiques devient un véritable objet de recherche en France (Landais et Deffontaines, 1990). Si les recherches plutôt normatives à l'échelle de la parcelle se poursuivent, une démarche compréhensive se développe. Elle porte sur la façon dont l'agriculteur prend ses décisions et sur la complexité des facteurs à prendre en compte pour proposer des systèmes de culture nouveaux.

L'enjeu est de favoriser le meilleur développement possible des exploitations compte tenu de la diversité de leurs atouts et de leurs contraintes (Aubry et al, 1998 ; Aubry, 2000 ; Barbier et Mouret, 2000, Capillon, 1993, Osty, 1978, Papy, 2001 b). On assiste au développement des typologies d'exploitation agricole. L'interdépendance des systèmes de culture dans les exploitations agricoles est prise en compte (Papy, 2001) et l'exploitation agricole est considérée comme l'échelle où sont prises les décisions par l'agriculteur.

Venant compléter les travaux agronomiques sur les pratiques des agriculteurs, des travaux issus des sciences de gestion (Attonaty, 1993), d'ergonomie et des sciences cognitives (Cerf, 1996) permettent de formaliser la logique qui aboutit à l'organisation ou distribution spatiale des systèmes de culture au sein du territoire d'exploitation. Ils permettent en outre de formaliser l'organisation du travail de l'agriculteur.

Ces travaux à l'échelle de l'exploitation agricole ont permis de développer des modèles conceptuels représentant la façon dont l'agriculteur prend ses décisions techniques. Le premier modèle conceptuel est le « modèle d'action » (Sébillotte, 1990 ; Sébillotte et Soler, 1990). Il repose sur l'idée que les décisions techniques présentent un caractère récurrent et cyclique et qu'elles peuvent être formalisées sous forme de règles de planification et de règles

de pilotage. Ce modèle a ensuite été utilisé pour développer un autre modèle conceptuel : le modèle de gestion technique d'une culture au sein de l'exploitation (Aubry et al., 1998).

Des simulateurs permettant de raisonner la gestion de ressources sont développés en collaboration avec la recherche en intelligence artificielle. Les simulateurs reposent sur un nouveau type de modèle: le modèle de décision. Ils sont directement inspirés des modèles conceptuels (modèle d'action, modèle de gestion technique d'une culture) et représentent donc les processus de décision de l'agriculteur. Ils permettent d'estimer les choix de l'agriculteur pour des climats et des contraintes données. Ils peuvent reposer sur la détermination de solutions optimales afin de fournir des prescriptions pour le conseil ou sur la représentation des déterminants des pratiques afin, alors, de décrire les processus. Lorsqu'ils sont créés pour raisonner les règles de planification appelée également règles de décisions stratégiques (Penning de Vries, 1990), ils concernent en général l'échelle de l'exploitation. Citons par exemple IRMA (Leroy et al, 1997) pour l'organisation du chantier d'irrigation et SEPATOU (Cros et al, 2004) pour la gestion du pâturage. Par contre, lorsqu'ils sont créés pour raisonner des règles de décision de pilotage ou règles de décisions tactiques et opérationnelles, ils sont alors développés à l'échelle de la parcelle ou d'une partie de l'exploitation (sole ou bloc d'irrigation par exemple). Ces modèles de décision peuvent être couplés à un modèle de culture. On parle dans ce cas de modèle bio-décisionnel. Citons par exemple Décible pour la conduite du blé (Chatelin et al., 2004) et MODERATO pour la conduite de l'irrigation du maïs (Bergez et al., 2001). Le calibrage des modèles de décision repose en général sur l'étude approfondie des pratiques de gestion d'agriculteurs représentatifs des cas que l'on souhaite analyser.

### VIII.1.3 Les problèmes environnementaux et la modélisation à de nouvelles échelles

Dans les années 80, la problématique environnementale prend une place de plus en plus grande dans les travaux des agronomes. Avec le rapport Hénin, il devient clair que l'agronomie a toute sa place dans la problématique environnementale : elle s'intéresse aux logiques d'actions techniques de production tandis que ces logiques d'action sont responsables de différents types de pollution (due aux produits phytosanitaires, aux herbicides, aux engrais, aux effluents d'élevage, etc.) (Benoît et Papy, 1998) ou de problèmes de gestion de ressource (biodiversité, eau, sol).

Les activités de diagnostic et de conception de systèmes de culture sont donc amenées à prendre en compte des objectifs de préservation de l'environnement et à définir de nouveaux indicateurs. Elles sont également amenées à changer d'échelle d'analyse. Les problèmes d'environnement ou de gestion de ressource liés à l'impact des activités agricoles concernent en général des espaces dépassant celui de l'exploitation agricole. Par exemple, cela peut être des espaces tels que des bassins versants pour le problème de l'érosion ou de la pollution des eaux (ref) , des espaces correspondant au bassin d'alimentation d'une nappe profonde pour un problème de pollution de nappe ou de raréfaction de la ressource en eau (Mignolet et al, 2004 ; programme PIREN SEINE), etc. L'échelle pertinente d'analyse du problème environnemental ou de gestion de ressource dépend de l'espace occupé par la ressource, de la localisation dans le territoire agricole des pratiques potentiellement responsables du problème et de la zone d'impact de ce problème. Elle est donc à la croisée d'un espace écologique et d'un espace décisionnel (ensemble d'exploitations agricoles d'un bassin versant par exemple). Le changement d'échelle est souvent temporel également : les problèmes environnementaux touchent en effet les grands cycles biochimiques ; ils impliquent souvent des temps de latence et nécessitent a priori des solutions sur le long terme, c'est-à-dire la problématique de la durabilité.

#### VIII.1.4 L'agriculture durable et des modèles intégratifs

Englobant la problématique environnementale, celle de l'agriculture durable renouvelle le métier d'agronome et pose de nouvelles questions à la recherche agronomique.

Le devenir de l'activité agricole devient un véritable enjeu (Guillou, 2005). D'une part, les pratiques agricoles sont condamnées par la société, notamment à travers l'extension de la pollution par les nitrates et des crises sanitaires comme la « vache folle ». Le nombre d'exploitations a diminué de moitié en 20 ans. D'autre part, la qualité des paysages et de l'environnement est un élément majeur du développement des zones rurales. La société prend conscience du rôle de l'agriculture dans le maintien des espaces ruraux.

La recherche agronomique actuelle propose de mener des travaux d'intégrations de connaissances obtenues à différents niveaux d'organisation et à différentes échelles de temps et d'espace (Guillou, 2005 ; Faverdin, 2005 ; Caron, 2005). Par ailleurs, la constitution des systèmes de culture et de leur organisation dans le territoire d'exploitation n'est plus considérée comme un processus dépendant d'un seul décideur dans un espace bien défini : il est considéré comme résultat de processus de coordination entre les exploitations agricoles, les acteurs des filières, les collectivités territoriales, les administrations etc.

Devant la complexité des phénomènes (physiques, biologiques, sociaux, économiques) à analyser, la modélisation informatique devient un temps fort des recherches (Jollivet et Pavé, 1993 ; Schmidt-Lainé et Pavé, 2002 ; Kieken et al., 2003). Le développement de modèles devient de plus en plus réalisé dans le cadre de projets interdisciplinaires (Benoît et Papy, 1998 ; projets ADD, Schmidt-Lainé et Pavé, 2002). De nombreux modèles sont développés, auxquels les agronomes participent de manière plus ou moins directe. Ceux développés spécifiquement par les agronomes s'intéressent aux systèmes de culture et au territoire. Ce sont des modèles permettant de raisonner la distribution spatiale des systèmes de culture (et/ou plus largement des systèmes techniques) par rapport à un objectif collectif (réduire les flux polluants dans un bassin versant, améliorer la gestion d'un bassin de collecte d'une coopérative, réduire la consommation en eau d'irrigation d'un périmètre irrigué) qui n'est pas toujours en accord avec les contraintes et les objectifs qui relèvent d'individus. Les travaux de conception de systèmes de culture se font toujours à l'échelle parcellaire mais l'évaluation devient multicritère. Elle doit notamment tenir compte des flux (physiques, biologiques, organisationnels) entre les systèmes de culture. Ainsi, quand c'est possible, les modèles tiennent compte explicitement de la répartition spatiale des systèmes de culture et permettent d'estimer des indicateurs variables selon l'organisation spatiale des systèmes de culture. L'utilisation d'outils de type systèmes d'information géographiques facilite cette démarche.

#### VIII.1.5 Bilan

L'agronomie s'intéresse de plus en plus à l'espace et au territoire. Les recherches sur l'agriculteur au sein de son exploitation et sur le champ cultivé ne sont pas pour autant abandonnées. Elles se poursuivent et intègrent les problématiques nécessitant de changer d'échelle.

Caron distingue quatre agronomies correspondant à quatre voies de prise en compte de l'espace (ou territoire) par les agronomes (Caron, 2005):

- L'agronomie de l'écosystème régional. Le territoire est un espace administratif ou une entité écologique. Les travaux portent essentiellement sur la modélisation des flux géochimiques ou des interactions entre pratiques agricoles et processus.

- L'agronomie du fait technique à l'échelle du territoire. Elle est souvent nommée aussi « agronomie du territoire » (Papy, 2001). Son objet d'étude est le système technique. Collaborant avec des chercheurs en sciences humaines, les travaux cherchent à analyser et changer les systèmes techniques par l'intermédiaire de processus sociaux d'apprentissage, de coordination, de négociation, etc. Les modèles, quand ils sont développés, servent ici d'outils d'aide à la coordination ou négociation (Souchère,) . En permettant par exemple de simuler des scénarios et d'évaluer l'impact environnemental des scénarios envisagés, ils prennent une forme médiatrice dans le processus social.
- L'agronomie territoriale. Elle relève de l'ingénierie du territoire c'est-à-dire qu'elle étudie l'activité agricole comme vecteur de façonnage du territoire. C'est dans ce cadre que l'on peut situer les recherches portant sur les relations entre agriculture et paysage (Deffontaines et al., 1995) et les recherches portant sur les changements d'usages des sols ou « land use change » (Lambin et al., 2000 ; Rounsevell et al, 2002).
- L'agronomie que l'on pourrait nommer « intégratrice ». Elle cherche à « élaborer des cadres d'analyse régionale, à identifier les niveaux d'organisation ayant du sens, à formuler des questions traitables scientifiquement ». Ces questions se retrouvent dans les trois agronomies présentées ci-dessus. Ce serait donc une voie intégratrice permettant de faire travailler ensemble les agronomes « gestionnaires de l'espace rural » et les agronomes « ingénieurs biotechnologistes »...

Ces quatre agronomies montrent combien les processus à prendre en compte sont multiples pour des réponses à l'échelle du territoire. Les modèles développés par les agronomes concernent des territoires de taille variables : petits bassins versants, bassins des grands fleuves, région administrative, pays... .

## VIII.2 Annexe 2 : Calcul de la marge brut du maïs irrigué et du blé tendre en sec

Quelles surfaces de maïs grain irrigué dans l'avenir?

	Blé tendre sec	Maïs grain irrigué
• Rendement	55	90
• prix (E/kg)	0.12	0.10
• produits (E/ha)	642	900
• subventions	320	487
• produits bruts	962	1384
• charges intrants	306	319
engrais, semences, phytosanitaires		
• frais irrigation	0	≈300
avec amortissement		
• totales charges		
proportionnelles (E/ha)	306	619
• MB (E/ha)	656	765
⇒ ≈ - 100 euros /ha		

↗ M>B après aide  
 ↘ M<B avant aide

(D'après Solagro, 2003 et Deumier et al. 2004)

	Marge avant aides 99-2001	Marge après aides 99-2001
Jachère	-27	285
Pois protéagi	16	551
Colza	127	560
Toumesol	148	601
Orge hiver	163	444
Soja irrigué	170	776
Blé dur	251	790
Sorgho	277	608
Blé tendre	279	556
Maïs irrigué	303	742

Source : Rica 1999-2001 -Sonde grandes cultures

⇒ Si découplage des aides et si redevances, augmentation EDF et prix de l'eau et éco-conditionnalité : quelle différence??

**VIII.3 Annexe 3 : Enquêtes postales envoyées en 2000 et 2001 aux irrigants de la zone de la Baïse.**

**VIII.4 Annexe 4 : Questionnaire postal envoyé en 2003 aux irrigants de la zone de la Baise.**

**VIII.5 Annexe 5 : Questionnaire postal envoyé en 2005 aux irrigants de la zone de la Baïse.**

## VIII.6 Annexe 6 : Guide d'entretiens 2003 pour enquête auprès des O.A.S

### Questions enquête coopératives et négoce

1. Description des Organismes Stockeurs ( on ne s'intéresse qu'au mais » conso »)
  - Rôle de distributeurs, stockeurs, conseil ?
  - Zone « couverte » par la coopérative : en Ha, en Ha de maïs semé ? en nombre d'adhérents ou d'exploitations, en CA ? (Zone d'influence pour spatialisation des données)
  - Avoir une idée de la quantité de semence vendue /dose et de la surface que cela permet de semer.
  - Données chiffrées des variétés vendues / date / commune de 1998 à 2002 si possible? Voir comment ils les classent. Trace des échanges de variétés ?
2. Choix de variétés par les OS : comment choisissent-ils les variétés qu'ils vendront ensuite aux agriculteurs ?
  - Sur quelles informations basent ils leur choix de gamme et par conséquent leurs conseils (si conseil)?
    - Informations d'organismes professionnels régionaux ou nationaux ?
    - Informations acquises auprès des semenciers ?
    - Essais propres à la coopérative ?
    - Essais chez des agriculteurs ?
    - Bilan de la récolte n-1...
    - Analyse climatique ?
    - Autre ?
  - A quel moment font ils leur choix de gamme ?
  - Auprès de qui s'approvisionnent ils ?
  - Sont-ils dépendants des désirs de certains agriculteurs ?
3. Propositions et conseils des OS aux agriculteurs : que proposent/conseillent ils ? (étalement des précocités ?) selon quels critères ?

Comment s'organise le conseil pour le choix de variétés :

  - Organisation dans le temps des réunions et/ou du conseil personnalisé de la fin de la récolte à la fin de la campagne suivante.
  - La coopérative établit-elle une typologie de ses clients ? si oui, comment ? selon quels critères ?
  - Comment adapte-t-elle ses conseils selon les agriculteurs ? Pour les « gros », est-ce eux qui commandent des variétés que la coopérative se procure ensuite ?

Quel est le contenu de ce conseil ?

  - Que conseillent ils en terme d'étalement de précocité ? Conseillent-ils plusieurs variétés ?
  - Marché de soudure : est ce un débouché important en quantité ? en terme de marge brute ? quels conseils pour ce marché ? par qui est il approvisionné ? ( quel type d'agriculteur ?)
  - Essais variétaux : le conseillent ils ? à qui ? Est ce souvent réalisé ?
  - Comment est adapté le conseil: suivant la taille de la sole ? la localisation géo de la sole ? le type de sol ? présence irrigation ? autre ?

4. Choix des agriculteurs par rapport aux OS :

Achat/ échange semences

- A quelle période les agriculteurs achètent ils leur semence ?
- En achète t-il de différentes précocités en prévision de l'étalement des semis ?
- Y a –il possibilité de l'échanger si survient un problème au moment du semis ?  
(comment la coopérative suit elle la période de semis ?)
- Quelle situation pousse l'agriculteur a changé de semence ? (la coopérative fait elle des propositions ?)
- Les agriculteurs utilisent-ils souvent la possibilité de l'échanger ? Comment cela se passe-t-il ?
- Date limite du 15 mai ? est ce une réalité dans la zone ? Y a t-il conseil de changer de précocité non suivit d'effet ?

## VIII.7 Annexe 7 : Guide d'entretiens 2004 pour enquête auprès de maïsiculteurs

### QUESTIONNAIRE AGRICULTEURS

#### □ DONNEE GENERALES SUR L'EXPLOITATION

1. Quelle est la surface de votre exploitation ?
2. Quelles sont vos productions ?
3. Quel est votre âge ?
4. Etes vous pluriactif ?
5. De quelle main d'œuvre disposez vous ?
6. Etes vous impliqué dans la profession agricole ?
7. Avec quelle coopérative ou établissement privé travaillez-vous ?
8. Quels sont vos appuis techniques ?
9. Possédez vous du matériel en CUMA ? - semis  
- récolte
10. Si production animale et végétale : Comment ces 2 productions entre t-elles en concurrence au niveau temporel ?
11. La culture de Maïs est-elle votre activité principale sur l'exploitation ?
12. Cultivez-vous du maïs semence ?
13. Accueillez vous des essais variétaux sur votre exploitation ?
14. Quelle est votre surface irrigable ? - surface Maïs  
- surface irriguée totale
15. Quelle est votre rotation type ?
16. Quels sont vos objectifs de rendement sur maïs ?
17. Comment gérez-vous l'interculture ?
18. Faites vous intervenir une entreprise agricole sur votre exploitation ?

#### □ ORGANISATION DU CHANTIER DE SEMIS

19. Comment s'organise votre chantier de semis ?
20. Comment choisissez-vous les indices de précocité de vos variétés ? - 2003  
- 2004
21. Quelle est la répartition des indices de précocité au sein de votre sole Maïs ?
22. Comment définissez vous la ou les dates de semis ?
23. Quelle est votre période moyenne de semis ?
24. Combien de jours dure le chantier ?
25. Quelle est votre vitesse de semis ?
26. Quelles difficultés rencontrez-vous lors du chantier de semis ?
27. Si intervention de la CUMA : Comment le matériel est-il attribué aux agriculteurs ?
28. Si intervention de la CUMA : Fractionnez-vous votre chantier de semis en plusieurs fois ?

□ GESTION DE L'IRRIGATION

29. De quel matériel d'irrigation disposez-vous ?
30. Quel est votre débit souscrit à la CACG ?
31. Utilisez-vous un outil d'aide à la gestion de l'irrigation ?
32. Comment déclenchez-vous la première irrigation sur Maïs ? - indice précocité
- état cultural
  - parcelle semée en premier
  - parcelle témoin
  - outil d'aide pour la décision utilisé
33. En année sèche votre matériel d'irrigation est-il assez performant pour conserver vos rendements ?
34. Quel est le bilan de l'année 2003 sur votre exploitation et quelles conclusions tirez-vous ?

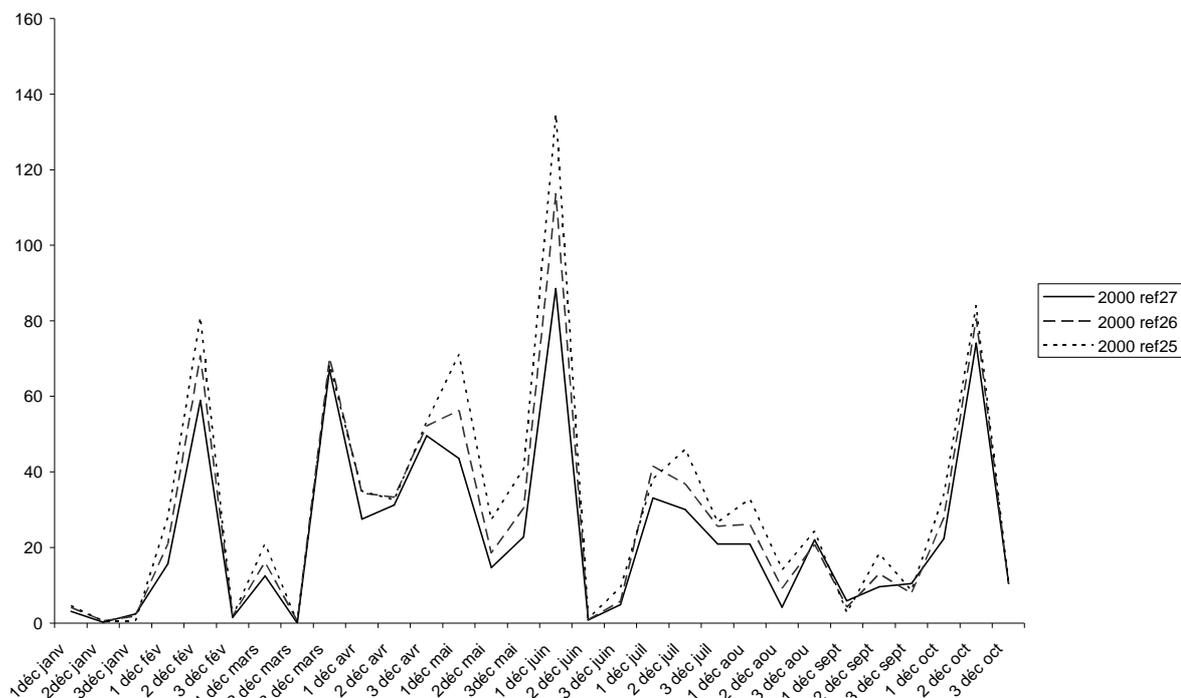
□ ORGANISATION DU CHANTIER DE RECOLTE

35. Quelle est votre période de récolte ?
36. Sur combien de jours se déroule-t-elle ?
37. Si intervention d'un agent externe : Pensez-vous que l'intervention de l'entreprise ou de la CUMA ne vous permet pas de récolter votre culture à une date optimale ?
38. Quelles sont les principales contraintes lors de la récolte ?
- gelées précoces
  - impossibilité de rentrer sur les parcelles
  - disponibilité du matériel
  - avancement de la culture
  - culture suivante
39. Livrez-vous la totalité de votre récolte ?
40. Possédez-vous une unité de « stockage-séchage » ?

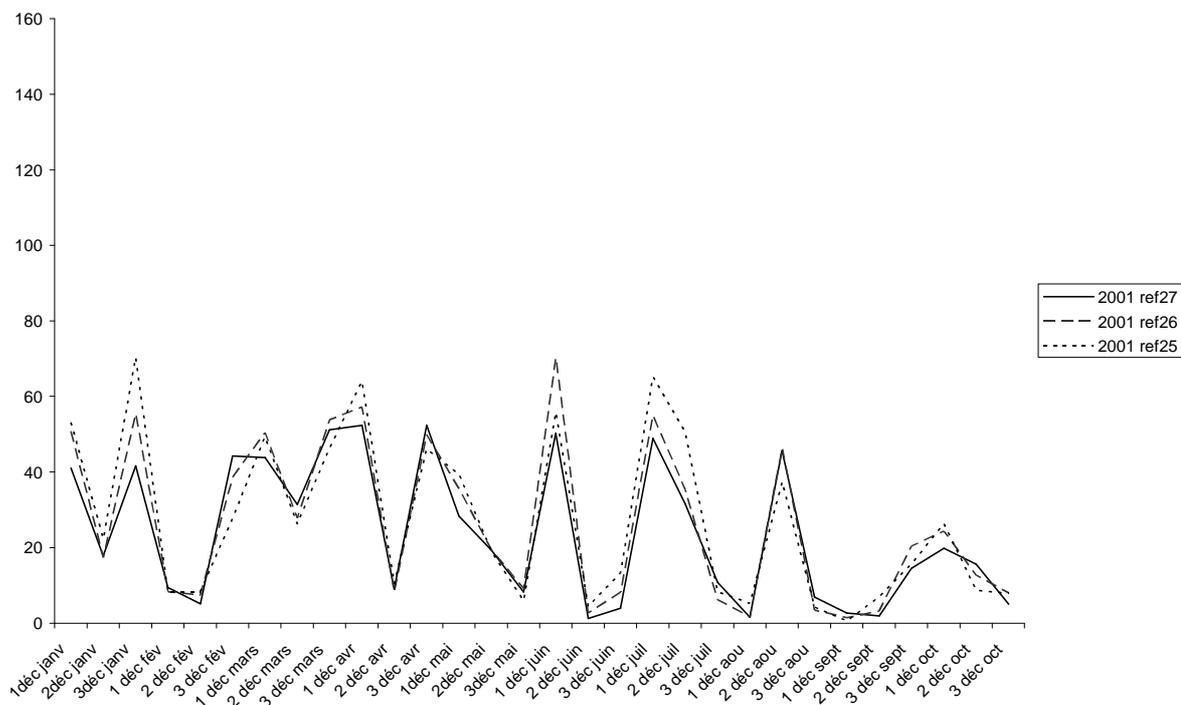
□ PERSPECTIVES

41. Comment percevez-vous la future réforme de la PAC ?
42. Quelles vont être vos adaptations ?
- gestion de la jachère
  - rendements objectifs
  - surface irriguée
  - choix culturaux
43. Comment voyez-vous l'avenir de votre exploitation ? Ya-t-il une succession ?

**VIII.8 Annexe 8 : Pluviométrie en 2000, 2001, 2003, 2004 et 2005 pour les points de grille 25, 26 et 27 (de janvier au 31 octobre)**



**Figure 74 : pluviométrie en 2000**



**Figure 75 : pluviométrie en 2001**

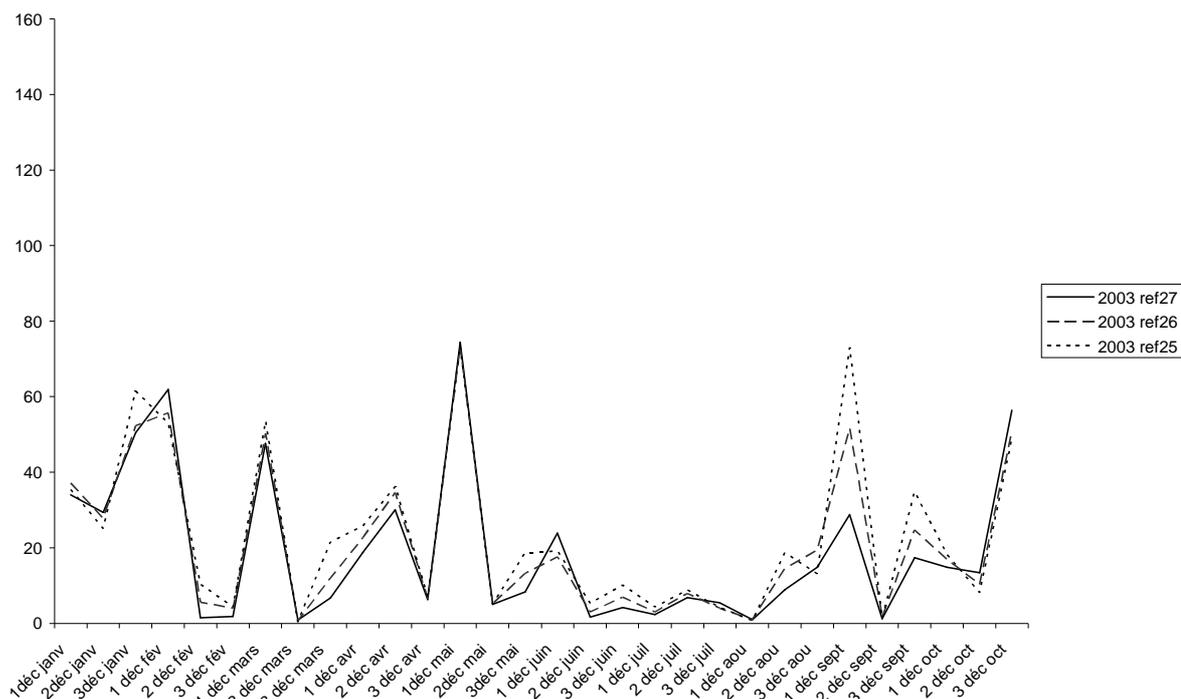


Figure 76 : pluviométrie en 2003

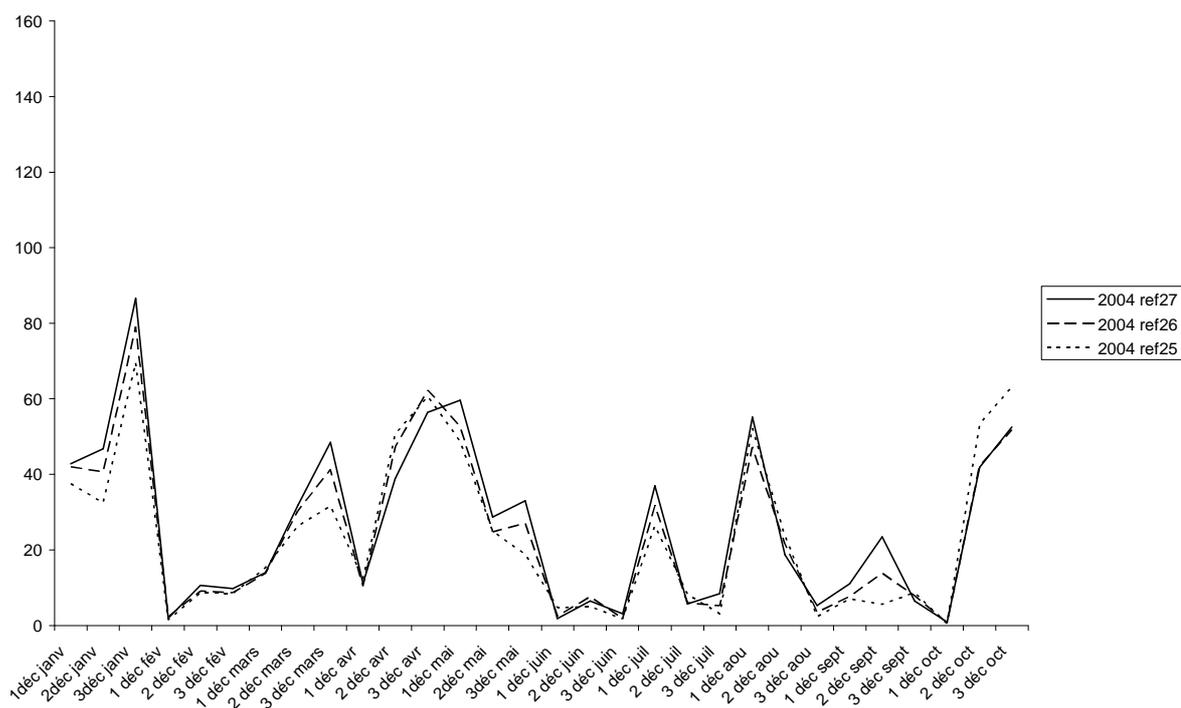


Figure 77 : pluviométrie en 2004

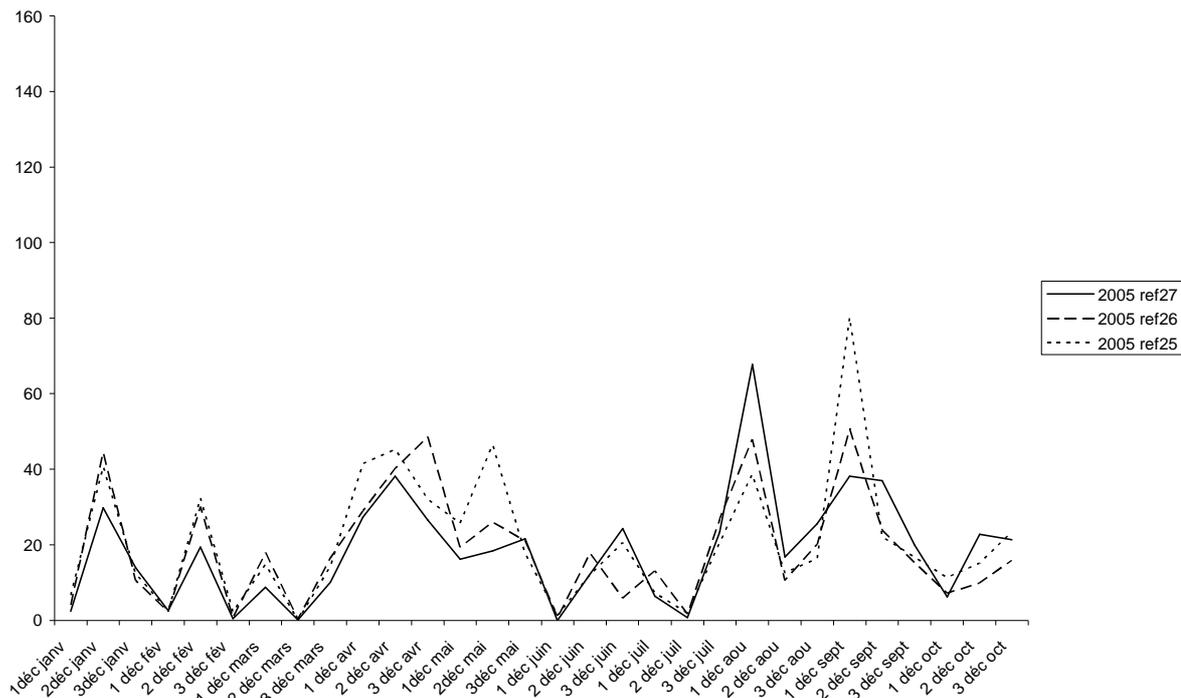


Figure 78 : pluviométrie en 2005

### VIII.9 Annexe 9 : Sorties de l'analyse des correspondances multiples et de la classification ascendante hiérarchique effectuée sur les variables SOW, PRECO, DENS.

biplot isométrique ligne

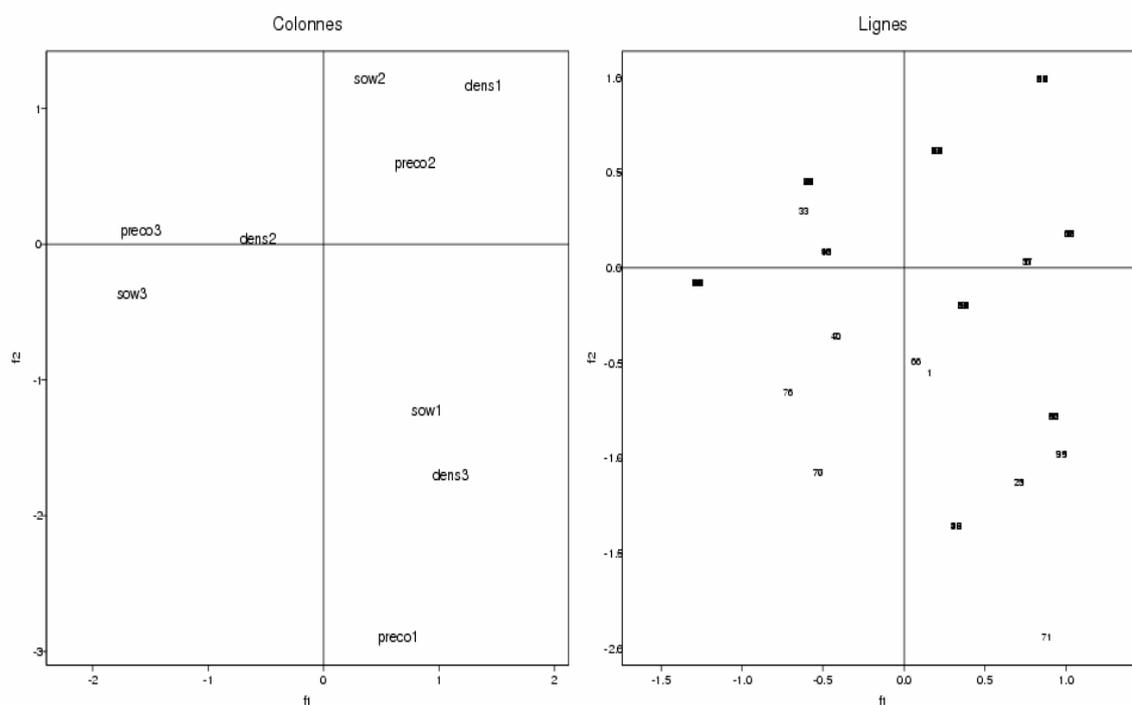
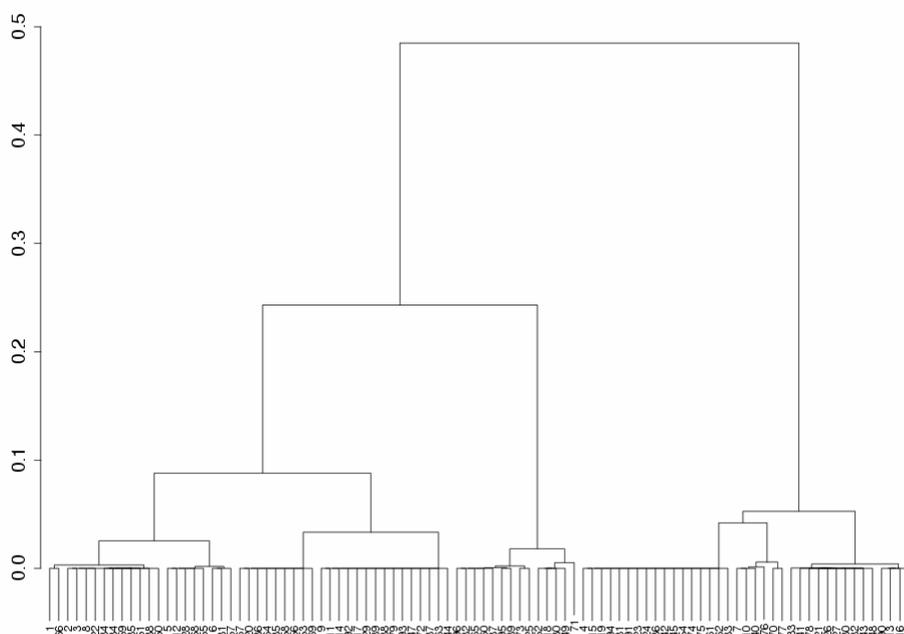
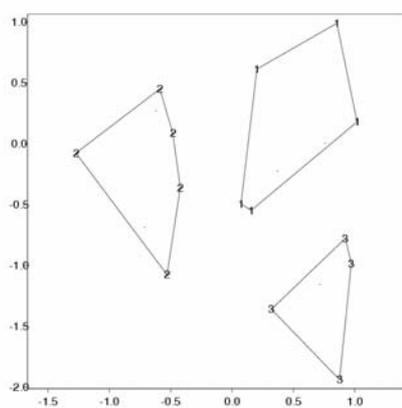


Figure 79 : Représentation sur les deux premiers axes des variables SOW, PRECO, DENS



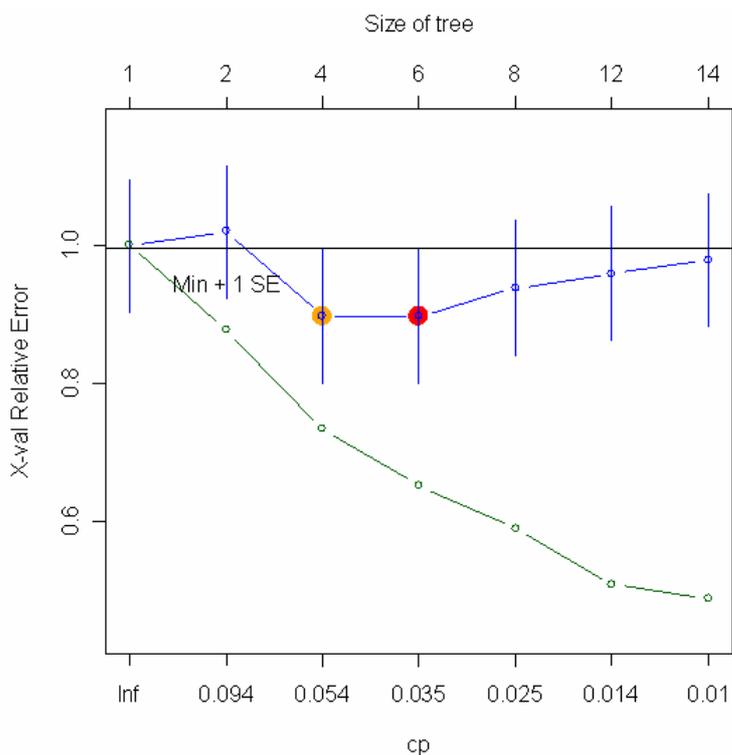
**Figure 80 : Dendrogramme après classification ascendante hiérarchique**



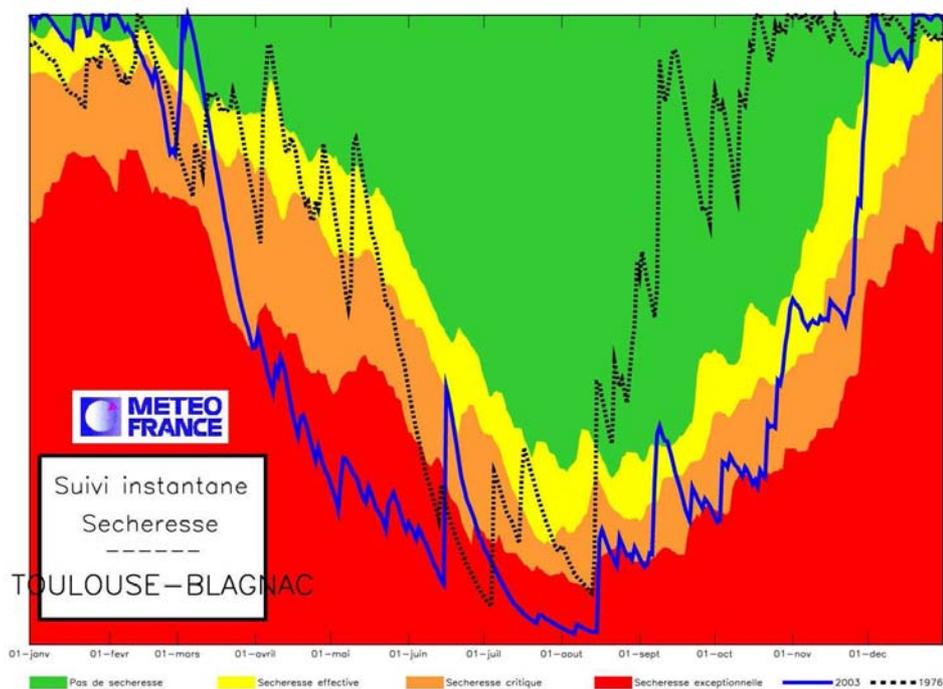
**Figure 81 : projection des trois classes de stratégies sur les deux premiers facteurs**

### VIII.10 Annexe 10 : Résultat de la validation de l'arbre de classification prédictif des stratégies de semis et de choix de précocité

La validation a été réalisée sur l'échantillon de départ scindé en groupes de 10 données. Le graphique présentant les résultats de la validation croisée représente l'erreur de prédiction en fonction de la taille de l'arbre de classification (nombre de nœuds). La courbe présente un minimum pour un arbre à 6 nœuds ce qui indique que cet arbre en particulier est de nature prédictive. L'arbre à 6 nœuds a donc été choisi.



### VIII.11 Annexe 11 : Indice sécheresse 2003 pour la station météorologique de Blagnac (31) (source: METEO France)



**Figure 82: "Indice sécheresse" 2003.**

Il s'agit d'un suivi de l'état des réserves du sol par gestion d'un bilan hydrique simplifié mono réservoir (RFU=0mm et RS=100mm) avec frein à l'évaporation proportionnel au remplissage. Différentes zones de couleur indiquant le degré de sécheresse en cours (pas de sécheresse, sécheresse effective, sécheresse critique, sécheresse exceptionnelle) sont indiquées.

### VIII.12 Annexe 12 : Distribution des groupes de précocité selon la PRA (extrait du modèle informatique)

Mise en mémoire des différentes répartitions selon le nombre de précocité et la PRA

PRA : 1 : ASG, 2 : BIG, 3 : HARM, 4 : ASY, 5: GAS

#pour une précocité; dans l'ordre : E2, E1, D, C, B, A

distr1Precocite<-list()

distr1Precocite[[1]]<-c(0.11,0.56,0.33,0,0,0)

distr1Precocite[[2]]<-c(0,0.63,0.37,0,0,0)

distr1Precocite[[3]]<-c(0.25,0.75,0,0,0,0)

distr1Precocite[[4]]<-c(0,0.17,0.66,0.17,0,0)

distr1Precocite[[5]]<-c(0,1/3,1/3,1/3,0,0)

#pour deux précocités ; dans l'ordre : E2-E1, E1-D, E2-D, E2-C, E1-C, D-C

distr2Precocite<-list()

distr2Precocite[[1]]<-c(0.20,0.70,0,0,0,0.10)

distr2Precocite[[2]]<-c(0.1667,0.6667,0.0952,0.0238,0.0238,0.0238)

distr2Precocite[[3]]<-c(0,0.715,0.1425,0,0.1425,0)

distr2Precocite[[4]]<-c(0,0.80,0.10,0,0,0.10)

distr2Precocite[[5]]<-c(0.50,0.50,0,0,0,0)

#pour trois précocités; dans l'ordre : E2-E1-D, E1-D-C, E2-D-C

distr3Precocite<-list()

distr3Precocite[[1]]<-c(1,0,0)

distr3Precocite[[2]]<-c(0.875,0.125,0)

distr3Precocite[[3]]<-c(0.25,0.25,0.50)

distr3Precocite[[4]]<-c(0,1,0)

distr3Precocite[[5]]<-c(0.875,0.125,0)

#pour trois précocités; dans l'ordre : E2-E1-D-C (une seule possibilité pour tous)

### VIII.13 Annexe 13 : Paramétrage des règles de décision d'irrigation dans le modèle ADEAUMIS

Rule	If	Condition			Then	Action
		indicator	operator	threshold value		
Starting		julian day	>=	15 June	irrigate	20 mm
	and	crop stage	>=	10-11 leaves		
	and	P over last 5 days	<	10 mm		
	and	ET0 over last 5 days	>	15 mm		
returning (without rain)		last irrigation	>=	10 days before	irrigate	28 mm before flowering, 34 mm during and after flowering and 32 mm during early grain filling stage
delaying (in case of rain)		cumulated precipitation (over 2 mm) from D-5 to D-1*	>=	16 mm		no irrigation before min(7, CP <sub>5</sub> /5) jours
Ending		crop stage	>=	50% grain moisture content stage	end irrigation	
	and	cumulated precipitation over 7 days	>	20 mm		
	and	cumulated PET over 7 days	<	25 mm		
	else				last irrigation	20 mm

\* = CP<sub>5</sub>



**VIII.14. Annexe 14 : Contexte d'irrigation choisi dans MODERATO**

[Indicateur]

Position=1

[Contexte]

DebitMax=4

TauxMax=24

DoseMini=10

DoseMaxi=80

JoursSans=0,0,0,0,0,0,0,

VolumeLimite=-999

isDebit1=0

DebitTauxDeA1=-999,-999,-999,-999

JoursSans1=0,0,0,0,0,0,0,

isDebit2=0

DebitTauxDeA2=-999,-999,-999,-999

JoursSans2=0,0,0,0,0,0,0,

isDebit3=0

DebitTauxDeA3=-999,-999,-999,-999

JoursSans3=0,0,0,0,0,0,0,

isDebit4=0

DebitTauxDeA4=-999,-999,-999,-999

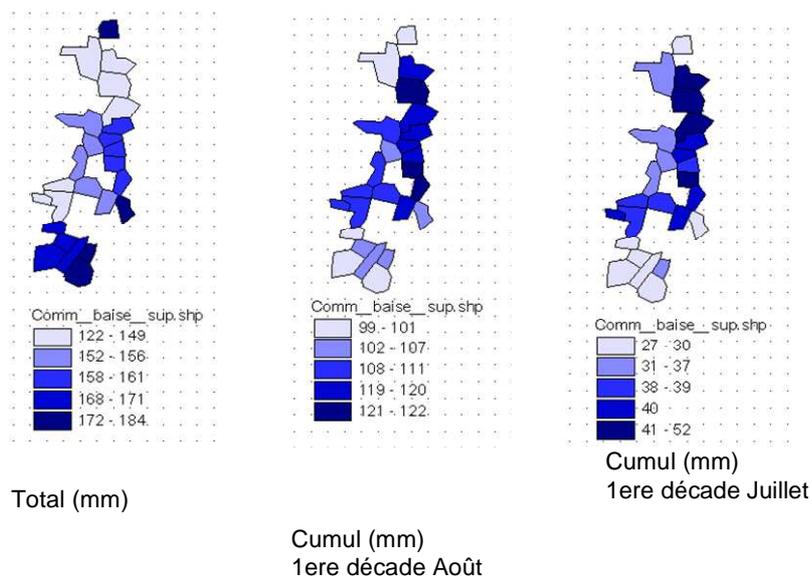
JoursSans4=0,0,0,0,0,0,0,

isDebit5=0

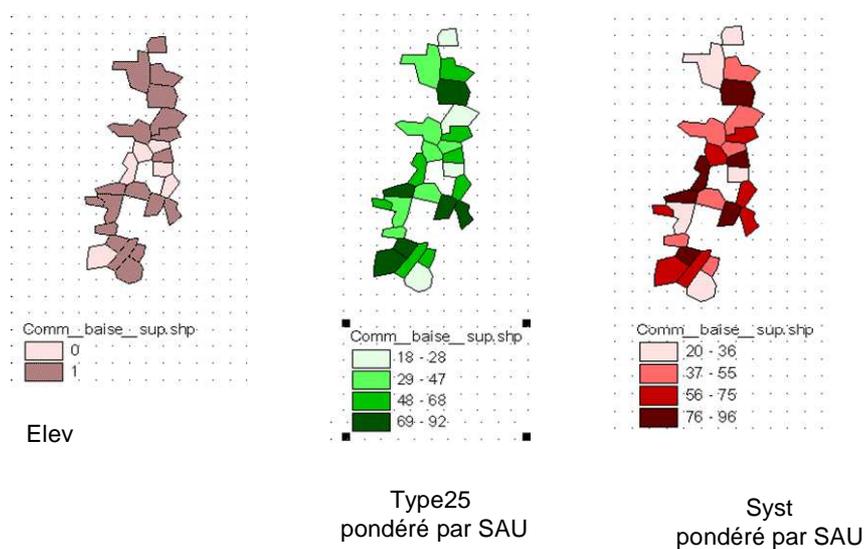
DebitTauxDeA5=-999,-999,-999,-999

JoursSans5=0,0,0,0,0,0,0,

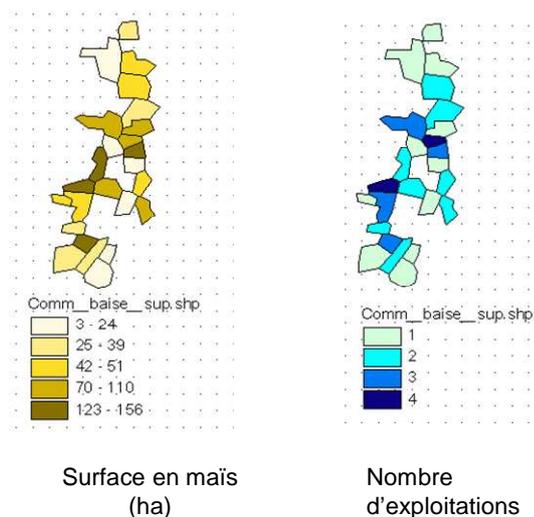
### VIII.15 Annexe 15 : Représentation spatiale des données liées à la demande en eau (source : enquête postale 2005, 47 agriculteurs)



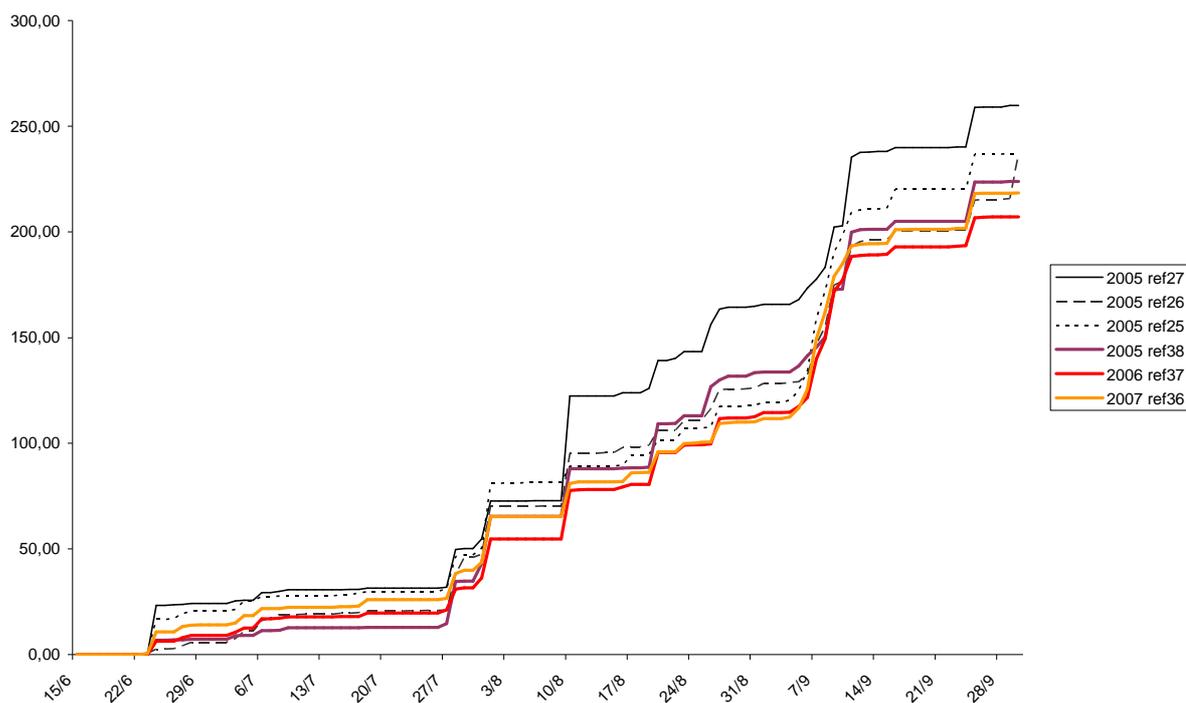
**Figure 83 : quantité d'eau unitaire en fin de campagne, à la première décade d'aout et à la première décade de juillet**



**Figure 84 : présence d'élevage (1) ou non (0), pourcentage de maïs dans la SAU dans chaque exploitation pondéré par la SAU totale par commune, pourcentage de surface irriguée dans la SAU dans chaque exploitation pondéré par la SAU totale par commune**



**Figure 85 : Surface de maïs grain irrigué et nombre d'exploitations par commune**

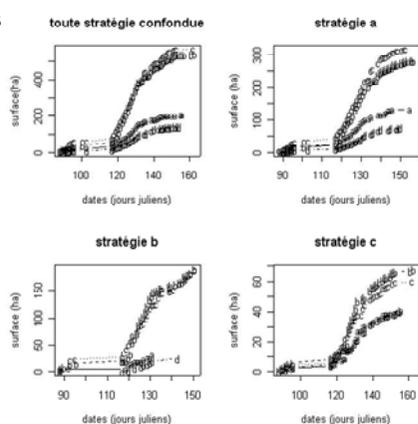


**Figure 86 : Cumul de la pluviométrie du 15 juin au 30 septembre pour les points de grille couvrant la zone d'étude**

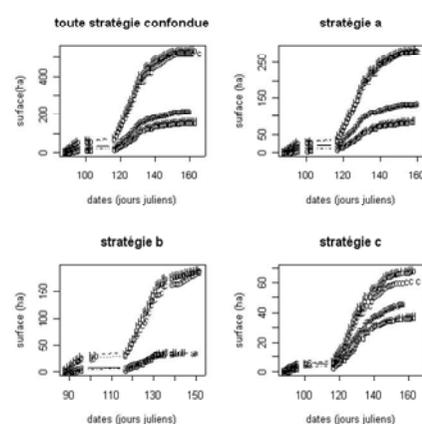
La différence de pluviométrie à partir du 10 août entre le point de grille 27 (situé au nord de la zone) et les autres points de grille (environ 30 mm) peut expliquer que la quantité d'eau unitaire demandée en fin de campagne dans les communes situées au nord de la zone est inférieure à celle des communes situées au sud (Figure 83).

### VIII.16 Annexe 16 : Dynamique des semis des différents groupes de précocité pour chaque stratégie et toutes stratégie confondues pour 10, 50, 300 et 2500 répétitions et Résultats pour 1 répétition.

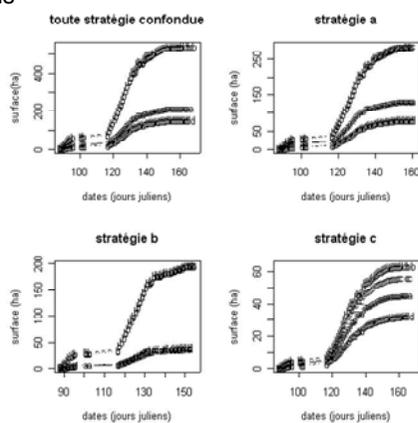
10 répétitions



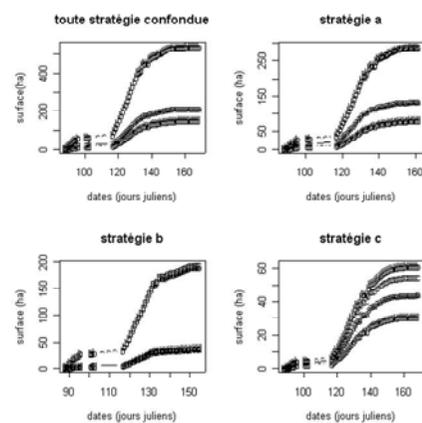
50 répétitions



300 répétitions



2500 répétitions



### 1 répétition

