



**ECOLE DOCTORALE SCIENCES DE L'HOMME ET DE LA SOCIÉTÉ
(ED462)**

**MEMOIRE EN VUE DE L'OBTENTION DU
DIPLOME D'HABILITATION A DIRIGER DES RECHERCHES**

GEOGRAPHIE

Jean-Christophe POUSSIN

Du diagnostic à l'action en agriculture

Activités, espaces et modèles

SOUS LA DIRECTION DE :
Jean-Charles CLANET, Directeur de Recherche à l'IRD

Soutenue le :
19 Mai 2008

Jury :

Vincent BARBIN, Professeur à l'Université de Reims – Champagne-Ardenne

Jacques CANEILL, Professeur à l'Etablissement National d'Enseignement Supérieur Agronomique de
Dijon (Rapporteur)

Jean-Charles CLANET, Directeur de Recherche à l'Institut de Recherche pour le Développement

Alain MARRE, Professeur à l'Université de Reims – Champagne-Ardenne

Michel MIETTON, Professeur à l'Université Jean Moulin - Lyon 3

Martino NIEDDU, Maître de Conférence à l'Université de Reims – Champagne-Ardenne (Rapporteur)

Marie-Josée PENVEN, Professeur à l'Université de Rennes 2 – Haute Bretagne (Rapporteur)

Remerciements

Mes remerciements vont tout d'abord au Professeur Jean-Charles CLANET qui m'a proposé son concours pour mon inscription à Reims, qui m'a soutenu, et qui m'a guidé dans la rédaction de ce mémoire. J'espère pouvoir continuer à travailler avec lui, sur le fleuve Niger par exemple...Merci également à Vincent BARBIN pour son soutien, sa disponibilité et ses conseils.

Je tiens également à remercier ma sœur Bénédicte BOUDOU pour la relecture et les corrections de ce texte quelque peu rébarbatif et si mal écrit en comparaison des siens.

Merci également à Chloé BORGEL, Orianne LABBE et Christine LEGRAND pour leur aide, et à Christian LEDUC pour son soutien et ses conseils, ainsi qu'à toute l'équipe de la MSE.

Liste des sigles et acronymes

ADD	Agriculture et Développement Durable (programme stratégique de l'Agence Nationale de la Recherche)
ADRAO	Association pour le Développement de la Riziculture en Afrique de l'Ouest (WARDA en anglais)
AFD	Agence Française pour le Développement
ANR	Agence Nationale de la Recherche
APPEAU	Acronyme du programme « Quels agrosystèmes et quelles politiques publiques pour une gestion durable des ressources en eau »
APPIA	Amélioration des Performances sur les Périmètres Irrigués en Afrique
ARC	Agricultural Research Council
AS1-SIRMA	Action Structurante n°1 du projet FSP-SIRMA
AS2-SIRMA	Action Structurante n°2 du projet FSP-SIRMA
BASIC	Beginner's All-purpose Symbolic Instruction Code
CalCul	Calendrier Cultural (logiciel d'aide à la décision)
CCLTG	Communauté de Communes de Lomagne Tarn et Garonnaise
CEMAGREF	Centre d'Etudes du Machinisme Agricole et du Génie Rural des Eaux et Forêts
CGIAR	Consultative Group on International Agricultural Research (Groupe Consultatif pour la Recherche Agricole Internationale)
CIHEAM-IAMM	Centre International des Hautes Etudes Agronomiques – Institut Agronomique Méditerranéen de Montpellier
CIRAD	Centre International de Recherche Agronomique pour le Développement
CNCAS	Caisse Nationale de Crédit Agricole du Sénégal
CNRADA	Centre National de Recherche Agronomique pour le Développement Agricole (Mauritanie)
CORAF	Conseil Ouest et Centre Africain pour la Recherche et le Développement Agricole
CPWF	Challenge Program on Water and Food (Challenge Programme Eau et Alimentation)
CRDA	Commissariat Régional du Développement Agricole
CROPWAT	Crop Water requirements (modèle de calcul des besoins en eau des cultures développé par la FAO)
CSS	Compagnie Sucrière Sénégalaise
DEA	Diplôme d'Etudes Approfondies
DGGR	Directions Générales du Génie Rural
DGRE	Directions Générales du Ressources en Eaux
DIVHA	Dynamiques, Impacts et Valorisation des Hydro-Aménagements
DPDR	Département de la Promotion et du Développement Rural
ENA	Ecole Nationale d'Agriculture (Meknès)
ENSAA	Ecole Nationale Supérieure des Sciences Agronomiques Appliquées de Dijon (actuel Etablissement National d'Enseignement des Sciences Agronomiques de Dijon - ENESAD)
ESR	Economie et Sociologie Rurales (Département de l'INRA)
ETM	EvapoTranspiration Maximale
FAC	Fonds d'Aide et de Coopération (Ministère de la Coopération)
FAO	Food and Agriculture Organisation
FARMSCAPE	Démarche développée par la recherche agronomique australienne sur le fonctionnement des exploitations agricoles
FCFA	Franc de la Communauté des pays d'Afrique de l'Ouest

FED	Fonds Européen de Développement
FSP	Fonds de Solidarité Prioritaire (Ministère des Affaires Etrangères)
GA	Grands Aménagements
GEGENA	Groupe d'Etude des Géomatériaux et des Environnements Naturels et Anthropiques
GIE	Groupement d'Intérêt Economique
GTZ	Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (fonds de coopération allemande)
IAV	Institut Agronomique et Vétérinaire (Rabat)
IER	Institut d'Economie Rurale (Bamako)
INAT	Institut National Agronomique de Tunis
INCO-MED	International Research Cooperation with Mediterranean Partnership
INRA	Institut National pour la Recherche Agronomique
INRGREF	Institut National de Recherche en Génie Rural Eaux et Forêts (Tunis)
IPTRID	Programme International pour la Technologie et la Recherche en Irrigation et Drainage
IRD	Institut de Recherche pour le Développement
ISRA	Institut Sénégalais de Recherche Agricole
INA-PG	Institut National Agronomique - Paris Grignon
MAE	Ministère des Affaires Etrangères
MAS	Mission d'Aménagement du fleuve Sénégal
MERGUSIE	Merguellil, Ressource, Gestion et Usages Intégrés de l'Eau
OMVS	Organisation pour la Mise en Valeur du fleuve Sénégal
OP	Organisation Paysanne
ORSTOM	Office de la Recherche Scientifique et Technique d'Outre-Mer
OTELLO	Organisation du Travail et Langage à Objets (logiciel d'aide à la décision)
PAC	Politique Agricole Commune
PCSI	Programme Commun sur les Systèmes Irrigués
PDRG	Plan Directeur de la Rive Gauche
PIP	Périmètre Irrigué Privé
PIV	Périmètre Irrigué Villageois
PPI	Périmètre Public Irrigué
PSI-CORAF	Pôle régional CORAF de recherche sur les Systèmes Irrigués sahéliens
RIDEV	Riz Irrigué – Développement (logiciel d'aide à la décision)
SAD	Systèmes Agraire et Développement (Département de l'INRA)
SAED	Société d'Aménagement et d'Exploitation des terres du Delta et de la vallée du Sénégal
SAGE	Schéma d'Aménagement et de Gestion des Eaux
SIAD	Systèmes Interactifs d'Aide à la Décision
SIG	Système d'Information Géographique
SIRMA	Programme de recherche sur les économies d'eau en Systèmes Irrigués au Maghreb
SONADER	Société Nationale de Développement Rural (Mauritanie)
UE	Union Européenne
UMR	Unité Mixte de Recherche
G-eau	Gestion de l'Eau, Acteurs, Usages
UNESCO	Organisation des Nations Unies pour l'Education, la Science et la Culture
WADAMED	Water Demand knowledge base in the Mediterranean
WARDA	West African Rice Development Association (ADRAO en français)
ZonAgri	Environnement de modélisation des activités agricoles (logiciel)

Table des matières

Préambule	8
Mon parcours de recherche.....	9
Rôle et outils de l'agronome	10
<i>Milieu réel et milieu contrôlé</i>	<i>10</i>
<i>Outils du diagnostic agronomique</i>	<i>11</i>
<i>Modèle d'action.....</i>	<i>12</i>
Modèles pour l'aide à la décision en agriculture.....	14
<i>Outils classiques de gestion et d'aide à la décision</i>	<i>14</i>
<i>Outils fondés sur des modèles décisionnels.....</i>	<i>15</i>
<i>Couplage de modèles décisionnel et biophysique</i>	<i>16</i>
 1 ^{ère} Partie : MEMOIRE DE TRAVAUX	 18
I-1 Le milieu naturel et son exploitation	21
<i>I-1-1 Caractères hydro-climatiques et pédologiques de la vallée et du delta du Sénégal</i>	<i>22</i>
<i>I-1-2 L'exploitation traditionnelle de la vallée</i>	<i>23</i>
<i>I-1-3 Le développement de l'irrigation et l'aménagement du fleuve</i>	<i>25</i>
I-2 Le riz, sa culture et ses performances dans la vallée.....	30
<i>I-2-1 Le riz et la riziculture irrigué</i>	<i>30</i>
<i>I-2-2 Variabilité des performances dans la vallée</i>	<i>33</i>
I-3 Du diagnostic à l'action au niveau de la parcelle	38
I-3-1 Dispositif et méthode d'analyse	39
I-3-2 Les agriculteurs suivent-ils les recommandations techniques ?	41
I-3-3 Améliorer le calendrier des interventions avec RIDEV	44
I-3-4 Déterminants des pratiques et organisation des décisions.....	45
I-4 Du diagnostic à l'action au niveau de l'aménagement.....	50
<i>I-4-1 Quelle est la variabilité au sein d'un périmètre irrigué ?</i>	<i>50</i>
<i>I-4-2 Planifier la campagne sur le périmètre pour améliorer les performances</i>	<i>52</i>
<i>I-4-3 L'expérience de la planification sur un périmètre irrigué villageois.....</i>	<i>55</i>
Conclusion.....	58
 2 ^{ème} Partie : PROJET DE RECHERCHE	 61
II-1 Comment représenter la demande agricole en eau ?.....	64
<i>II-1-1 Estimer la demande en eau sur la base de modèles biophysiques</i>	<i>64</i>
<i>II-1-2 Optimiser les systèmes de production au plan économique.....</i>	<i>65</i>
<i>II-1-3 Explorer des scénarios avec un simulateur budgétaire</i>	<i>66</i>
<i>II-1-4 Représenter la demande en eau dans une région.....</i>	<i>67</i>
II-2 Définition d'un cadre de modélisation	69
<i>II-2-1 Définition de l'entité « activité » associée à un lieu</i>	<i>69</i>
<i>II-2-2 Application à la représentation de l'activité agricole à l'échelle régionale</i>	<i>70</i>
<i>II-2-3 Cahier des charges d'un environnement de modélisation</i>	<i>71</i>

II-3 Champ d'application du cadre de modélisation	74
<i>II-3-1 Des exemples sur la plaine de Kairouan.....</i>	<i>74</i>
<i>II-3-2 Les contraintes de la démarche et les limites du cadre proposé.....</i>	<i>76</i>
<i>II-3-3 Applications envisagées</i>	<i>78</i>
Conclusion.....	80
 3^{ème} Partie : CURRICULUM VITAE ET LISTE DES PUBLICATIONS	82
III-1 Curriculum Vitae	83
<i>III-1-1 Diplômes et cursus à l'IRD.....</i>	<i>83</i>
<i>III-1-2 Enseignement, encadrement et diffusion des connaissances</i>	<i>87</i>
<i>III-1-3 Partenariat et développement</i>	<i>91</i>
<i>III-1-4 Gestion de la recherche</i>	<i>94</i>
III-2 Liste des Publications.....	99
<i>III-2-1 Articles dans revues à comité de lecture [R].....</i>	<i>99</i>
<i>III-2-2 Articles de vulgarisation [V]</i>	<i>99</i>
<i>III-2-3 Communications à congrès et séminaires [C].....</i>	<i>100</i>
<i>III-2-4 Ouvrage et chapitres d'ouvrages [O].....</i>	<i>102</i>
<i>III-2-5 Autres publications scientifiques [S]</i>	<i>103</i>
<i>III-2-6 Documents vidéo [D].....</i>	<i>103</i>
<i>III-2-7 Logiciels [L]</i>	<i>103</i>
<i>III-2-8 Rapports multigraphiés [G].....</i>	<i>104</i>
 Références bibliographiques	106
 Annexe : Dossier de Publications	113

Liste des illustrations de la 1^{ère} partie :

Tableau 1 : Coûts et marges par hectare en équivalent paddy

Tableau 2 : Caractérisation des parcelles suivies selon l'agriculteur (noté de A à H), l'aménagement (GA de Nianga, 6 PIV et 3 PIP), et l'implantation du riz ('D' pour semis direct, 'R' pour repiquage, '-' pour non observé) en saison chaude et en hivernage 1994 et 1995.

Tableau 3 : Exemples de calendrier prévisionnel fourni par RIDEV pour une culture de saison chaude semée le 15 mars et pour une culture d'hivernage semée le 15 juin

Tableau 4 : Rendements obtenus en 1998 dans les parcelles semées avec Jaya et Sahel 108 et apports d'eau estimés en fonction du nombre d'irrigation après la mise en eau

Figure 1 : Carte du bassin du fleuve Sénégal

Figure 2 : Carte de la vallée et du delta du Sénégal (sur la base de la carte géomorphologique)

Figure 3 : Températures moyennes journalières enregistrées sur 6 sites répartis d'aval en amont du fleuve

Figure 4 : Pluviométrie dans la vallée du Sénégal.

Figure 5 : Evolution du débit (ou module) annuel du fleuve à Bakel entre 1904 et 2000

Figure 6 : Coupe schématique de la vallée montrant l'occupation de l'espace

Figure 7 : Localisation des 4 délégations de la SAED et aménagements hydro-agricoles sur la rive sénégalaise du Sénégal.

Figure 8 : Structure hydraulique d'un périmètre irrigué

Figure 9 : Durée du cycle semis-maturité et taux de stérilité moyens selon la date de semis et le site (depuis l'aval vers l'amont) pour deux variétés de riz (moyennes calculées à l'aide du logiciel RIDEV)

Figure 10 : Distribution des rendements selon l'année et la saison de culture

Figure 11 : Relation entre variabilité des rendements et variabilité de coût de production (a) ou variabilité de quantité d'azote apporté (b)

Figure 12 : Effet de la surface cultivée sur la variabilité du rendement et du coût hors redevance, Délégation de Dagana, hivernages 1994, 95 et 96

Figure 13 : Zone étudiée et localisation des aménagements sur la carte géomorphologique et sur une image satellite.

Figure 14 : Schéma d'élaboration du rendement du riz irrigué d'après Durr (1984) et Dingkuhn (1995).

Figure 15 : Durée du cycle et taux de stérilité moyens et extrêmes simulés avec RIDEV selon la date de semis pour la variété Sahel 108 (cycle court) dans la région de Podor.

Figure 16 : Principe du logiciel RIDEV, écran de saisie des paramètres, exemple de résultats

Figure 17 : Principaux calendriers culturels

Figure 18 : Déroulement d'une campagne rizicole dans un périmètre irrigué

Figure 19 : Etats des parcelles et stade du riz au sein d'une maille hydraulique du grand périmètre de Nianga à trois dates au cours de la campagne d'hivernage 1994.

Figure 20 : Calendriers culturels réalisés et optimal à l'échelle du périmètre pour l'hivernage 1998.

Figure 21 : Distribution des rendements selon le nombre d'irrigation et distribution du nombre d'irrigations selon la variété observées en hivernage 1994 dans le périmètre irrigué de Nakhlet

Figure 24 : Exemple de calendrier cultural prévisionnel proposé par le logiciel.

Figure 25 : Calendriers culturaux prévisionnel et réalisé à l'échelle du périmètre en 1999 et 2000.

Figure 26 : Cartes des rendements obtenus dans les parcelles du PIV de Nakhlet en 1998, 1999 et 2000.

Liste des illustrations de la 2^{ème} partie :

Tableau 1 : Assolement, consommations (eau et travail manuel), productions, et marge dégagée à l'échelle de l'ensemble de la zone étudiée calculés à l'aide du modèle.

Tableau 2 : Répartition des exploitations de la plaine de Kairouan selon leur type dans les sept secteurs.

Tableau 3 : Consommations et production d'un atelier de pastèque sous tunnel.

Figure 1 : La région vue comme a) un ensemble de parcelles ou comme b) un ensemble d'exploitations cultivant un ensemble de parcelles.

Figure 2 : Impact d'une hausse du prix de l'eau sur les ateliers de production des cultures irriguées dans la plaine de Kairouan.

Figure 3 : Impact d'une hausse du prix de l'eau sur les exploitations irriguées dans la plaine de Kairouan.

Figure 4 : Entité activité associée à un espace géographique

Figure 5 : Représentation de l'activité agricole d'une région

Figure 6 : Place du maraîchage d'été et de l'arboriculture dans l'assolement de chacun des secteurs en 2005 (les proportions sont exprimées en pourcentages de la surface irriguée) et répartition des puits, des forages et des périmètres publics irrigués.

Préambule

Ce mémoire s'articule autour de trois parties, la première concerne mes travaux passés, la suivante, mon projet de recherche, et la troisième enfin regroupe mon curriculum vitae et la liste de mes publications. Mais avant tout, je présenterai mon parcours de recherche afin que le lecteur prenne connaissance des deux types de compétences que j'ai acquises par ma formation et ma carrière : celle d'un agronome généraliste s'intéressant aux pratiques des agriculteurs et leurs déterminants, et celle d'un concepteur d'outils d'aide à la gestion dans le domaine agricole. J'ai tenté de présenter pour chacune de ces compétences les différents concepts mobilisés.

Après ce préliminaire, je présenterai les travaux que j'ai réalisés sur les performances de la riziculture irriguée qui s'est développée après l'aménagement de la vallée du fleuve Sénégal. Ces travaux démontrent en effet l'intérêt du « couplage » entre mes deux compétences. Ils démontrent également l'intérêt d'aborder la ou les questions à plusieurs échelles, depuis la parcelle jusqu'au périmètre irrigué, pour établir un diagnostic, puis concevoir des outils de gestion et proposer des voies d'amélioration pour une meilleure maîtrise du milieu et de ses contraintes. Ce changement d'échelle et ces propositions supposent également d'élargir la vision disciplinaire aux sciences humaines et sociales.

Ensuite j'exposerai mon projet de recherche qui s'articule autour de la proposition d'un cadre de représentation spatialisée d'activités d'exploitation du milieu. Ce cadre permet par exemple de modéliser la demande agricole en eau pour l'irrigation. Ce modèle offre aux acteurs la possibilité de réfléchir aux usages qu'ils ont du milieu et à son évolution en cas de changement technologique, économique ou institutionnel.

Enfin, le lecteur trouvera à la fin de ce document mon curriculum vitae détaillé ainsi que la liste complète de mes publications. Certaines d'entre-elles, qui soutiennent mon mémoire de travaux, sont annexées à ce document.

Pour faciliter la lecture, j'ai choisi de distinguer dans le texte les références à mes propres travaux, des autres. Ainsi, la référence à l'une de mes publications est notée entre crochet, avec une lettre, qui indique son type¹, suivie de deux chiffres (exemple : [O-03]). Cette notation est identique à celle utilisée dans la liste complète de mes publications. Les autres références sont notées de façon classique (auteur et année), et la bibliographie complète est présentée à la fin de ce document.

¹ R pour un article en revue scientifique, V pour un article de vulgarisation, C pour une communication, O pour un ouvrage ou un chapitre d'ouvrage, S pour une autre publication scientifique, D pour un document vidéo, L pour un logiciel, G pour un rapport multigraphié.

Mon parcours de recherche

Depuis mon entrée à l'ORSTOM en 1981, mon parcours de recherche est marqué par une double activité d'agronome généraliste et de concepteur d'instruments de gestion en agriculture. Ces deux activités mettent en œuvre des concepts et méthodes qui relèvent des disciplines agronomiques et des sciences de gestion, mais elles font appel également à des compétences en informatique et en analyse des données. C'est dans le cadre de mes affectations en Afrique (en Côte d'Ivoire de 1982 à 1985, au Sénégal de 1992 à 1999, et enfin en Tunisie de 2004 à 2006), ainsi que de deux longs séjours en France, notamment à l'INRA au laboratoire d'Economie et Sociologie Rurales de Grignon de 1985 à 1992, que j'ai réalisé mes recherches.

Mon parcours présente un effort permanent pour concilier deux types d'activités : d'une part une activité d'agronome généraliste focalisée sur l'analyse des processus de production agricole (processus biophysiques et économiques, qui incluent les pratiques des agriculteurs), et d'autre part, une activité de modélisation et d'instrumentation pour proposer des outils de gestion dans le domaine agricole. L'objet de ce mémoire est de montrer que ces deux axes de travail sont complémentaires : la compréhension des processus, notamment des pratiques agricoles et de leurs déterminants, est nécessaire à la conception d'instruments de gestion, et à l'inverse, les modèles à la base des instruments de gestion constituent des cadres pour l'analyse des processus de production. Pourtant, diagnostic et décision ont des positions opposées par rapport à l'action. Le diagnostic est en effet une activité d'évaluation *ex post*, qui se fonde sur l'accumulation d'un ensemble de faits et d'interactions à l'origine des résultats obtenus. Il s'agit non seulement d'identifier les conséquences des pratiques (actions) sur les processus biophysiques et la production, mais aussi les déterminants de ces pratiques et leur logique. A l'inverse, une décision se prend *ex ante*, en l'absence d'une connaissance complète - c'est le cas en général, ou bien la décision en question ne pose alors aucun problème - non seulement de la situation actuelle, mais surtout des conséquences des choix effectués. Compléter cette connaissance constitue alors une aide à la décision, et l'expérience du diagnostic peut largement y contribuer.

J'ai découvert ces deux aspects lors de mon mémoire de fin d'étude à l'INA-PG, encadré par Michel Sébillotte, l'un des fondateurs de l'école française d'agronomie, et par Jean-Marie Attonaty, pionnier dans le domaine des logiciels de gestion de l'exploitation agricole. Ce mémoire consistait, à travers la réalisation d'un programme informatique, à simuler l'installation, la conduite et la succession pluriannuelle de cultures dans une exploitation agricole « pilote » du marais poitevin. L'assolement et la conduite des cultures de cette exploitation avaient été imaginés par une équipe de l'INRA. Mais la simulation échouait car d'importantes surfaces restaient chaque année incultes, ce

qui n'aurait jamais eu lieu dans une exploitation réelle. Je suis donc allé interroger les agriculteurs, et l'expérience des praticiens a permis d'enrichir le modèle imaginé par les techniciens. Inversement, après avoir mis en évidence les contraintes qui freinent le processus de production, les agronomes recherchent généralement des moyens pour lever ou contourner ces contraintes. Si certains proposent de nouvelles techniques ou de nouvelles variétés, d'autres, comme moi, utilisent leurs connaissances du processus pour produire des outils d'aide à sa gestion.

Rôle et outils de l'agronome

Le rôle de l'agronome est à la fois d'apporter des connaissances sur les processus de production agricole, et d'élaborer des méthodes de diagnostic et de conseil pour l'action (Sébillotte, 1974). L'évaluation des performances et la proposition d'amélioration de ces processus de production agricole sont au cœur de ses activités. Son échelle de travail est intermédiaire entre celle de la physiologie végétale, qui étudie le système sol-plante-climat, et celle de l'économie rurale, qui étudie l'exploitation agricole et la filière de production. L'activité d'un agronome se situe ainsi à l'interface entre les sciences biophysiques et les sciences humaines ; certains agronomes se rapprochent alors des physiologistes, d'autres des économistes.

Je me rapproche des économistes, même si mon travail reste ancré sur le fonctionnement de la parcelle cultivée. Car quelle que soit l'échelle de travail, si l'agronome veut être pertinent et apporter une aide spécifique en se démarquant des autres disciplines, la « parcelle cultivée » doit rester à l'origine de son analyse. C'est en effet à cette échelle qu'interviennent tous les composants concrets, observables et mesurables, du processus de production végétale agricole : le sol et le peuplement végétal qui évoluent sous l'action conjuguée des techniques culturales et du climat². Mais il existe deux sortes de « parcelle cultivée ».

Milieu réel et milieu contrôlé

La première sorte de parcelle est celle dénommée bien souvent « situation réelle » (Brossier et Hubert, 2001) : c'est la parcelle cultivée par un agriculteur. C'est bien là que « tout se joue », mais c'est un lieu très difficile d'accès aux méthodes scientifiques puisque rien n'y est homogène (Milleville et Serpantié, 1992), à part le climat. Si tout - sol (profondeur, caractéristiques physico-chimiques...), peuplement végétal (densité, présence de flore adventice...), technique (dose appliquée...) - varie en même temps, comment mesurer proprement chacun des effets ? Et comment

² L'unité de production n'est donc pas la plante mais l'espace cultivé ; le fonctionnement du peuplement végétal inclut les phénomènes de compétition intra-spécifique.

faire pour comparer des parcelles appartenant à plusieurs agriculteurs ? C'est sans doute à cause de toutes ces questions que les agronomes ont autant besoin d'outils statistiques.

Et c'est sans doute aussi pourquoi les agronomes ont besoin de la « parcelle expérimentale » pour comprendre les processus biophysiques (ARC *et al.*, 1981) [R-09]. C'est un « milieu contrôlé » qui permet d'approfondir les connaissances agronomiques sur certaines phases du processus de production, et d'évaluer ainsi l'effet des techniques ou de certains facteurs ou conditions de milieu. En effet, s'ils respectent quelques règles sur leur dispositif expérimental pour éviter les biais dus aux hétérogénéités de sol et de peuplement végétal, ils peuvent y mesurer proprement les effets de chacun des facteurs³ ou de facteurs croisés. Ces facteurs sont engendrés par les techniques culturales en interaction avec le système sol-plante-climat. Les expérimentations, ou « essais en stations », permettent alors de mesurer l'intérêt d'une technique par rapport à une autre, voire de comparer des « paquets techniques » complets.

La parcelle expérimentale est donc également le lieu de mise au point de nouvelles techniques. Mais le transfert, ou l'adoption, dans les parcelles « réelles », de ces nouvelles techniques élaborées en parcelles « contrôlées » n'est pas simple (Milleville, 1987 ; Milleville, 1991). Bon nombre de travaux d'agronomes, dont les miens [G-01, G-12, G-15, O-06, O-08, C-01, C-17, R-02, R-05, R-10], concernent justement le décalage entre les résultats des « paquets techniques » mis au point en stations, fermes ou parcelles expérimentales, et ceux obtenus par les agriculteurs qui appliquent ces techniques dans leurs parcelles.

Pour être en mesure d'évaluer correctement le processus de production et concevoir des propositions pertinentes (parce que cohérentes avec les logiques qui sous-tendent le processus), il s'agit avant tout de décrire ce que les agriculteurs font, d'évaluer les conséquences de ce qu'ils font sur l'efficacité du processus de production, et de tenter de dégager les raisons de ce qu'ils font. Ces objectifs me conduisent tout naturellement à travailler essentiellement dans la première sorte de parcelles, en « situation réelle ».

Outils du diagnostic agronomique

Le diagnostic agronomique s'appuie généralement sur un « schéma d'élaboration du rendement de la culture » qui rend compte du développement de la culture (mise en place des différents organes) et des facteurs et conditions du milieu qui influent sur sa croissance. Les techniques culturales (le travail du sol, le désherbage, la fertilisation...) jouent sur l'état de ces facteurs et conditions (la

³ Le terme est pris au sens large de « facteur ou condition » intervenant dans le processus biophysique de production, tel que Sébillotte (1978) l'utilise dans sa définition de l'élaboration du rendement des cultures.

pénétration racinaire, la compétition pour l'eau, les éléments minéraux et la lumière, la disponibilité de nutriments...). A l'aide de ce schéma, il est possible de retrouver la ou les causes, les techniques et/ou les états du milieu, à l'origine de la croissance observée de la culture. Il s'agit donc de connaître le mode de conduite de la culture.

L'analyse du ou des modes de conduite d'une culture, c'est-à-dire des techniques culturales mises en œuvre, leurs modalités d'application (doses et dates d'application par exemple), et des logiques qui les déterminent, s'appuie sur deux concepts agronomiques. Le premier est celui d'itinéraire technique, qui est « la suite logique et ordonnée de techniques culturales appliquées à une espèce cultivée » (Sébillotte, 1978). Ce concept s'applique à une parcelle cultivée. Il est souvent confondu avec les notions de « fiche technique » ou de « paquet technique », qui correspondent à des recettes normatives pour la conduite d'une culture. En l'absence d'explicitation de la « logique » des actions (objectif global de la « recette », logique des diverses techniques à mettre en œuvre, conséquences encourues en cas de non respect des normes...), ces fiches ont peu d'attrait auprès des agriculteurs qui n'ont souvent pas les moyens de mettre en œuvre la recette « à la lettre ». Le second concept agronomique est celui de système de culture qui est « l'ensemble des modalités techniques mises en œuvre sur des parcelles traitées de manière identique » (Sébillotte, 1990a) et qui s'applique à une succession de cultures. Il englobe donc l'itinéraire technique et l'élargit à un ensemble de parcelles cultivées de manière homogène. Les critères et les seuils d'homogénéité étant choisis selon les objectifs poursuivis et le niveau de détail recherché, on peut ainsi décider de larges regroupements autour d'un caractère commun : par exemple, le système de culture pluvial par opposition au système de culture irrigué.

Modèle d'action

Lors du diagnostic, on explicite *a posteriori* la logique des actions réalisées. Mais si la mesure des composants du processus de production s'effectue essentiellement à l'échelle de la parcelle, les déterminants des pratiques ne se situent pas seulement à cette échelle. La conduite d'une culture sur une parcelle répond à des objectifs et rencontre des contraintes qui sont définis à un niveau supérieur, notamment celui de l'exploitation agricole. L'application « optimale » (pour la culture) des techniques, leur calage vis-à-vis du développement de la culture, répond à une « logique de parcelle ». Selon cette logique, il s'agit de mettre en œuvre les techniques culturales qui répondent au mieux à la culture, selon son stade de développement et son niveau de croissance. Mais la disponibilité en travail (manuel ou autre) par exemple perturbe cette « logique parcelle » et peut être à l'origine des retards que l'on observe si fréquemment. La thèse de Christine Aubry (1995) sur la

gestion de la sole de blé dans les exploitations du bassin parisien met bien en évidence ces logiques différentes et parfois contradictoires.

La logique du processus de production répond à des objectifs et des contraintes de différents ordres. Tout d'abord, l'agriculteur a bien souvent (mais pas systématiquement) un objectif de revenu *a priori*. Cet objectif, qui correspond à un niveau de rendement espéré et un niveau de charges liées aux modalités d'usage des techniques culturales, permet de construire un « plan ». Cet objectif pouvant être révisé, à la hausse ou à la baisse, selon l'état de la culture observé au cours de l'année, le plan envisagé peut évoluer en cours d'année. Enfin, des événements conjoncturels, relatifs notamment à la disponibilité des matériels ou de la main d'œuvre par exemple, viennent encore perturber ce plan. Expliciter cette logique depuis les actions réalisées et les états de la culture observés dans la parcelle jusqu'au plan envisagé initialement peut s'avérer difficile... En revanche, la démarche inverse - expliciter le plan initial puis les divers événements à l'origine de la perturbation du plan, aboutissant à l'itinéraire technique observé – apparaît une démarche plus réaliste. Encore faut-il qu'il existe un « plan initial » suffisamment construit et structuré.

Les agronomes (Duru *et al.*, 1988 ; Sébillotte et Soler, 1988) ont d'abord proposé le concept de « modèle général » pour rendre compte de ce plan initial qui sert de cadre pour des décisions que prend l'agriculteur chaque année de façon récurrente. Ce concept a été rebaptisé « modèle d'action », terme reflétant mieux le rapprochement de l'agronomie avec les sciences de gestion (Sébillotte et Soler, 1990 ; Sébillotte, 1990b).

Les travaux que réalisent les agronomes du département Systèmes Agraires et Développement (SAD) de l'INRA dans les années 1980, notamment ceux concernant la conduite de cultures ou l'organisation du travail (Papy *et al.*, 1988) ont permis de faire émerger ce concept. Ces travaux se situaient encore dans une logique de compréhension des processus de production, depuis l'échelle de la parcelle, puis celle de la sole, et enfin celle de l'exploitation où l'agriculteur doit définir des priorités pour affecter ses moyens à ses diverses activités de production. Ils s'intéressaient à la logique des actions des agriculteurs, à l'adaptation de ces actions à la situation en cours, notamment les conditions climatiques, et aux indicateurs utilisés pour choisir et décider (Cerf *et al.*, 1998). La compréhension du processus de production a ainsi abouti à l'identification du processus de décision et à son analyse.

Modèles pour l'aide à la décision en agriculture

Ma seconde activité de conception d'instruments pour l'aide à la gestion en agriculture a été initiée durant mon mémoire de fin d'étude [S-01] et ma première année d'élève ORSTOM. Elle s'est développée ensuite à l'occasion de mon accueil, durant près de 7 ans, dans l'équipe dirigée par J.M. Attonaty au laboratoire INRA d'Economie et Sociologie Rurales (ESR) de Grignon. Cette équipe est à l'origine en France des premiers outils informatiques d'aide à la gestion des exploitations agricoles (Hemidy, 1992). Une brève analyse des travaux menés par cette équipe montre une évolution des instruments de gestion liée à celle des techniques⁴ d'une part, et d'autre part à l'évolution de la manière de concevoir le décideur et l'aide à la décision.

Outils classiques de gestion et d'aide à la décision

Les premiers instruments informatiques de gestion conçus par l'équipe de Grignon ont été des outils de suivis : ils concernaient la trésorerie, les parcelles, le troupeau... L'ensemble des informations constituait une base de données sur l'exploitation.

Les techniques de recherche opérationnelle, notamment la programmation linéaire, ont été mises en œuvre pour rechercher des solutions optimales : pour la réalisation d'aliments du bétail (Attonaty et Delpech, 1987), la gestion de la trésorerie (Hémidy, 1985), l'alimentation hivernale du troupeau (Leroy, 1986), l'assolement (Leroy, 1989) et même la stratégie d'irrigation sur l'exploitation (Leroy *et al.*, 1993).

Parallèlement à ces outils d'optimisation, des modèles de simulation ont été réalisés. Ces modèles ont concerné le fonctionnement d'une salle de traite (Hémidy, 1986), l'installation d'un assolement dans le marais poitevin [S-01], ou l'organisation du travail dans une exploitation picarde (Papy *et al.*, *op. cit.*).

Ces deux types d'activités, recherche de solutions optimales et modélisation des processus, correspondent à deux postures vis-à-vis de l'aide à la décision (Bourgine et Lemoigne, 1990). La première posture est celle de la recherche opérationnelle. Dans la seconde, le raisonnement des choix et la compréhension des processus sur lequel ils portent sont au cœur de la démarche. Les systèmes experts permettent de représenter ces raisonnements, et, à la fin des années 1980, l'équipe produit un moteur d'inférence utilisable sur micro-ordinateur (Attonaty *et al.*, 1987). Cet investissement dans les systèmes experts a permis d'envisager un nouveau type de système

⁴ L'évolution des techniques concerne non seulement l'accroissement des capacités de calcul des ordinateurs, mais aussi les langages de programmation et l'émergence notamment de l'intelligence artificielle.

interactif d'aide à la décision (Levine et Pomerol, 1990) permettant d' « amplifier le raisonnement du décideur sur la base de ses propres représentations » (Courbon, 1993).

Outils fondés sur des modèles décisionnels

Les modèles pour l'aide à la décision reposent sur des hypothèses qui concernent la rationalité des décideurs et les solutions possibles [C-06]. On peut distinguer (i) les modèles supposant la rationalité complète des décideurs et fondés sur la recherche de solutions optimales - l'archétype est l'utilisation de la programmation linéaire pour définir un assolement par exemple - et (ii) des modèles ne faisant aucune hypothèse sur cette rationalité et proposant des solutions « adaptées » (Simon, 1960 ; Simon, 1983). Les « systèmes interactifs d'aide à la décision » (SIAD) mettent l'accent sur le processus de raisonnement des choix et l'évaluation de leurs conséquences, sans rechercher de solution optimale (Courbon, *op. cit.*).

Représenter la gestion d'un système par son gestionnaire n'est pas nouveau. La simulation du fonctionnement d'une exploitation modèle dans le marais poitevin est un bon exemple. Pascal Leroy et moi avions cet objectif à remplir pour notre mémoire de fin d'étude en 1980 et 1981. Mais à l'époque, le processus de décision, bien qu'extrêmement important pour une exploitation puisqu'il s'agissait d'installer un assolement, était modélisé de façon très simple d'une part, et d'autre part, était inscrit dans le programme informatique : des instructions, codées en langage BASIC, représentaient les décisions de préparation du sol et de semis des différentes cultures.

Dans les années 1980, le même principe fut utilisé pour représenter l'organisation des chantiers d'automne dans une exploitation picarde : récolte des pommes de terre et des betteraves et implantation du blé d'hiver. Ce travail était une collaboration entre les départements SAD et ESR de l'INRA. Il s'agissait d'analyser l'adéquation entre charges de structure (équipements et main d'œuvre salariée) et assolement de l'exploitation. La période d'automne avait été choisie car elle correspondait à une période de pointe de travaux (récoltes et semis) et orientait les choix d'équipements lourds des producteurs. Attonaty avait alors représenté par un programme informatique l'organisation des travaux d'automne dans un type d'exploitation (Papy *et al.*, *op. cit.*).

Les agronomes du SAD avaient besoin de multiplier l'expérience afin de rendre compte du fonctionnement et des possibilités d'évolution des autres types d'exploitation. De là est née l'idée de proposer un environnement informatique permettant à un non informaticien (i) de construire un modèle de l'organisation du travail dans une exploitation agricole, (ii) de tester la pertinence de cette organisation pour faire face aux conditions climatiques ou permettre une extension des

surfaces. Nous avons alors réutilisé l'expérience des systèmes experts et la programmation orientée objet pour concevoir OTELO [L-01 ; C-05 ; C-06 ; C-07].

Le principe de ce logiciel est de fournir un cadre – une structure et un langage dédié – pour représenter les règles d'organisation du travail dans l'exploitation agricole. Le modèle construit peut alors être testé par simulation pour vérifier la qualité de la représentation ou sa robustesse face aux aléas climatiques ou face à des changements structurels (modification d'assolement ou d'équipement). Il a été utilisé en région picarde avec des agriculteurs et il a profondément modifié la relation entre agriculteur et conseiller (Attonaty *et al.*, 1993 ; Chatelin et Mousset, 1997). Il a également été utilisé dans d'autres situations, au Cameroun et au Sénégal par exemple (Dounias, 1998 ; Le Gal et Papy, 1998). OTELO est aussi l'archétype d'un nouveau type d'instrument d'aide à la décision fondé sur la représentation du processus de décision du gestionnaire et sa simulation face aux aléas (Attonaty *et al.*, *op. cit.* ; Aubry *et al.*, 1997).

Couplage de modèles décisionnel et biophysique

OTELO permet de réfléchir au mode d'organisation du travail. Les règles de décision utilisent des indicateurs sur l'état d'avancement des travaux et sur les conditions climatiques, mais pas sur l'état du sol – la portance par exemple - ou des cultures – leur stade de développement par exemple. Pour réfléchir à la conduite d'une culture – le blé par exemple – on peut concevoir un instrument comprenant une représentation des règles de décision couplée à un modèle de développement et de croissance de la culture. C'est ce que j'ai fait lors de mon DEA pour la conduite du blé d'hiver [S-04].

Les travaux des agronomes et les expérimentations des instituts techniques avaient permis la construction de modèles de l'élaboration du rendement du blé et des effets des techniques culturales (Meynard, 1985 ; Attonaty, 1990). Sur ces bases, il s'agissait pour certains de construire un outil issu capable de fournir les itinéraires techniques adaptés aux conditions climatiques, voire optimaux – cet outil se situe en effet dans la lignée de la recherche opérationnelle - et permettant d'atteindre un rendement (Loyce *et al.*, 2002). J'ai choisi de concevoir un autre type d'instrument permettant au décideur de représenter et tester son mode de conduite du blé. Comme pour OTELO, il faut concevoir un cadre pour formaliser les règles de conduite. Dans le cas de Décibl  , un cadre est proposé pour chaque intervention : l'implantation du bl  , comprenant la pr  paration du sol et le semis, le premier apport d'engrais azot      la sortie de l'hiver, et le second au d  but de la montaison. Ces d  cisions mobilisent des indicateurs sur l'  tat du sol ou de la culture, et influent sur leur

évolution. Ce « couplage » est donc très exigeant vis-à-vis des modèles biophysiques (Meynard, 1997) [R-08].

Le principe de cet instrument, fondé sur la formalisation du « modèle d'action » de l'agriculteur et sa simulation face à l'aléa climatique, constitue une nouvelle voie pour les outils d'aide à la décision (Hatchuel et Mollet, 1986) [C-06]. Ces « nouveaux outils » se fondent sur l'apprentissage du décideur à travers la structuration et l'explicitation de son modèle d'action d'une part, et d'autre part, la confrontation du mode de gestion modélisé aux aléas pour vérifier sa pertinence (Attonaty *et al.*, 1999). Ce principe a été utilisé pour la conduite du maïs irrigué (Bergez *et al.*, 2001) et pour la gestion de la sole irriguée (Leroy *et al.*, 1997), et encore quelques années plus tard, pour la gestion de l'irrigation du foin de Crau par exemple (Mérot, 2007). En Australie, Keating et McCown (2001) ont proposé de la même manière de décomposer un "farming system" en un "système de production biophysique" d'une part, piloté par un "système de gestion" d'autre part. Le système APSIM (Keating *et al.*, 2003), qui permet de simuler le fonctionnement d'une exploitation, a été conçu sur ce principe.

Il n'en reste pas moins que la « validation » d'un instrument d'aide à la décision se fait d'abord par l'usage (Hémidy, 1992). Ces modèles, fondés sur la formalisation des règles de gestion du décideur et leur simulation face à l'aléa, sont principalement utilisés par des chercheurs ou pour l'enseignement. Car si ces outils sont novateurs, ils sont aussi plus « compliqués » que les outils classiques et nécessitent une réorganisation du conseil auprès des agriculteurs (Chatelin et Mousset, 1997).

1^{ère} Partie

MEMOIRE DES TRAVAUX

Riziculture irriguée dans la vallée du Sénégal

Du diagnostic à l'action

Ma seconde affectation à l'étranger m'a conduit au Sénégal au sein d'un programme pluridisciplinaire mené conjointement par l'IRD (ORSTOM à l'époque) et l'Institut Sénégalais de Recherches Agricoles (ISRA). Ce programme de recherche, associant démographes, géographes, agronomes et pédologues, était consacré à l'évaluation du développement de l'irrigation dans le département de Podor en moyenne vallée du Sénégal. Une présentation du large panel des disciplines intervenantes se trouve dans les Actes du séminaire qui s'est tenu à St-Louis en 1993 [O-03]. Les principales publications qui soutiennent ce mémoire de travaux sont disponibles en annexe [G-15 ; O-04 ; O-05 ; R-07 ; O-07 ; R-11 ; R-05]. Leur ordre de présentation correspond non pas à la chronologie de leur écriture, mais à celui utilisé pour ce mémoire.

L'irrigation dans la vallée du Sénégal est une idée coloniale. Les expériences menées au XIX^{ème} siècle et au XX^{ème} siècle par la puissance coloniale n'ont pas connu de succès auprès des populations. L'idée est néanmoins reprise après l'indépendance. Face aux sécheresses des années 1970-1980 qui ont déstabilisé les systèmes de productions traditionnels de la vallée, l'irrigation apparaît comme un moyen de remédier la famine et de fixer les populations locales. L'agriculture irriguée s'est finalement développée (Nuttall, 1991). La culture principale est la riziculture, dont la production de brisure est destinée en priorité à l'autoconsommation. Mais ses résultats apparaissent très en deçà des espérances. Ainsi, dans les années 1990, si la production rizicole locale couvrait les besoins des populations de la vallée, elle était loin de suffire aux besoins nationaux. Le riz produit localement, sur lequel était fondée la rentabilité des aménagements, n'apparaissait pas compétitif par rapport aux brisures importées, au grand dam des bailleurs de fonds à l'origine de ces aménagements (Crousse *et al.*, 1991). Et de surcroît, on s'interrogeait sur l'impact de l'irrigation sur la dégradation des sols par salinisation et l'abandon de terres aménagées (Boivin, 1997).

Ce constat d'échec de la riziculture irriguée dans la vallée du Sénégal n'est pas nouveau. Les études agronomiques effectuées par le passé (Bonnefond *et al.*, 1981 ; Jamin et Caneill, 1983) ont identifié les principales contraintes, toutes liées au manque de maîtrise technique : irrigation, enherbement, fertilisation... A l'époque, la Société d'Aménagement et d'Exploitation des terres du Delta et de la vallée du Sénégal (SAED), société d'Etat chargée du développement et de l'encadrement de la riziculture sur le fleuve, gérant les aménagements au plan technique, ainsi que l'ensemble de la filière rizicole (Le Gal et Dia, 1991). La SAED était chargée de l'irrigation, fournissait les intrants et les prestations mécanisées, dictait les interventions à réaliser et leur calendrier, achetait le paddy récolté à un prix fixé par l'Etat et le transformait. A partir de 1980, l'Etat sénégalais a mis en œuvre la politique d'ajustement structurelle demandée par la Banque Mondiale. La SAED s'est alors progressivement "désengagée", et la gestion des aménagements a été confiée à des organisations

paysannes (OP) ayant le statut de Groupement d'Intérêt Economique (GIE). Ces organisations se sont vu alors confier non seulement la gestion hydraulique de l'aménagement, mais aussi l'achat et la distribution des engrais et des produits phytosanitaires, la réalisation des travaux mécanisés, la commercialisation des productions et, avant tout, le financement de la campagne agricole. Le GIE achète les intrants grâce à un emprunt bancaire et les distribue aux paysans qui remboursent en nature après la récolte. Le GIE vend alors ce paddy, au prix du marché, aux usines de décortilage, qui sont également privatisées et qui font également appel au crédit bancaire pour financer l'achat du paddy. Le prix du paddy local est fonction des prix mondiaux et du prix des brisures qui sont dorénavant importées par des opérateurs privés. La SAED conserve sa fonction d'aménageur, participe à la gestion hydraulique des grands aménagements et fournit un appui technique aux producteurs. Ainsi, à partir de 1994, l'ensemble de la filière rizicole est privatisée et le franc CFA est dévalué de 50%.

Figure 1 : Carte du bassin du fleuve Sénégal

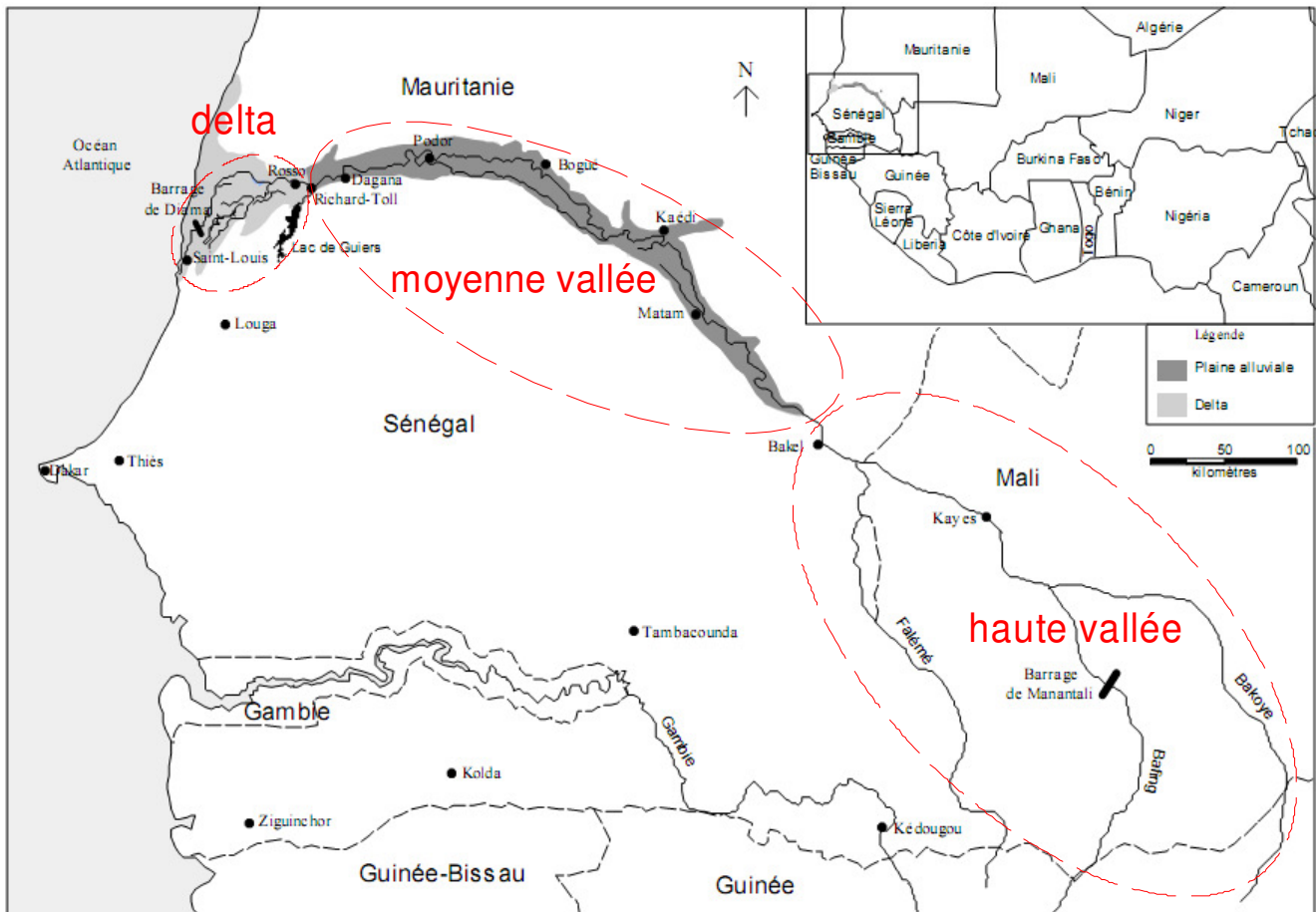
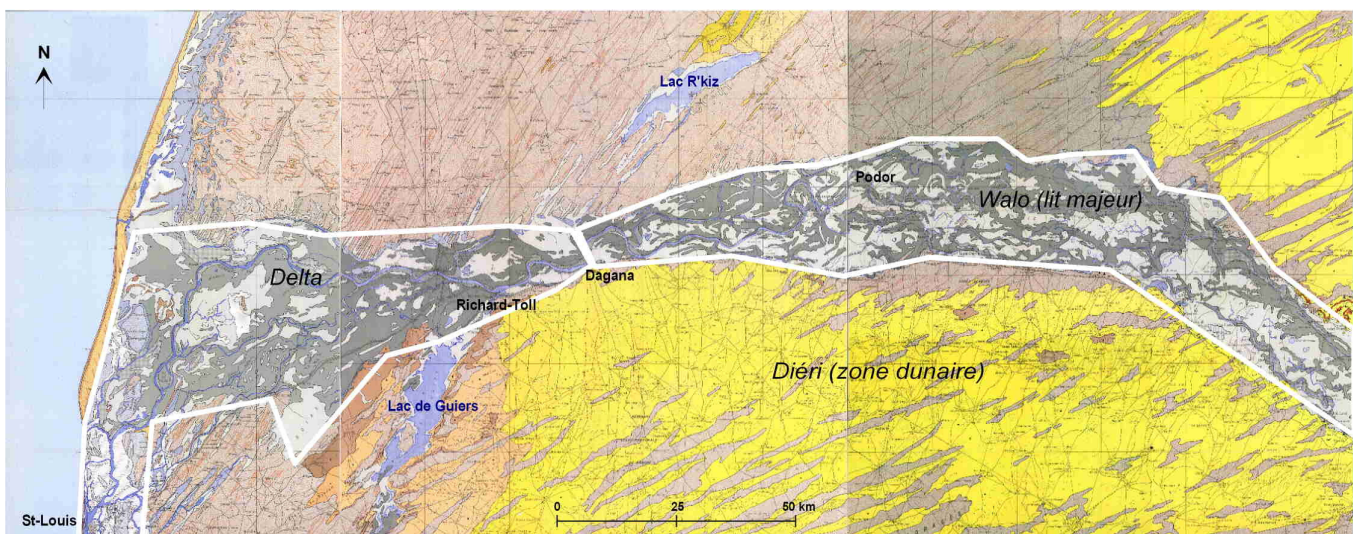


Figure 2 : Carte de la vallée et du delta du Sénégal (sur la base de la carte géomorphologique)



I-1 Le milieu naturel et son exploitation

Le fleuve Sénégal naît au Mali de la réunion de deux rivières (Figure 1) : le Bakoy, qui prend sa source au Mali, et le Bafing, qui prend sa source en Guinée et sur lequel a été installé le barrage réservoir de Manantali à la fin des années 1980. La Falémé, qui prend également sa source en Guinée, rejoint le Sénégal en amont de Bakel. De là, le fleuve Sénégal traverse deux zones semi désertiques : il laisse en rive droite les dunes de Mauritanie et en rive gauche le Ferlo, zone latéritique située au nord-est du Sénégal. On distingue alors deux grands ensembles (Figure 2) : la « vallée » proprement dite, depuis Bakel jusqu'à Dagana et Richard-Toll¹, puis le « delta » qui correspond à l'estuaire du fleuve. La pente du Sénégal à l'aval de Bakel est très faible, ce qui engendre de nombreux méandres, et la vallée s'organise autour du fleuve, de ses bras, défluent et cuvettes d'inondation. Le lit majeur du Sénégal – dénommé le *walo* – est ainsi large de 10 à 25 km jusque Dagana et limité sur les deux rives par une zone dunaire dénommée le *diéri*. Les pluies, qui arrosent le massif du Fouta-Djalon, engendrent les crues du fleuve qui emplissent les défluent et inondent les cuvettes. La vallée du Sénégal constitue ainsi un ruban fertile entre deux déserts.

En aval, le delta est constitué de multiples défluent et marigots qui alimentent des cuvettes plus ou moins larges lors des crues du fleuve. Les lacs de Rkiz en Mauritanie et de Guiers au Sénégal sont de vastes dépressions reliées directement au lit mineur et donc alimentées de façon permanente par le fleuve. La zone du delta est quasiment plate² (Rosso est situé au niveau de la mer) et subit l'influence de la marée. Avant la mise en place du barrage de Diama, les eaux marines remontaient dans le delta et la vallée en saison sèche. Cette remontée d'eau marine, dénommée « langue salée », pouvait être ressentie jusque 200 km à l'amont.

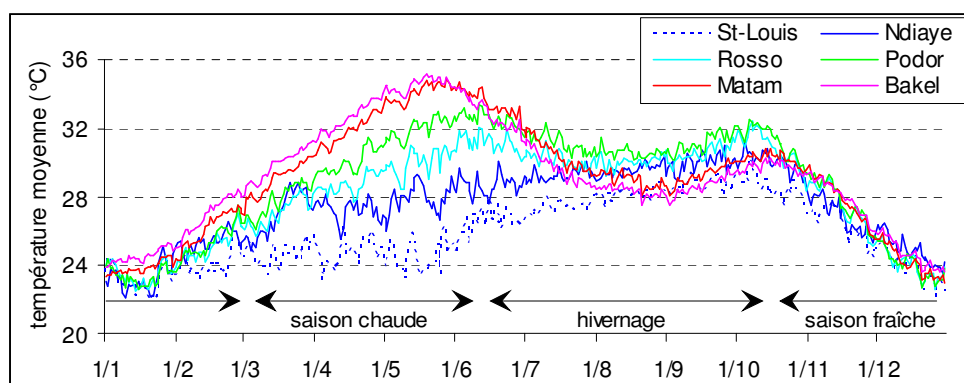
Malgré ses nombreux bras et méandres, le delta du Sénégal ne présente qu'une seule embouchure, située au sud de Saint-Louis. Lorsqu'il atteint enfin la côte, le lit du fleuve oblique vers le Sud et reste séparé de l'Océan Atlantique sur plusieurs dizaines de kilomètres par un fin cordon dunaire dénommé la « Langue de Barbarie »³.

¹ Littéralement « le jardin de Richard » du nom d'un botaniste français, Jean-Michel Claude Richard qui créa, au début du XIX^{ème} siècle, le premier jardin d'essai en Afrique en tentant d'acclimater certaines espèces végétales européennes. Ces tentatives sont à l'origine des expériences de cultures irriguées.

² Cette absence de pente a fait dire à Emile Bélimé, un ingénieur au début du siècle dernier qui dirigea l'Office du Niger au Mali, que l'irrigation dans la vallée coûterait trop cher puisqu'il faudrait pomper l'eau pour irriguer les casiers...

³ Ce fin cordon a été ouvert artificiellement sur quelques mètres au sud de St-Louis en 2003 pour réduire les risques d'inondation de la ville. L'ouverture s'est élargie et atteint maintenant plusieurs centaines de mètres.

Figure 3 : Températures moyennes journalières enregistrées sur 6 sites répartis d'aval en amont du fleuve (St-Louis, Ndiaye, Rosso, Podor, Matam et Bakel).



I-1-1 Caractères hydro-climatiques et pédologiques de la vallée et du delta du Sénégal

Le climat de la vallée du Sénégal est sahélien. L'influence des alizés, qui soufflent depuis l'ouest sur la zone côtière et qui rafraîchissent Saint-Louis, s'arrête à une vingtaine de kilomètres à l'intérieur des terres. On distingue trois saisons : une saison sèche et chaude de février à mai, pendant laquelle souffle l'harmattan, vent chaud et sec venant de l'est, puis une saison humide, l'hivernage, de juin à octobre avec des vents de moussons qui amènent les pluies, et enfin une saison sèche et fraîche de novembre à février.

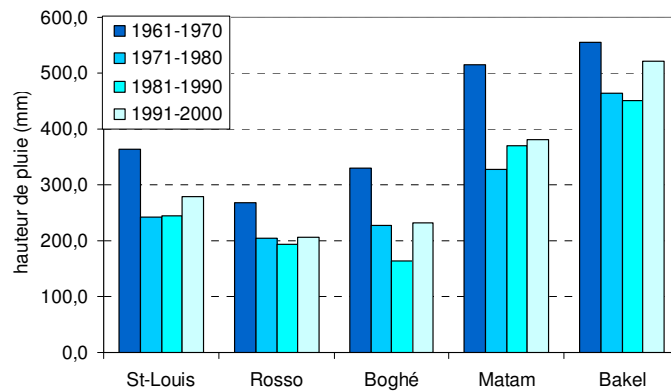
Les températures ont des variations semblables d'une région à l'autre tout au long de l'année. De manière similaire sur l'ensemble de la vallée, elles atteignent environ 30°C en hivernage puis baissent jusqu'à 23°C en saison fraîche (Figure 3). En saison chaude en revanche, les températures augmentent d'environ 10°C au fur et à mesure que l'on s'éloigne de la côte, et atteignent 34°C à Matam et Bakel. Ces températures assez élevées sont associées à une forte évaporation (environ 2500 mm par an) et à une insolation moyenne située entre 3000 heures à St-Louis et Matam et 3200 heures à Podor. Cette forte insolation est très favorable à la photosynthèse et donc à la production végétale si les conditions hydriques et minérales sont assurées par ailleurs.

La quasi totalité des pluies tombe en hivernage, en 20 à 30 jours en moyenne. St-Louis est plus arrosé que l'intérieur des terres du delta ; Rosso, dans le delta, et Boghé, un peu en amont de Podor, reçoivent 200 à 300 mm de pluies ; Matam, plus à l'ouest, et surtout Bakel, plus au sud, sont plus arrosés avec un cumul moyen annuel entre 350 et 550 mm (Figure 4-a). Ces pluies permettent la repousse des pâturages et les semis de mil et niébé dans le *diéri* (Cf. infra). Comme le montre la figure 4-a, les sécheresses des années 1970 sont marquées par une baisse généralisée du cumul des pluies annuelles d'environ 20 à 30%. Cette situation a perduré jusqu'à la fin des années 1980, mais on note une légère reprise depuis le début des années 1990. Typique du climat sahélien, la hauteur de pluie est très variable d'une année à l'autre (Figure 4-b). A Podor, jusqu'aux années 1960, le cumul de pluies atteint ou dépasse fréquemment 300 mm. Mais à partir de la fin des années 1960, les années « humides » (cumul de pluies supérieur à la moyenne de 250 mm) sont beaucoup moins fréquentes.

Le régime d'écoulement du fleuve, qui dépend essentiellement des précipitations dans le Fouta-Djalon, se caractérise par deux saisons : une saison de basses eaux avec une décroissance régulière de novembre à juin, et une saison de hautes eaux de juillet à octobre. A Bakel, considérée comme une station hydrométrique de référence située en amont du dernier affluent important du Sénégal, le débit annuel est en moyenne d'environ 700 m³/s avec de fortes variations inter-annuelles (Figure

Figure 4 : Pluviométrie dans la vallée du Sénégal.

a - Moyennes annuelles à St-Louis, Rosso, Boghé, Matam et Bakel pour les périodes 1961-70, 1971-80, 1981-90 et 1991-2000.



b- Pluviométrie annuelle à Podor de 1918 à 2003

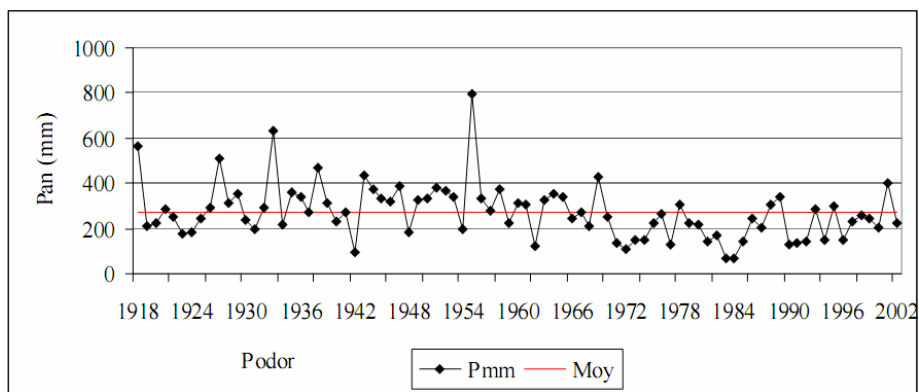
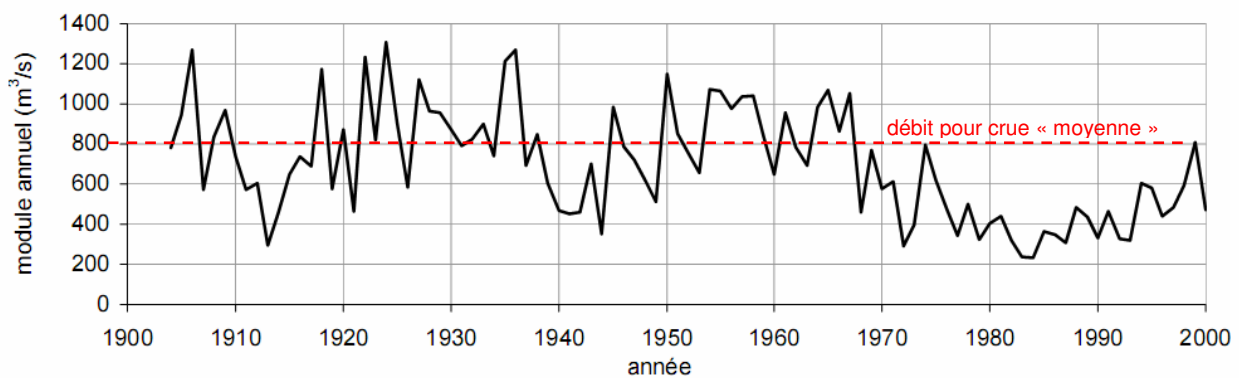


Figure 5 : Evolution du débit (ou module) annuel du fleuve à Bakel entre 1904 et 2000
(Source : Bader *et al.*, 2003)



5). Le point culminant des hautes eaux est atteint à Bakel début septembre. Les eaux sortent alors du lit mineur et envahissent les défluent et les cuvettes. Cette inondation de la vallée ralentit la propagation de la crue, qui n'atteint Dagana qu'environ 6 semaines après Bakel. L'arrêt des pluies marque ensuite le début de la décrue.

La crue du fleuve et l'inondation des cuvettes dans la vallée et le delta sont mises à profit par les populations pour les cultures sur les berges des marigots et dans les cuvettes (Cf. infra). L'ampleur de la crue se répercute donc sur les surfaces cultivables. Par exemple, l'année 1944 a été catastrophique et provoqué la famine dans la population ; à l'inverse, celle de 1950 a engendré une forte inondation ; les crues de 1946 et 1947 ont été moyennement fortes (Boutillier *et al.*, 1962). Ces exemples permettent de mesurer les conséquences des sécheresses successives apparues à la fin des années 1960. D'après la figure 5, on note qu'à compter de 1968, le débit annuel du fleuve à Bakel n'a atteint 800 m³/s que deux fois seulement : en 1974, avant la construction des barrages, et en 1999, douze ans après leur mise en service.

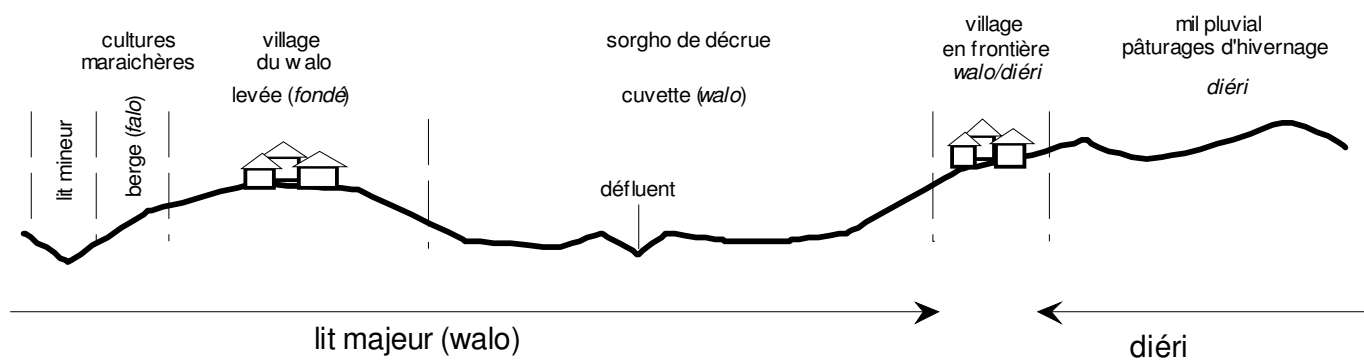
On distingue généralement les sols de la vallée et du delta sur des bases géomorphologiques (Michel, 1973). Dans la vallée et le haut delta (de Dagana à Ross-Béthio), on distingue ainsi des sols de « levées », ou bourrelets de berge, et les sols de cuvette (Loyer, 1989 ; Boivin *et al.*, 1995 ; Boivin *et al.*, 1998). Les sols de levée, dénommés localement *fondé*, ont une texture mélangée (25 à 35 % d'argile, autant de limon et de sable) alors que les sols de cuvette, ou *hollaldé*, sont franchement argileux et contiennent 45 à 90% d'argile. Ces sols, d'épaisseur entre 0,4 et 2 mètres, sont développés sur un horizon de sable éolien remanié par la dernière transgression marine. Dans le bas delta, de Ross-Béthio à St-Louis, les vasières alternent avec des dunes.

La transgression marine, qui a atteint Boghé en amont de Podor, a incorporé des sels dans les sédiments. Les sols de la basse vallée et du haut delta sont donc fréquemment salés (Loyer, 1989). Face à la forte évaporation qui génère une remontée et une concentration des sels en surface, les crues du fleuve permettent de diluer ces sels et de les évacuer vers la mer.

I-1-2 L'exploitation traditionnelle de la vallée

Avant la mise en place des aménagements (barrages et digues) qui ont profondément modifié l'hydrosystème (Duvail *et al.* 2001), la crue du fleuve inondait presque chaque année la zone du delta. Cette zone, très faiblement occupée, était exploitée essentiellement par des pêcheurs lors de la décrue et des éleveurs en saison fraîche, de fin octobre à début mars (Schmitz, 1990).

Figure 6 : Coupe schématique de la vallée montrant l'occupation de l'espace
(d'après Boutillier et al., 1962)



Dans la vallée, les populations peules et toucouleurs avaient mis en place un système de production fondé sur la pluriactivité : ce système exploitait les diverses ressources du terroir s'étendant depuis le fleuve jusque dans les dunes du *diéri* (Figure 6). Ces agro-halio-pasteurs organisaient leurs activités en fonction des saisons, de la pluviosité et de la crue du fleuve⁴. En hivernage, les troupeaux trouvaient de vastes pâturages dans le *diéri*, et les cultivateurs y sèmaient du mil et du niébé. La crue du fleuve inondait le *walo*, ne laissant que les bourrelets de berges exondés. Lors de la décrue, les femmes installaient des jardins sur les berges des marigots et les hommes sèmaient du sorgho dans les cuvettes argileuses après le retrait des eaux. Seule une faible partie des 250 000 ha potentiellement inondables peut être mise en culture, car d'une part un certain temps de submersion est nécessaire pour que le sol soit humidifié en profondeur, et d'autre part le retrait des eaux doit être suffisamment précoce pour permettre les semis avant l'arrivée des températures fraîches. Roche (2003) par exemple estime la surface cultivable en décrue à seulement 60 000 ha. En saison sèche, les troupeaux utilisent les résidus des cultures de décrue. A ces activités s'ajoute la pêche et la cueillette, ainsi que l'exploitation du bois des forêts de gonakiés⁵ du *walo* pour la construction et le charbon de bois. Les populations installaient leur lieu de résidence en fonction de leurs activités : dans le *diéri* en hivernage pour surveiller les troupeaux et les cultures pluviales, en bordure de *walo* dans l'attente de la décrue, et sur les bourrelets de berge en saison sèche.

L'agriculture est une activité opportuniste (la pluie, la crue) et risquée (sécheresse, prédateurs...). Elle est aussi peu productive : le rendement du sorgho de décrue est d'environ 400 kg/ha de grains secs, et celui du mil pluvial est d'environ 1 t/ha dans les champs non détruits et moins de 400 kg/ha pour l'ensemble des champs (Boutillier *et al.*, 1962). Malgré cette faible productivité, ces cultures sont relativement coûteuses en travail, de la part des femmes et enfants, et fondées sur l'entraide pour la mise en place, l'entretien et le gardiennage des champs.

Au début des années 1960, la rive sénégalaise de la moyenne vallée comptait environ 200 000 personnes. Boutillier *et al.* (*op. cit.*) concluaient à une élévation du taux d'accroissement de la population, due notamment à la pacification et au développement des infrastructures médicales, et à l'augmentation de la pression sur les ressources. Ces prévisions se sont avérées puisque la population sur la rive sénégalaise était estimée dans les années 1990 à plus de 800 000 habitants, dont 500 000 dans la vallée. Mais à l'exemple des autres ressources, les surfaces cultivées en décrue pouvaient alimenter moins de 400 000 personnes (Roche, *op. cit.*). Il n'est donc pas étonnant que l'émigration internationale soit devenue une nouvelle « activité » au sein du système de production (Lavigne-Delville, 1991).

⁴ Boutillier *et al.* (1962) propose une monographie très précise l'anthropisation de la vallée du Sénégal avant le développement de l'agriculture irriguée.

⁵ *Acacia nilotica* ou gommier rouge.

A cette accélération de la pression démographique s'est ajoutée la succession de fortes sécheresses à partir de 1970, avec pour conséquence le départ d'une forte proportion de la population (Nuttall, 1991). Ces sécheresses successives ont signifié l'absence totale de production pluviale et de décrue, et de pâturages pour le bétail plusieurs années de suite. Elles se sont traduites par un cheptel décimé et des populations affamées qui ont fui vers le sud. Les périmètres irrigués villageois, installés en urgence, ont eu pour objectif de freiner ce mouvement.

I-1-3 Le développement de l'irrigation et l'aménagement du fleuve

L'irrigation sur le fleuve est une idée relativement récente et exogène. Les premiers essais datent de 1820 et sont réalisés à Richard-Toll (Jamin, 1995), où la Compagnie Sucrière Sénégalaise (CSS) exploite actuellement 7 500 ha de canne à sucre. Ces essais concernent des cultures céréalières, dont le riz, mais aussi des légumes et des fruits, et des cultures industrielles comme le coton et l'indigo. Mais les contraintes de salinité et d'enherbement, conjuguées à l'insécurité, ont eu raison de ces essais.

Il faut attendre les années 1930 et la Mission d'Aménagement du Sénégal (MAS) pour que les essais reprennent. Les productions de la colonie doivent répondre aux besoins industriels de la métropole : c'est l'époque de la « traite arachidière » dans le Sine Saloum et du coton irrigué dans la vallée et le delta du Sénégal. Les productions vivrières locales de céréales (mil et sorgho) ont été délaissées et remplacées par l'importation de brisure de riz⁶ en provenance d'Indochine (Faye *et al.*, 2007). Ainsi, au début des années 1970 la consommation de riz atteint 250 000 tonnes dont plus de 100 000 tonnes sont importées.

La riziculture irriguée constitue un moyen pour réduire ces importations et atteindre l'autosuffisance. Par ailleurs, les essais pratiqués à Richard-Toll ont démontré la productivité de la riziculture irriguée, qui constitue de plus un moyen efficace pour maîtriser la salinité dans les terres du delta. La MAS aménage ainsi les premiers « casiers » - cuvettes aménagées pour une irrigation par submersion contrôlée – pour la riziculture à Guédé-Chantier, près de Podor, et à Richard-Toll, et dans lesquels les agriculteurs sont embauchés comme manœuvres (Seck, 1991).

⁶ La graine de riz n'est pas « nue » comme le blé, mais couverte de glumelles dures (balles). L'« usinage » permet de séparer les balles du « riz blanc » qui contient un certain pourcentage de grains entiers et de grains brisés, ou « brisure », de calibre variable. Au-dessus d'un certain calibre, la brisure est commercialisée, en-deçà, elle est mélangée aux balles dans le son, utilisé comme aliment du bétail. Le taux d'usinage correspond au rapport entre le poids de riz blanc commercialisable et de paddy traité.

Ces expériences, relativement réduites et plutôt décevantes⁷, sont reprises après l'Indépendance avec la participation des populations locales. La MAS devient alors un organe commun aux trois pays riverains devenus autonomes. Au Sénégal, ces expériences vont donner naissance en 1965 à la SAED, qui entame des aménagements d'envergure dans le delta - endiguement et création de casiers rizicoles - dont les terres n'ont pas d'antériorité de droit foncier traditionnel et ont été déclarées « zones pionnières ». La mission de la SAED est d'aménager 30 000 ha et de produire 60 000 tonnes de riz pour réduire le déficit vivrier du pays, en installant de nouveaux villages à proximité des casiers. Ces casiers permettent une submersion contrôlée (ouvrages d'entrée et sortie d'eau, et canaux installés selon les courbes de niveau), mais restent tributaires de la crue du fleuve (les premières stations de pompage seront installées en 1968). Ces objectifs ne seront pas tenus : on relève en 1973 environ 10 000 ha semés, avec des rendements inférieurs à 2 t/ha, et seulement 3 villages créés.

En 1972, avec la naissance de l'Organisation pour la Mise en Valeur du fleuve Sénégal (OMVS), un large projet d'aménagement du fleuve est défini. Ce projet, dont le coût est estimé à environ 400 milliards de FCFA (soit plus d'un milliard d'Euros), se fonde sur l'installation d'ouvrages de régulation du fleuve permettant à la fois l'irrigation de 375 000 ha (dont 240 000 ha sur la seule rive sénégalaise), la production d'énergie hydro-électrique, la navigation et la génération d'une crue artificielle pour le maintien des cultures de décrue en moyenne vallée. Ces ouvrages sont à l'aval le barrage « anti-sel » de Diama, qui empêche la remontée des eaux salines et qui sera achevé en 1986, et à l'amont le barrage réservoir de Manantali, d'une capacité d'environ 12 milliards de mètres cubes. A ces deux barrages s'ajoute la poursuite de l'endiguement du fleuve dans le delta, notamment du côté mauritanien. La gestion des barrages permet ainsi de maintenir la cote du fleuve entre 1,50 m et 2,20 m au dessus du niveau de la mer, et de conserver de l'eau dans les lacs de Guiers au Sénégal et de R'kiz en Mauritanie⁸.

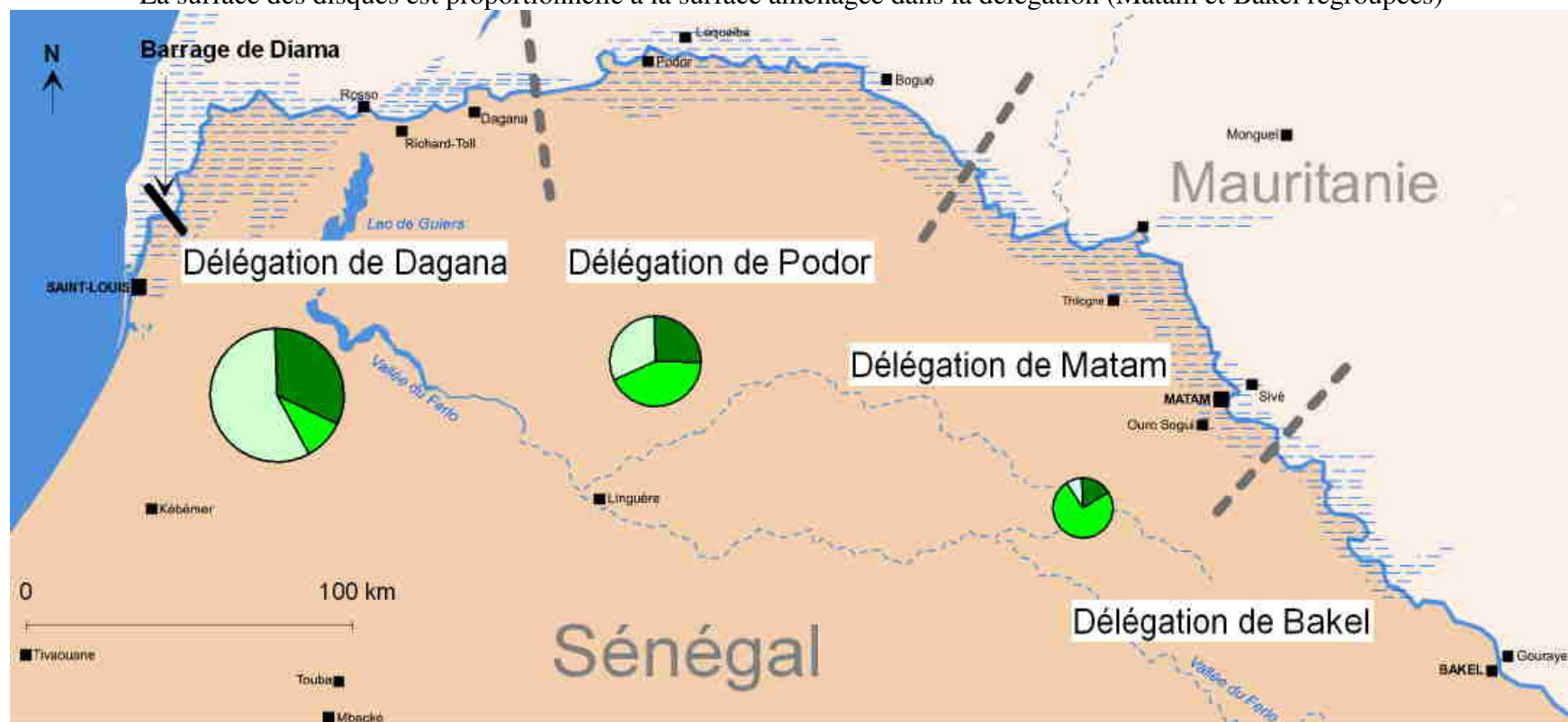
Au Sénégal, les aménagements sont confiés à la SAED et l'Etat définit une politique de « l'après barrages » avec le Plan Directeur de la Rive Gauche (PDRG) qui constitue un outil de planification du développement de la rive sénégalaise. L'objectif est l'aménagement de 240 000 ha exploités principalement en riziculture avec une intensité culturale⁹ de 1,6.

⁷ La société chargée de gérer le casier aménagé à Richard-Toll (6 000 ha) accusait un déficit de 400 millions de FCFA en 1965. Ce casier sera rétrocédé à la CSS en 1971.

⁸ Le maintien du niveau d'eau a eu des conséquences néfastes : développement du typha (sorte de roseau), émergence de maladies parasitaires...

⁹ L'intensité culturale est le rapport entre le total des surfaces cultivées annuellement et la surface exploitable ; lorsque deux cycles culturaux sont effectués sur la même parcelle, l'intensité culturale est doublée.

Figure 7 : Localisation des 4 délégations de la SAED et aménagements hydro-agricoles sur la rive sénégalaise du Sénégal.
La surface des disques est proportionnelle à la surface aménagée dans la délégation (Matam et Bakel regroupées)



Surface totale aménagée : 68 000 ha

- Grands Aménagements : 19 700 ha
- Périmètres Irrigués Villgeois : 16 700 ha
- Périmètres Irrigués Privés : 31 600 ha

La SAED a subdivisé la vallée en 4 délégations : à l'aval, la délégation de Dagana qui regroupe l'ensemble des terres du delta et de la basse vallée du Sénégal, puis la délégation de Podor, où j'ai mené l'essentiel de mes travaux, et enfin celles de Matam et de Bakel (Figure 7). Dans les années 1990, le développement de l'irrigation sur la rive sénégalaise (hors périmètres industriels) se concrétise par 68 000 ha aménagés avec une « maîtrise totale » de l'eau¹⁰. La majorité des surfaces aménagées est située dans la délégation de Dagana (63% des surfaces) ; vient ensuite la délégation de Podor (25% des surfaces) ; les délégations de Matam et Bakel ne concentrent que 12% des surfaces, ce qui montre bien le développement de l'irrigation depuis l'aval vers l'amont.

On distingue différents types d'aménagements selon la taille et le niveau de sophistication, voire le mode de mécanisation préconisé (Seck, 1991 ; Lericollais et Sarr, 1995 ; SAED, 1997).

Les « grands aménagements » (GA), d'une surface de plusieurs centaines à quelques milliers d'hectares, disposent d'une station de pompage importante (plusieurs pompes à moteurs diésels ou électriques), d'un réseau d'irrigation et d'un réseau de collature (ou réseau de drainage de surface) consolidés pour l'évacuation des eaux, de parcelles nivelées avec des voies d'accès (Figure 8). Dans le delta, les stations de pompage sont installées en bordure de larges adducteurs alimentés depuis le fleuve et dont le niveau d'eau est maintenu grâce à l'endiguement ; néanmoins, certains aménagements situés au bord du fleuve et à une cote moindre peuvent être irrigués de façon totalement gravitaire¹¹. Le coût de ces aménagements est élevé (de l'ordre de 10 000 à 20 000 €/ha). Ces périmètres sont installés dans de larges cuvettes argileuses et sont exploités par des producteurs issus de plusieurs villages, qui cultivent chacun des parcelles de l'ordre de 1 à 3 hectares. Dans les années 1990, ces grands aménagements représentaient environ 30% des surfaces exploitées (hors périmètres agro-industriels) sur la rive sénégalaise. Ils représentent 75% des surfaces dans le delta et, à l'inverse, sont quasi inexistantes dans les délégations de Matam et Bakel.

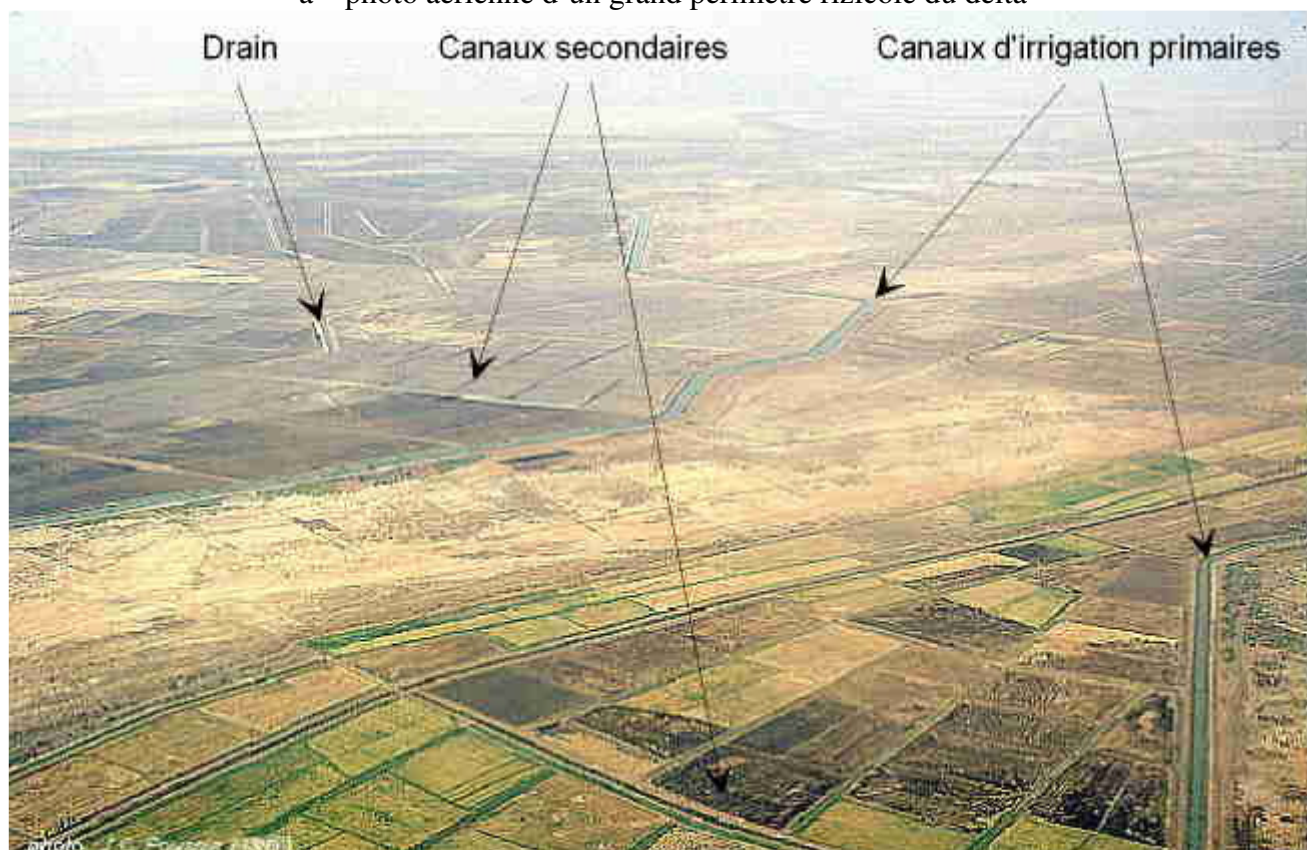
Les « périmètres irrigués villageois » (PIV) sont beaucoup plus modestes en surface (moins de 50 ha) et de conception beaucoup plus sommaire (canaux d'irrigation non consolidés, absence de réseau de collature¹², nivellement sommaire des parcelles...). Ils ont été réalisés à partir de 1975, à l'époque des grandes sécheresses, pour permettre aux populations locales de survivre en demeurant sur place. Les coûts d'aménagements sont beaucoup plus faibles que les pour GA, mais sont très variables en fonction de leur qualité de réalisation (entre 1 000 et 5 000 €/ha). Ils sont exploités par des agriculteurs issus du même village. La surface aménagée est répartie équitablement entre tous les villageois ; les parcelles sont donc généralement de très petite taille (la dizaine d'ares). Les PIV

¹⁰ Contrairement aux casiers originels, ces aménagements disposent d'une station de pompage pour l'irrigation.

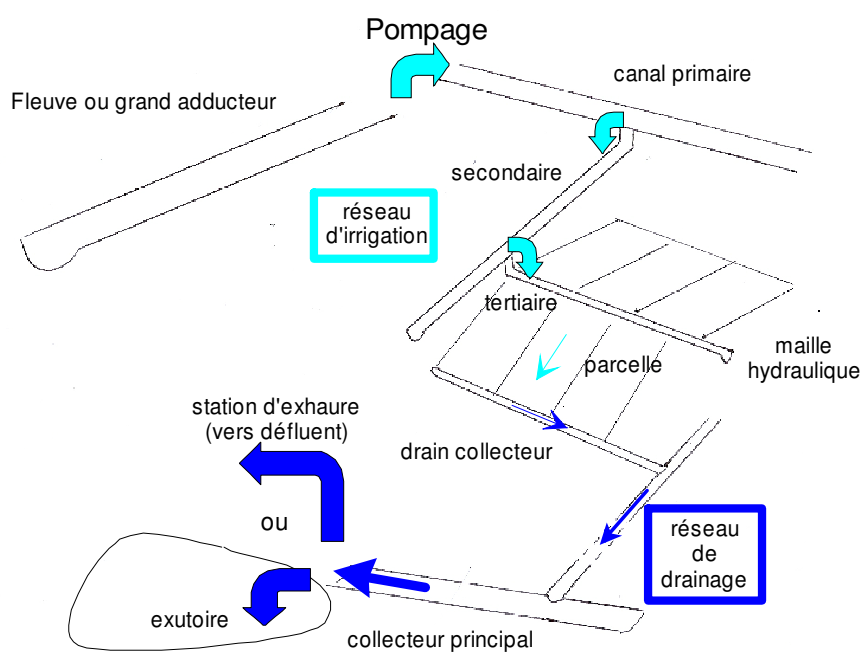
¹¹ Mais l'exhaure des eaux de drainage nécessite tout de même un pompage.

¹² Réseau de drainage à l'air libre (les drains sont le plus souvent enterrés)).

Figure 8 : Structure hydraulique d'un périmètre irrigué
a – photo aérienne d'un grand périmètre rizicole du delta



b – schéma du réseau hydraulique d'irrigation et de collature



sont installés en bordure du fleuve ou de l'un de ses défluent, et l'irrigation est assurée par une petite station de pompage à moteur thermique installé sur bac flottant¹³. Ces périmètres sont souvent aménagés sur les bourrelets de berges (ou « levées ») où les sols sont considérés comme plus « légers » ; ces sols contiennent néanmoins plus de 30% d'argile et sont hydromorphes (Boivin *et al.*, 1995). Vu la réussite de ces aménagements auprès des populations, des « périmètres intermédiaires » entre PIV et GA ont été conçus à partir de la fin des années 1980. Comme les PIV, ils ne sont exploités que par un seul village, mais disposent d'une infrastructure hydraulique – associé à un coût de réalisation - comparable aux GA. Ils sont plus grands que les PIV (jusqu'à 100 ha) et proposent généralement un équipement pour le travail du sol (motoculture ou traction bovine). Dans les années 1990, PIV et périmètres intermédiaires regroupaient le quart des surfaces exploitées. Minoritaires dans la délégation de Dagana, ils sont majoritaires ou regroupent la quasi-totalité des surfaces exploitées dans la vallée.

Enfin, près de la moitié (45%) des surfaces ont été aménagées sur initiative privée et sans appui technique de la SAED à partir de la fin des années 1980. Ces aménagements privés, dénommés « périmètres irrigués privés » (PIP), ont une taille similaire aux PIV et une infrastructure souvent plus sommaire car ils ont été installés au moindre coût ou par seule stratégie foncière. Ils sont exploités par un seul agriculteur-investisseur (c'est le cas du delta qui regroupe 84% des surfaces), ou par une ou plusieurs familles, ayant-droits traditionnels des terres dans la vallée. Du fait de leur qualité d'installation, certains PIP ont été rapidement abandonnés après seulement quelques campagnes de culture.

Le statut foncier des terres sur lesquelles ont été installés tous ces aménagements n'est pas anodin (Mathieu, 1991). Le statut de « zone pionnière » des terres du delta explique la prédominance de surfaces aménagées en GA et en PIP. Dans la vallée, les droits fonciers traditionnels donnent une explication à la redistribution des parcelles dans les PIV après une attribution officielle équitable entre les villageois, ainsi qu'à l'installation de certains PIP en compensation de terres aménagées en PIV. Enfin, les querelles entre agriculteurs irrigants et éleveurs peuls ont souvent pour origine l'oubli des droits de passage et des lieux d'abreuvement traditionnels des animaux au profit des aménagements (Santoir, 1995).

L'exploitation des aménagements est assez différente dans le delta et dans la vallée. Les aménagements installés dans la vallée sont exploités par les producteurs des villages indigènes. Dans le delta, des villages ont été construits pour accueillir les exploitants venant d'autres régions. Dans les deux cas, l'agriculture irriguée est réalisée quasi exclusivement dans des aménagements

¹³ C'est le débit du « groupe moto-pompe » qui détermine la taille maximale de l'aménagement.

collectifs. Cet aspect collectif concerne non seulement les infrastructures et les matériels, mais aussi, en premier lieu, la distribution de l'eau dans les parcelles. Car l'eau n'est pas « disponible » chaque jour pour les individus qui cultivent leurs propres parcelles. Il existe des règles de distribution, regroupées sous le terme de « tour d'eau », entre parcelles d'une même maille hydraulique et, assez souvent aussi, entre mailles hydrauliques au sein du même aménagement. Cet aspect collectif de la gestion de l'eau impose des choix collectifs pour les cultures et leur conduite : un individu ne peut décider seul de cultiver pendant une saison, ni du type de culture implantée, ni de la date d'implantation...

Toutefois, la riziculture irriguée, qui a motivé ces aménagements, montre des performances médiocres, très en dessous des espérances. En effet, les objectifs fixés par le PDRG, 240 000 ha irrigués avec une intensité culturale de 1,6 et l'autosuffisance alimentaire du pays en riz, n'ont pas été atteints, loin de là. Dans les années 1990, la totalité des surfaces aménagées n'est pas exploitée (l'intensité culturale est même descendue au dessous de 0,5 à la fin des années 1990), et la production de paddy, inférieure à 200 000 tonnes, est loin de suffire aux besoins nationaux, ce qui oblige à importer environ 400 000 tonnes de brisure. A ces résultats très en dessous de ceux escomptés, s'ajoutent des coûts de production élevés (liés notamment au pompage de l'eau d'irrigation et à la mécanisation des travaux) qui rendent la production locale peu - voire non - compétitive par rapport au riz importé. L'Etat, la SAED, les bailleurs de fonds internationaux, tous s'interrogent alors sur la rentabilité des investissements réalisés pour ces aménagements qui ont profondément modifié le milieu naturel¹⁴.

Les impacts environnementaux les plus importants des aménagements se situent dans le delta. En effet, l'endiguement du fleuve empêche dorénavant l'inondation des vasières comme de certaines cuvettes¹⁵, et maintient un niveau constant dans les lacs de Guiers et de Rkiz, alors que le barrage de Diama interdit le mélange avec les eaux marines en saison sèche. Tout cela a modifié profondément le fonctionnement des écosystèmes (Philippe *et al.*, 1997 ; Duvail *et al.*, 2001). Cela est d'autant plus grave que le delta du fleuve concentre plusieurs zones humides ayant une valeur biologique particulière, dont le parc ornithologique du Djouj¹⁶ qui est classé depuis 1981 au Patrimoine Mondial de l'UNESCO. Ces modifications sont aussi à l'origine de l'émergence de maladies parasitaires, notamment à proximité du lac de Guiers (Handshumacher *et al.*, 2000).

¹⁴ Dans les années 1970, les impacts environnementaux n'étaient pas envisagés de la même manière qu'aujourd'hui dans les études des pré-projets.

¹⁵ Notamment la cuvette de Ndiael, à quelques kilomètres

¹⁶ Ce parc est l'un des trois principaux sanctuaires d'Afrique Occidentale pour les oiseaux migrateurs paléarctiques (Niasse, 2007) et accueille également des espèces afro-tropicales.

I-2 Le riz, sa culture et ses performances dans la vallée

Pour établir un premier diagnostic de la situation, commençons par montrer comment le climat de la vallée du Sénégal influe sur la croissance et le développement du riz irrigué. Puis nous nous familiariserons avec la façon de conduire la riziculture, et enfin, nous étudierons les grandes lignes de ses performances.

I-2-1 Le riz et la riziculture irrigué

Le climat de la vallée convient tout à fait à la riziculture irriguée puisque le rendement potentiel (où seul le rayonnement solaire limite la croissance) des variétés couramment utilisées est estimé entre 8 et 10 t/ha en fonction du site et de la saison de culture (Dingkuhn et Sow, 1997) et qu'en plus il est possible de réaliser deux cycles de culture la même année (Jamin, 1986 ; Dingkuhn, 1994).

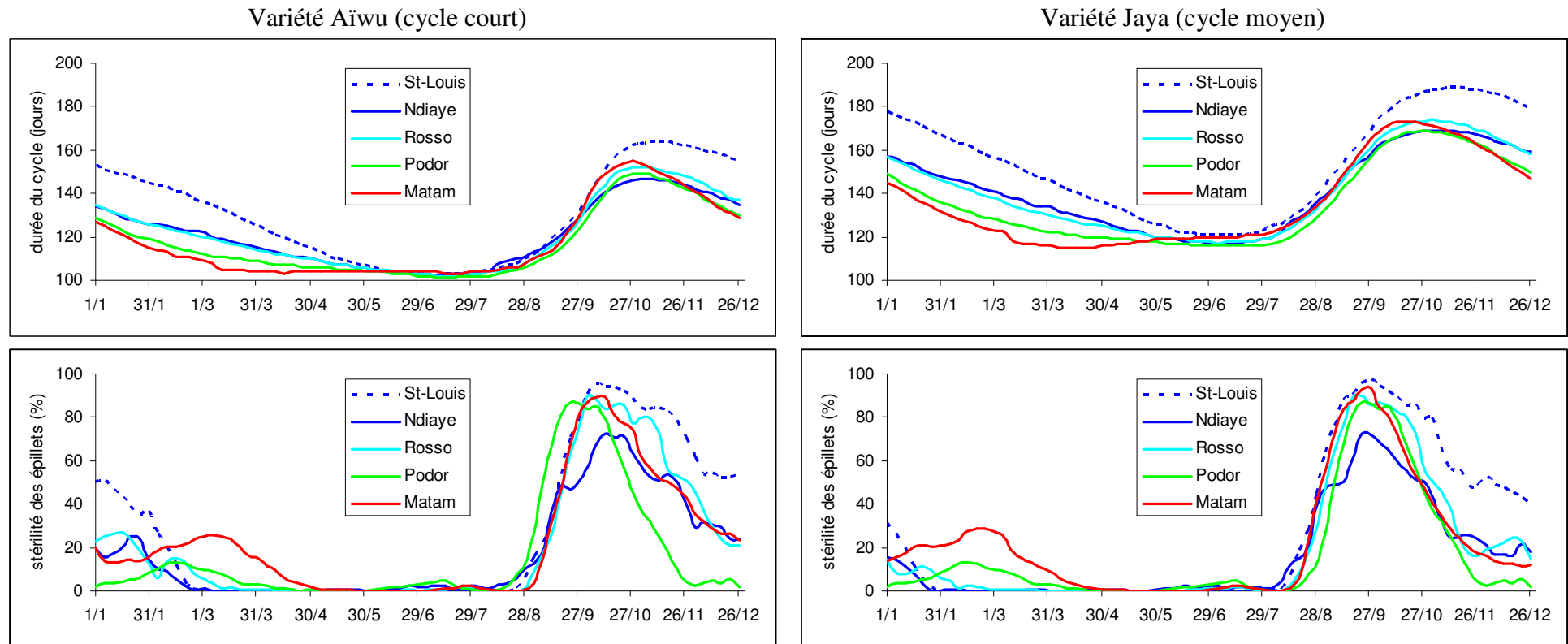
Le riz nécessite d'accumuler des températures pour atteindre la floraison ; ce cumul de températures varie d'une variété à l'autre, ce qui explique des précocités différentes. Par ailleurs, certaines variétés sont photosensibles et l'allongement de la durée du jour accélère le passage en phase reproductrice. La vitesse de développement des variétés de riz cultivées au Sahel est maximale entre 25 et 30°C ; au dessous de 12 à 15°C, le développement du riz s'arrête (Dingkuhn et Miézan, 1994).

La figure 3 indique les températures moyennes journalières enregistrées par 6 stations météorologiques réparties au long de la vallée : St-Louis, sur la côte, puis Ndiaye¹⁷, qui se situe à 25 km en amont, ne subit pas les brises de l'Atlantique ; Rosso, à une trentaine de kilomètres à l'aval de Dagana, qui dispose d'une station météorologique ; puis Podor et Matam, qui disposent chacune d'une station. Bakel n'a pas été retenu car les températures sont semblables à celles de Matam. Excepté sur St-Louis rafraîchi par les alizés, les températures moyennes dans la vallée du Sénégal sont optimales pour le développement du riz entre début mars et fin novembre. En saison fraîche, où les températures sont moindres d'environ 10°C, les agriculteurs peuvent cultiver du maraîchage dans les périmètres irrigués.

Le développement des organes floraux du riz est très sensible aux températures extrêmes (Yoshida, 1981 ; Dingkuhn et Miézan, *op. cit.*). Les basses températures, notamment nocturnes, inférieures à 18°C, perturbent la formation des organes mâles et provoquent ainsi une stérilité. Le riz est également sensible aux fortes chaleurs, mais de façon moins aiguë. Entre l'épiaison (stade qui précède la floraison) et le début de la maturation, des températures moyennes journalières

¹⁷ Site sénégalais de l'Association pour le Développement de la Riziculture Irriguée en Afrique de l'Ouest (ADRAO).

Figure 9 : Durée du cycle semis-maturité et taux de stérilité moyens selon la date de semis et le site (depuis l'aval vers l'amont) pour deux variétés de riz (moyennes calculées à l'aide du logiciel RIDEV)



Remarques :

- La durée du cycle varie d'une cinquantaine de jours selon la période de semis ; la durée la plus courte à lieu pour un semis en juin-juillet, début d'hivernage, et la plus longue pour un semis en octobre, juste avant le démarrage de la saison fraîche.
- On peut semer du mois de mars au mois d'août, sauf en amont où le taux moyen de stérilité dépasse 20% lorsqu'on sème en mars.

supérieures à 32°C induisent également une stérilité des épis. La stérilité due au froid comme la stérilité due à la chaleur influence directement le rendement.

Ces caractéristiques - vitesse de développement et risque de stérilité - expliquent que le riz irrigué, dans la vallée du Sénégal comme ailleurs au Sahel, est cultivé principalement en hivernage (Dingkuhn, 1997). Les agriculteurs utilisent des variétés de riz à cycle moyen, comme Jaya, choisies pour leurs qualités gustatives. Néanmoins, les cultures semées tardivement, au-delà de la fin août, peuvent se heurter aux faibles températures qui apparaissent dès la fin octobre.

Pour augmenter l'intensité culturale, il faut cultiver deux cycles de riz la même année sur la même surface. Le riz doit alors être semé assez tôt pour pouvoir être récolté tôt et permettre ainsi un second cycle en hivernage. Ce premier cycle a lieu en grande partie pendant la saison chaude, entre mi avril et mi juin. L'usage d'une variété de riz à cycle court (ou variété précoce), comme Aïwu ou comme Sahel 108 qui a été produite par l'ADRAO, permet d'avoir une récolte précoce offrant la possibilité d'installer un second cycle en hivernage. La culture peut démarrer entre fin février et début avril, pour être récoltée en juin-juillet. Cette culture dite de « saison chaude » se heurte à deux obstacles : au moment de l'installation de la culture, les faibles températures, sous optimales, ralentissent la germination et le développement du riz, et les températures élevées en mai et juin peuvent provoquer une stérilité des épis.

J'ai contribué à réaliser un logiciel d'aide à la décision à partir d'un modèle agro-physiologique du développement du riz irrigué au Sahel conçu par l'ADRAO [L-03]. Ce logiciel, baptisé RIDEV, permet de déterminer par simulation la durée du cycle et le taux de stérilité en fonction des températures journalières (minimum et maximum de l'air), de la date de semis, de la variété semée et du mode d'implantation (semis d'une pépinière puis repiquage, ou semis direct dans la parcelle de culture). L'usage de ce modèle pour la prévision suppose d'effectuer plusieurs simulations en utilisant des enregistrements climatiques passés. On peut ainsi repérer les périodes propices au semis pour les cultures de saison chaude ou d'hivernage en fonction : 1) de la variété utilisée (sa précocité), 2) du niveau de risque accepté de baisse de rendement due à la stérilité des épillets induite par les températures extrêmes durant la floraison du riz [O-05] (Figure 9). On peut également mesurer le risque de stérilité auquel la culture est exposée en cas de semis en dehors de ces périodes, notamment pour cause de retard.

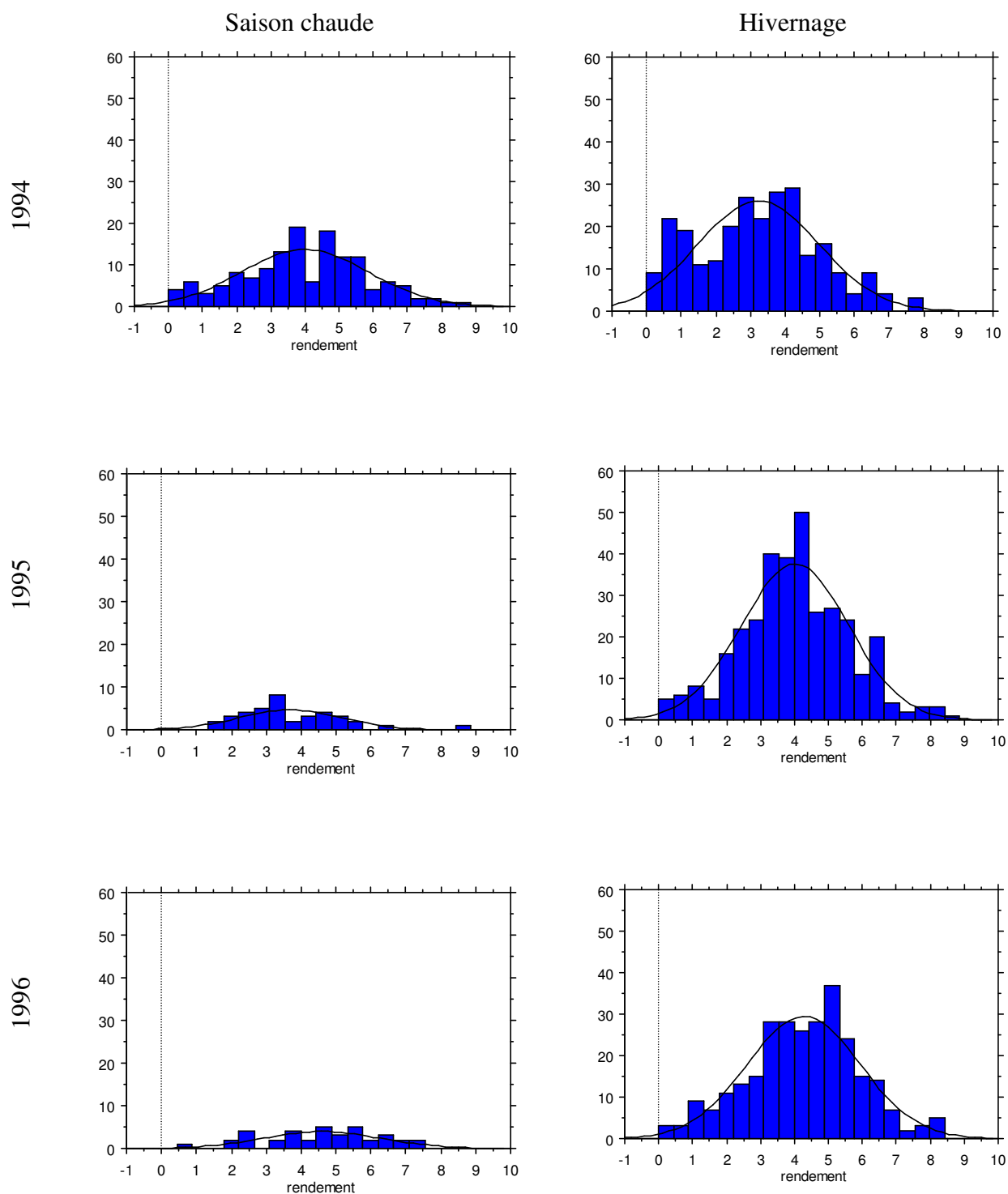
Pour éviter une forte stérilité des épillets lors d'une culture de saison chaude, on peut semer le riz dès le début du mois de mars. Dans la délégation de Dagana, le risque de stérilité (mesuré, dans cet exemple, par la moyenne du taux de stérilité simulé pour l'ensemble des scénarios climatiques) est très faible (voir les courbes obtenues pour les stations de Ndiaye et Rosso sur la figure 9). Dans la

délégation de Podor, les simulations indiquent une stérilité plus élevée - 10 à 15% en moyenne - lorsque le semis est effectué à la même période. Dans celles de Matam et Bakel, où les températures sont très voisines, la moyenne des taux de stérilité simulés dépasse 20% ; la riziculture de saison chaude apparaît donc assez risquée dans ces deux délégations. Dans tous les cas, une culture semée au mois de mars ne peut être récoltée avant début juillet. Concernant la culture d'hivernage, le taux moyen de stérilité des épillets augmente très rapidement pour les cultures semées après le 15 août quand on choisit une variété de cycle moyen comme Jaya (ce qui est généralement le cas pour la culture d'hivernage), ou après la fin août avec une variété plus précoce comme Aïwu ou Sahel 108. En cas de double riziculture (succession d'une culture de saison chaude et d'une culture d'hivernage sur la même parcelle), les agriculteurs disposent donc d'un maximum de deux mois pour récolter le premier cycle, préparer le sol et semer le second cycle. Ceci explique, au moins en partie, pourquoi on observe rarement la « double culture » du riz dans le delta du Sénégal comme dans la vallée (Le Gal et Papy, 1998).

Le riz peut être implanté de deux manières : en semant des graines directement dans la parcelle de culture – on parle alors de « semis direct » - ou en repiquant de jeunes plants cultivés au préalable dans une pépinière. Le mode d'implantation influe fortement sur la disposition et la densité de peuplement, ainsi que sur les techniques de contrôle de l'enherbement et de fertilisation. Par ailleurs, le repiquage engendre un stress physiologique chez les plantules de riz qui se traduit par un arrêt du développement et donc par un allongement de la durée du cycle de l'ordre de une à deux semaines. Dans la vallée du Sénégal, l'implantation par semis direct est majoritaire. Le choix du mode d'implantation, comme celui d'autres techniques culturales, notamment la récolte, ne peut être aisément raisonné individuellement [0-07].

Les recommandations de l'ADRAO pour la conduite d'une parcelle de riz sont les suivantes (WARDA et SAED, 2001). Après la préparation du sol, généralement motorisée (deux passages d'outil à disque), l'irrigation démarre avec la mise en eau de la parcelle juste avant le semis direct ou le repiquage du riz. Il s'agit de maintenir une lame d'eau d'épaisseur homogène (entre 5 et 20 cm selon le stade du riz) dans toute la parcelle. L'épaisseur de la lame d'eau doit être plus faible en début de cycle lorsque les plants de riz sont jeunes ; elle peut atteindre 20 cm par la suite. L'apport d'eau dans la parcelle dépend du tour d'eau établi au sein du périmètre et de la maille hydraulique. A l'approche de la maturité, l'absence d'eau accélère la maturation, améliore l'homogénéité intra-parcellaire et permet aux engins de pénétrer dans la parcelle (Dingkuhn et Le Gal, 1996). Entre l'implantation et la récolte, les interventions culturales se limitent au désherbage et aux apports d'engrais. Ces interventions nécessitent également l'absence de lame d'eau. Un premier désherbage, à l'aide d'herbicides, doit être réalisé 20 à 30 jours après le semis direct (les plants de riz doivent

Figure 10 : Distribution des rendements selon l'année et la saison de culture
(en abscisse, le rendement de paddy en tonnes par hectare, en ordonnée, le nombre d'exploitations, ou « parcelles », concernées).



avoir atteint le stade 3-4 feuilles), ou 10 à 20 jours après le repiquage (à la « reprise » des plants repiqués). Ce désherbage est suivi, après 2 ou 3 jours, d'un premier apport d'engrais (mélange d'azote et de phosphore). Un second apport d'engrais (azote seul) doit ensuite être réalisé 20 à 30 jours - selon la précocité de la variété - après ce premier apport. Il peut être précédé d'un désherbage manuel en cas d'envahissement important par les mauvaises herbes.

I-2-2 Variabilité des performances dans la vallée

Pour donner un premier aperçu des performances agronomiques de la riziculture irriguée sur le fleuve Sénégal, je m'appuie sur une analyse d'enquêtes effectuées entre 1994 et 1996¹⁸ dans les quatre délégations par le Département de la Promotion et du Développement Rural (DPDR) de la SAED. Ces enquêtes concernent un large échantillon de 200 à 250 exploitations qui ont été suivies aux plans technique et économique pendant trois ans. Les données enregistrées ont été étudiées par Bélières et Touré (1999) dans leurs travaux de thèse sur l'économie de la filière rizicole. Cette analyse a été effectuée en 1998, bien après le démarrage de mes travaux¹⁹. Les conclusions ont été rassemblées dans un document de travail [G-15 en annexe] remis à la SAED et discuté lors d'une réunion avec les principaux responsables (ingénieurs et conseillers) de la SAED-DPDR.

Ces enquêtes renseignent sur les rendements obtenus par chaque exploitation pour les deux saisons de culture (saison chaude et hivernage) durant les trois années suivies (Figure 10). Les rendements, en saison chaude comme en hivernage, s'échelonnent entre 0 et 9 t/ha de paddy avec une moyenne autour de 4 t/ha, soit environ la moitié du rendement potentiel des variétés couramment utilisées (Dingkuhn, et Sow 1997). Le nombre de parcelles cultivées (en ordonnée sur les histogrammes) est moins important en saison chaude qu'en hivernage, surtout en 1995 et 1996 : en 1994, 153 parcelles cultivées en saison chaude et 278 cultivées en hivernage, en 1995, 39 parcelles cultivées en saison chaude et 357 en hivernage, en 1996, 44 parcelles cultivées en saison chaude et 306 en hivernage. Par ailleurs, cette culture de saison chaude concerne quasi exclusivement la délégation de Dagana, la plus proche de St-Louis où la SAED a son siège, et où prédominent les grands aménagements, dans lesquels interviennent encore les agents de la SAED pour la gestion des stations de pompage. En effet, le message des techniciens de la SAED à l'époque est très clair : « la double riziculture est le moyen de rentabiliser les aménagements hydro-agricoles ».

¹⁸ L'enquête a démarré en 1993. Du fait des grosses incertitudes pesant sur les données enregistrées et des incohérences relevées en 1993, cette année-là a été écartée de l'analyse.

¹⁹ C'est généralement après avoir montré ses compétences qu'on peut établir de réelles relations avec les partenaires, chercheurs, agents d'institutions de développement ou bailleurs de fonds, et même agriculteurs.

Tableau 1 : Coûts et marges par hectare en équivalent paddy
(Sources : enquête SAED-DPDR)

	moyenne	écart-type	mini	maxi
Coût hors redevance (t/ha)	1,00	0,31	0,10	2,31
Coût redevance incluse (t/ha)	1,56	0,36	0,22	2,91
Redevance (t/ha)	0,56	0,15	0	1,60
Marge (t/ha)	2,31	1,62	-2,30	6,94

La distribution des rendements en hivernage 1994 diffère de celles de 1995 et 1996. On remarque une fréquence plus importante de rendements inférieurs à 2 t/ha, et l'analyse de variance indique une augmentation significative du rendement moyen (0,4 t/ha) en 1995 et 1996 par rapport à 1994. En hivernage 1994, les parcelles cultivées sont moins nombreuses et les rendements plus faibles. La réalisation d'un premier cycle en saison chaude serait-elle à l'origine de ce constat ? L'enquête ne permet malheureusement pas de savoir si les rendements des parcelles cultivées seulement en hivernage sont meilleurs que dans les parcelles cultivées pendant deux cycles, en saison chaude et en hivernage. Néanmoins, cette hypothèse pourrait également expliquer le recul du nombre de parcelles cultivées en saison chaude, qu'on a observé en 1995 et 1996.

Les coûts de productions ont également fait l'objet d'un suivi. Ils concernent les semences, engrais et herbicides utilisés, les travaux de préparation du sol - réalisés généralement par un prestataire de service mécanisé qui peut être le GIE qui gère l'aménagement - et enfin la « redevance » qui représente le coût de l'irrigation (qui recouvre le fonctionnement de la station de pompage et, théoriquement, l'entretien de l'aménagement et la provision pour amortissement). Le coût de la récolte, mécanisée ou manuelle, ainsi que le coût de la main d'œuvre salariée ne sont pas renseignés. Plutôt que de raisonner, comme un économiste, en valeur monétaire pour comparer les produits et les coûts, j'ai choisi d'exprimer ces coûts en « équivalent paddy » c'est-à-dire en quantité de paddy valorisé au prix courant annuel²⁰. Le coût de production hors redevance, main d'œuvre et récolte, varie entre 0,10 et 2,31 t/ha de paddy avec une moyenne de 1,00 t/ha (Tableau 1). Notre analyse des travaux à l'origine de ces coûts [G-15 en annexe] indique une forte variabilité des pratiques – notamment pour le semis, la fertilisation et le désherbage - malgré une « fiche technique » de conduite du riz très uniforme.

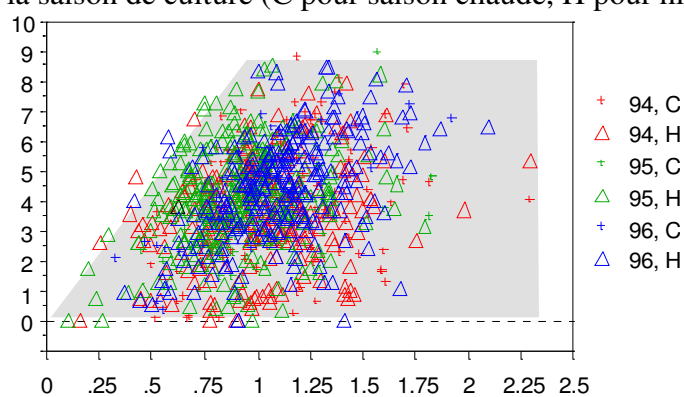
Quand on intègre la redevance, le coût de production varie de 0,22 à 2,91 t/ha de paddy (Tableau 1). Cette redevance est assez variable entre les aménagements : elle s'élève en moyenne à environ 0,56 t/ha de paddy avec un écart-type de 0,15 t/ha. A l'époque, les techniciens de la SAED estimaient que cette redevance devait s'élever à plus de 120 000 FCFA/ha (soit environ 1,20 t/ha de paddy) pour couvrir non seulement le fonctionnement de la station de pompage, mais aussi l'entretien de l'aménagement (réseaux d'irrigation et de collature), et pour constituer un fonds destiné au renouvellement des matériels de pompage. Très généralement, le montant de la redevance permet tout juste de couvrir les frais de fonctionnement courant. Ce montant résulte d'une négociation entre le GIE et les agriculteurs²¹. Les coûts sont récupérés à la récolte par le GIE, si la quantité récoltée

²⁰ Cette transformation s'avère assez pratique pour raisonner sur une culture vivrière, surtout lorsque les coûts sont payés en nature comme c'est le cas ici.

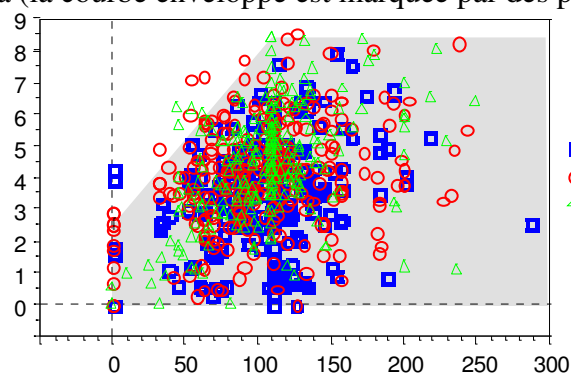
²¹ Dans les grands aménagements qui conservent un appui technique fort de la SAED pour la gestion de leur station de pompage, les techniciens de la SAED participent à cette « négociation ».

Figure 11 : Relation entre variabilité des rendements et variabilité de coût de production (a) ou variabilité de quantité d'azote apporté (b)
[graphiques tirés de G-15].

a) rendement (t/ha) en fonction du coût sans irrigation (t/ha) selon l'année (1994, 1995, 1996) et la saison de culture (C pour saison chaude, H pour hivernage)



b) rendement (t/ha) selon la quantité d'azote apportée (kg/ha) en hivernage dans la délégation de Dagana (la courbe enveloppe est marquée par des pointillés noirs).



dépasse celle des besoins alimentaire de la famille. Dans le cas contraire, l'agriculteur s'endette auprès du GIE, lequel s'endette auprès de la banque²². Le montant négocié pour la redevance reflète donc la capacité des agriculteurs à dégager un surplus de production de riz.

Lorsque l'agriculteur ne peut réaliser la récolte et le battage du paddy lui-même avec sa famille, le coût de cette récolte est généralement très élevé. Le paiement d'une récolte manuelle est réalisé en nature et peut représenter 20% du paddy récolté (hors nourriture des manœuvres), soit environ 0,8 t/ha pour un rendement de 4 t/ha. Une récolte avec une moissonneuse batteuse est payée en liquidité entre 70 000 et 90 000 FCFA, soit en moyenne l'équivalent de 0,8 t/ha de paddy. La récolte manuelle est donc moins coûteuse que la récolte mécanisée lorsque le rendement est faible. C'est l'inverse quand le rendement est fort. Ce critère n'est pas le seul à entrer en compte pour le choix du mode de récolte. Par exemple, l'assèchement précoce de la parcelle est nécessaire pour permettre l'entrée des engins de récolte. La disponibilité de main d'œuvre ou d'une moissonneuse-batteuse (opérationnelle) à la maturité du riz est également un critère de choix. Une récolte à sur-maturité engendre de fortes pertes au champ par égrenage ainsi qu'un paddy de mauvaise qualité, laquelle génère une baisse du taux d'usinage²³.

La « marge », différence entre rendement et coût (redevance comprise), s'étale entre -2,30 et 6,94 t/ha de paddy, et s'élève en moyenne à 2,31 t/ha (Tableau 1). La variabilité de marge provient principalement de la variabilité du rendement. Si l'on retire le coût de récolte, il reste en moyenne 1,5 t/ha, soit la consommation annuelle d'une famille de 7 personnes²⁴. Dans l'échantillon sur lequel a porté l'enquête, la surface moyenne par exploitation est 1,22 ha. Connaissant la taille de la famille dans une exploitation sénégalaise qui regroupe généralement plusieurs ménages, on comprend aisément que le montant négocié de la redevance soit plus faible que le coût réel de l'irrigation, et que de nombreux agriculteurs soient « endettés » auprès de leur GIE (Bélières et Touré, 1999).

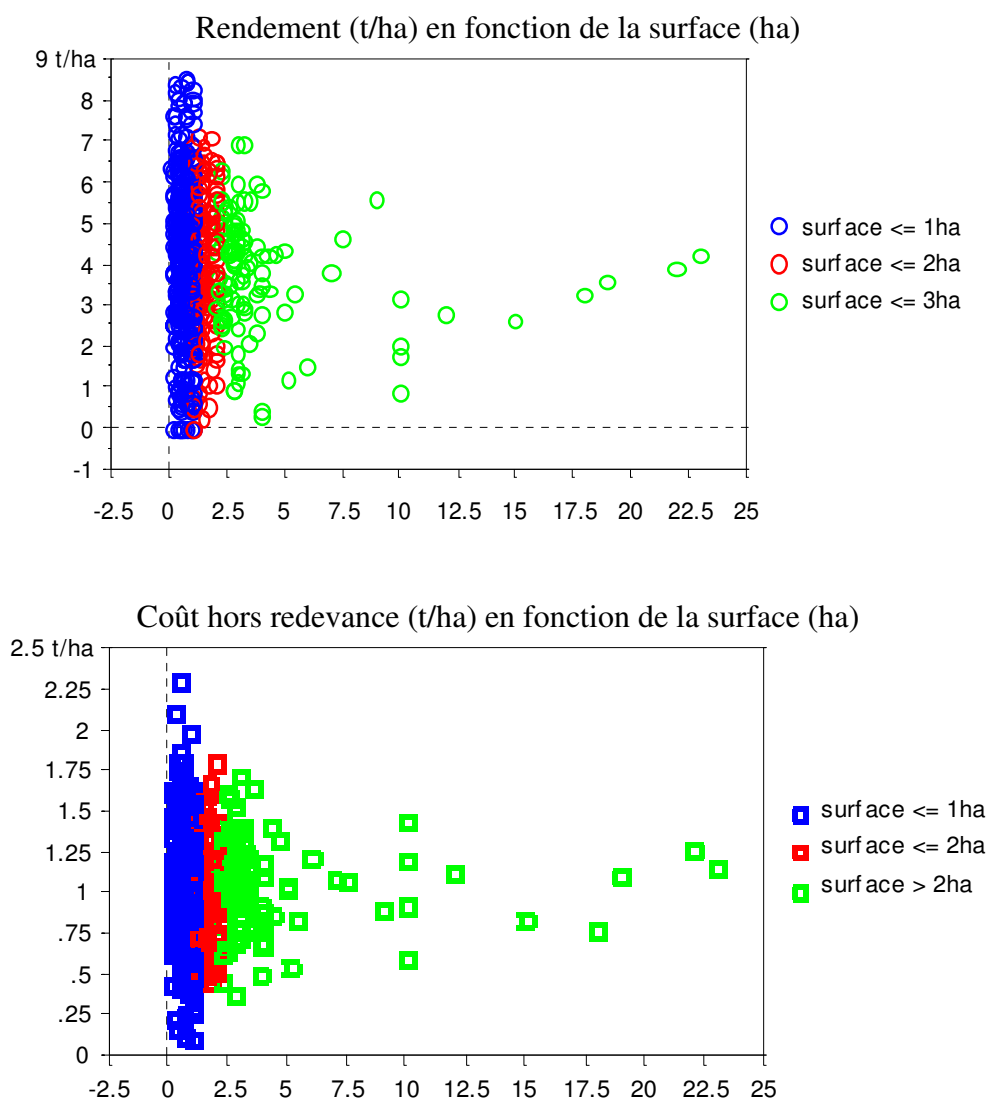
Existe-t-il un lien entre la variabilité du coût et celle du rendement ? La figure 11-a montre clairement l'absence de corrélation ou de relation directe entre le coût hors irrigation et le rendement... On peut néanmoins noter que (i) la courbe enveloppe « max(rendement) = f(coût) » croît jusqu'au palier de 9 t/ha qui est atteint pour un coût d'environ 1,25 t/ha de paddy, (ii) les « parcelles » qui sont situées sur cette courbe enveloppe correspondent à des situations d'efficacité maximale des intrants et représentent moins de 10% des cas, et (iii) les parcelles qui sont situées

²² A cette époque, près d'un GIE sur deux était endetté (SAED, 1997 ; Bélières et Touré, 1999).

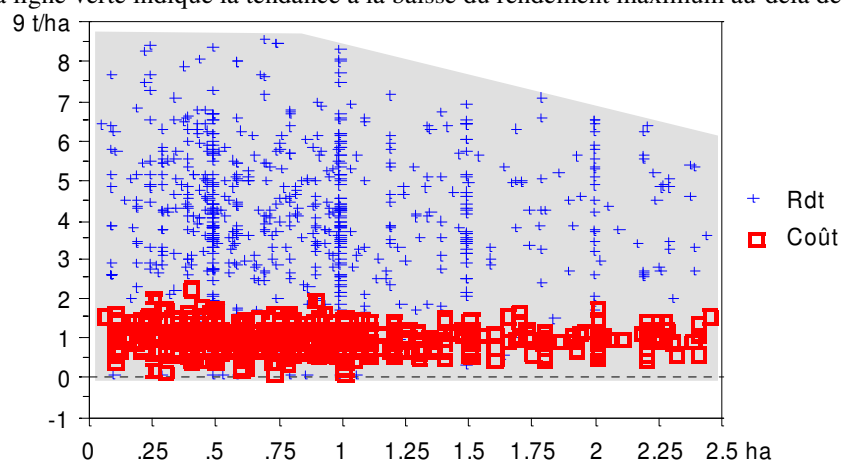
²³ Rappel (Cf. note 5) : ratio de la quantité de riz blanc sur la quantité de paddy décortiquée. Une mauvaise qualité de paddy produit plus de brisure et de son.

²⁴ Sur la base d'une consommation quotidienne de 450 g par individu (source FAO) et d'un taux d'usinage du paddy de 75%

Figure 12 : Effet de la surface cultivée sur la variabilité du rendement et du coût hors redevance,
Délégation de Dagana, hivernages 1994, 95 et 96
[graphiques tirés de G-15].



Rendement et coût (t/ha) en fonction de la surface (ha) dans les parcelles de moins de 2,5 ha
La ligne verte indique la tendance à la baisse du rendement maximum au-delà de 1 ha



très en dessous de cette courbe enveloppe, ou qui ont un coût de production supérieur à 1,25 t/ha, correspondent à des situations de “gaspillage” et représentent plus de 90% des cas.

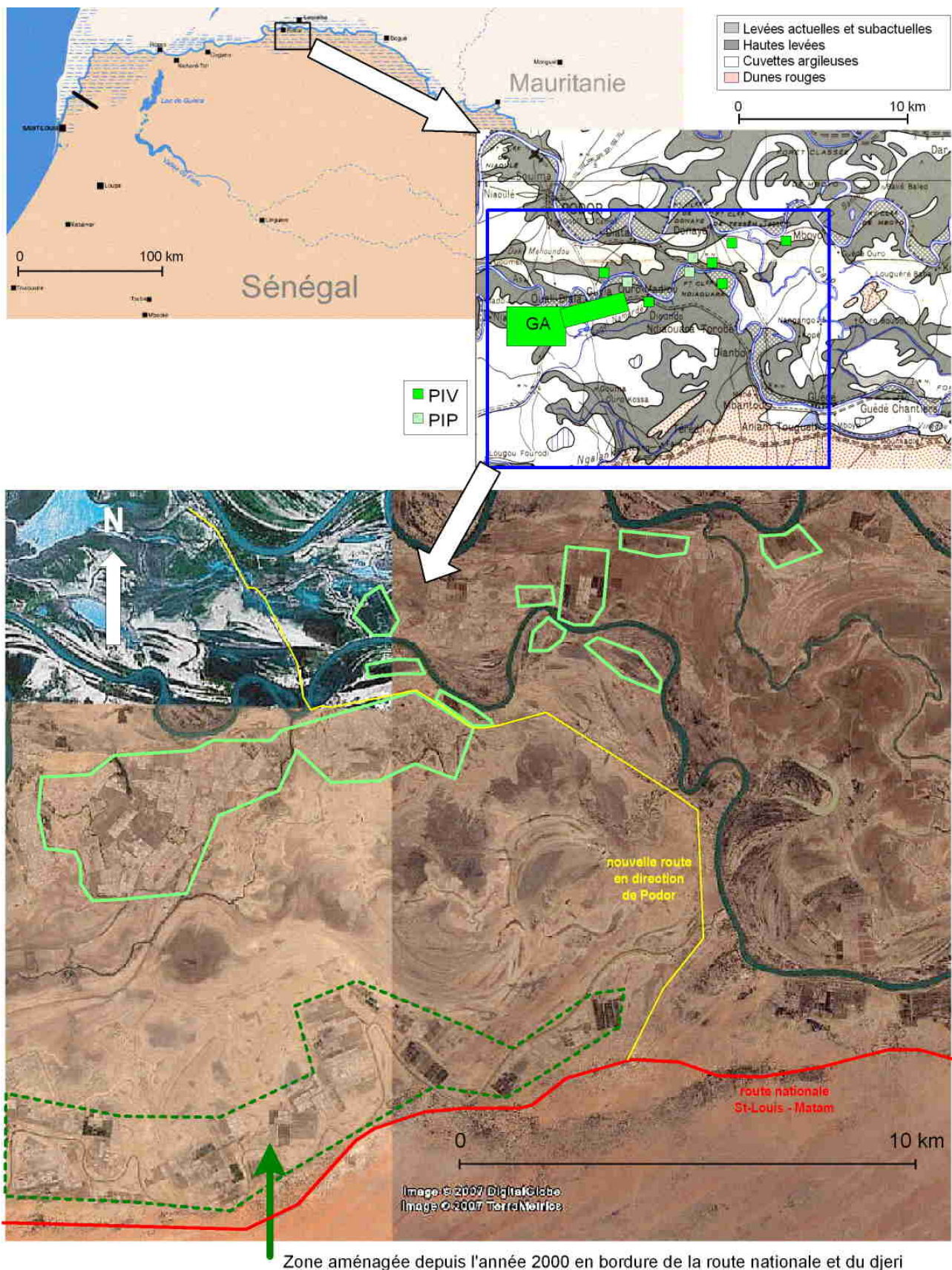
On peut étudier de la même façon la relation entre la variabilité du rendement et celle de la quantité d’azote apportée par la fertilisation, car le riz irrigué a généralement une bonne réponse à la fertilisation azotée. Comme on pouvait s’y attendre, la figure 11-b est semblable à la précédente (absence de corrélation linéaire ou de relation directe). Néanmoins, la courbe enveloppe « max(rendement) = f(dose d’azote apportée) » atteint le palier de 9 t/ha pour une dose d’azote d’environ 120 kg/ha. Cette dose correspond aux recommandations (100 kg/ha de DAP contenant 18% d’azote et 300 kg/ha d’urée contenant 33% d’azote) qui ont été établies grâce aux essais réalisés en stations expérimentales.

Enfin, j’ai mis en relation le rendement et le coût hors redevance avec la surface cultivée (Figure 12). Il apparaît que le rendement maximum et le coût maximum baissent lorsque la surface augmente. Si l’on ne retient que les exploitations les plus nombreuses dont la surface cultivée est inférieure à 2,5 ha, cette tendance est plus nette. Elle indique que les agriculteurs ont tendance à investir plus de travail par unité de surface quand la surface est réduite, et à l’inverse, la force de travail deviendrait un facteur limitant (pour les résultats) lorsque la surface est importante. Par ailleurs, on peut supposer (sans trop se tromper) que plus la surface cultivée augmente, plus elle correspond à une agrégation de différentes parcelles. Ainsi, les observations correspondent à une moyenne des résultats obtenus sur plusieurs parcelles, résultats qui peuvent être également hétérogènes.

Que retenir de cette première analyse des performances de la riziculture irriguée ? Tout d’abord, la forte variabilité des rendements ; c’est elle qui explique principalement la variabilité de marge dégagée par la riziculture. Ensuite, la redevance qui ne couvre pas le coût réel de l’irrigation. Si on veut l’augmenter, il faut dégager des surplus plus importants et donc augmenter le rendement moyen. Enfin, une efficacité très variable des facteurs de production, par exemple la fertilisation, qui permet d’envisager des gains très forts de productivité de la riziculture, notamment pour dégager des surplus. A ce stade, on est en mesure de conclure que la riziculture peut réellement être performante et que le paquet technique ne semble pas être la cause des mauvais résultats. L’usage inefficace des techniques serait à l’origine des médiocres résultats et semblerait plus fréquent lorsque le ratio entre la surface cultivée et la main d’œuvre disponible augmente.

Cette agriculture irriguée, que les paysans de la vallée ont adoptée au début des années 1980 pour survivre, constitue un changement profond. A l'inverse des cultures traditionnelles, « extensives » relativement aux facteurs terre, capital et travail, et peu coûteuses en temps pour le chef de famille (Boutillier *et al.*, *op. cit.*), l'agriculture irriguée s'effectue dans de coûteux aménagements (entre 1 000 et 20 000 €/ha), avec une irrigation par pompage. Elle nécessite l'utilisation d'« intrants » (semences, engrais, herbicides) et la mécanisation pour la préparation du sol. Et en plus, elle suppose la présence continue des paysans pendant la culture, notamment en hivernage. L'irrigation a été mise en place pour lever la contrainte de disponibilité en eau qui pèse sur les cultures traditionnelles pluviales ou de décrue. Néanmoins, la variabilité de performance de la riziculture irriguée rappelle celle des cultures traditionnelles.

Figure 13 : Zone étudiée et localisation des aménagements sur la carte géomorphologique et sur une image satellite.



I-3 Du diagnostic à l'action au niveau de la parcelle

Ces travaux me sont utiles ici pour illustrer les liens à mettre en place entre les contraintes qui pèsent sur le rendement de la culture d'une part, et d'autre part la logique du processus de production. Ces travaux ont été réalisés en moyenne vallée du Sénégal, dans le département de Podor (Figure 13) où les autres chercheurs (pédologues, géographes, sociologues...) du programme ORSTOM-ISRA intervenaient.

Le département de Podor est situé à l'aval de la moyenne vallée du Sénégal. En moyenne vallée, le lit majeur du fleuve est assez large. Le Sénégal se sépare en deux chenaux à environ 50 km à l'aval de Kaédi ; le bras secondaire, dénommé le Doué, rejoint le bras principal une dizaine de kilomètres après Podor. La langue de terres entre le Doué au sud et le Sénégal au nord est dénommée l'île à Morphil. Ce territoire, qui était régulièrement inondé lors des crues, offre de nombreuses cuvettes de décrues. Il a fait l'objet d'importants programmes d'aménagement financés par le Fonds Européen de Développement. Ces aménagements ont été très divers puisqu'ils ont concerné l'installation de PIV, à quoi se sont ajoutées la vulgarisation d'un paquet technique à base de culture attelée bovine, la construction de digues pour protéger ces PIV, de bacs et de routes pour permettre l'accès aux villages en période de crue... jusqu'à la construction d'une gare routière et de trottoirs dans la ville de Podor

Sur l'image satellite de la figure 13, les aménagements se distinguent d'autant mieux qu'ils sont exploités ; bon nombre de PIV et PIP étudiés dans les années 1990 semblent aujourd'hui non exploités voire abandonnés. De nouveaux aménagements ont été créés en bordure du diéri à la suite d'une crue exceptionnelle survenue en 2000. Cette crue a provoqué l'inondation des périmètres et des extensions villageoises installés dans les zones inondables du walo. Depuis l'aménagement des PIV après les sécheresses des années 1970-1980, le succès de l'irrigation s'est manifesté par l'extension des villages du walo. A partir des villages d'origine implantés sur les buttes ou des bourrelets de berges, les extensions sont installées en bordure, sur « d'anciennes » zones inondables. Ainsi, avant la mise en place des barrages et la création d'une nouvelle route surélevée, il n'était pas rare de rejoindre Podor en pirogue depuis la route nationale, et l'île à Morphil pouvait être totalement isolée en période de crue.

En 2000, le fleuve a eu une crue importante (de l'ordre de celles qu'il avait pu avoir avant 1970) qui a provoqué des inondations dans la vallée, notamment dans l'île à Morphil. Cette inondation a touché les périmètres et les extensions de villages non protégées par des digues. Ce fut le cas à

Tableau 2 : Caractérisation des parcelles suivies selon l'agriculteur (noté de A à H), l'aménagement (GA de Nianga, 6 PIV et 3 PIP), et l'implantation du riz ('D' pour semis direct, 'R' pour repiquage, '-' pour non observé) en saison chaude et en hivernage 1994 et 1995.

Parcelle	Agriculteur	Aménagement	1994		1995	
			Saison chaude	Hivernage	Saison chaude	Hivernage
1	A	GA	D	D		D
2	A	GA	D	D		D
3	A	GA	D	D		D
4	A	PIV 1	D*			
5	A	PIV 1		D		D
6	B	GA	D	D		D
7	B	PIV 2		D		R
8	C	GA	D	R		D
9	C	PIP 1		R		
10	C	PIP 1		R		
11	D	GA		D		D
12	E	PIV 3	D	D		R
13	E	PIV 3		R		R
14	E	PIV 3	R	D		R
15	E	PIV 4		D		
16	F	PIV 3	D		R	
17	F	PIV 3		R		R
18	F	PIP 2		R		
19	F	PIP 2		D		
20	G	PIP 3	-	-	D*	
21	G	PIP 3	-	-	D*	
22	G	PIP 3	-	-	D*	
23	H	PIV 5	-	-	D	
24	H	PIV 5	-	-	D	
25	H	PIV 6	-	-		R
26	H	PIV 6	-	-		R

N.B. : Les astérisques marquent les parcelles non récoltées (dégâts d'oiseaux ou panne de pompes).
Les agriculteurs G et H ont été ajoutés au dispositif en 1995.

Donaye, village situé sur l'île à Morphil où j'ai travaillé. Les villageois ont tenté de se protéger de la crue en édifiant à la main des digues de terre. Mais elles n'ont pas suffi et tous les villageois ont dû être évacués en pirogue ; seul le quartier le plus ancien du village et l'ancienne mosquée n'ont pas été touchés par les eaux. Après cette inondation, bon nombre de villageois ont refusé de revenir dans leur résidence de la vallée ravagée par la crue. Ils se sont installés dans les anciennes implantations des villages à la frontière entre diéri et walo, et ils ont demandé l'installation de nouveaux PIV à proximité de leur nouvelle résidence.

Dans le cadre du programme pluridisciplinaire ORSTOM-ISRA, le volet agronomique avait pour objectifs (i) de caractériser les systèmes de culture rizicoles, (ii) d'analyser leurs performances (agronomiques et économiques au sens commun) en distinguant les contraintes biophysiques (climat, sol et variété) et les contraintes « humaines » (qualité de mise en œuvre des techniques culturales), et (iii) surtout d'explicitier la ou les logiques du processus de production à l'origine de ces contraintes.

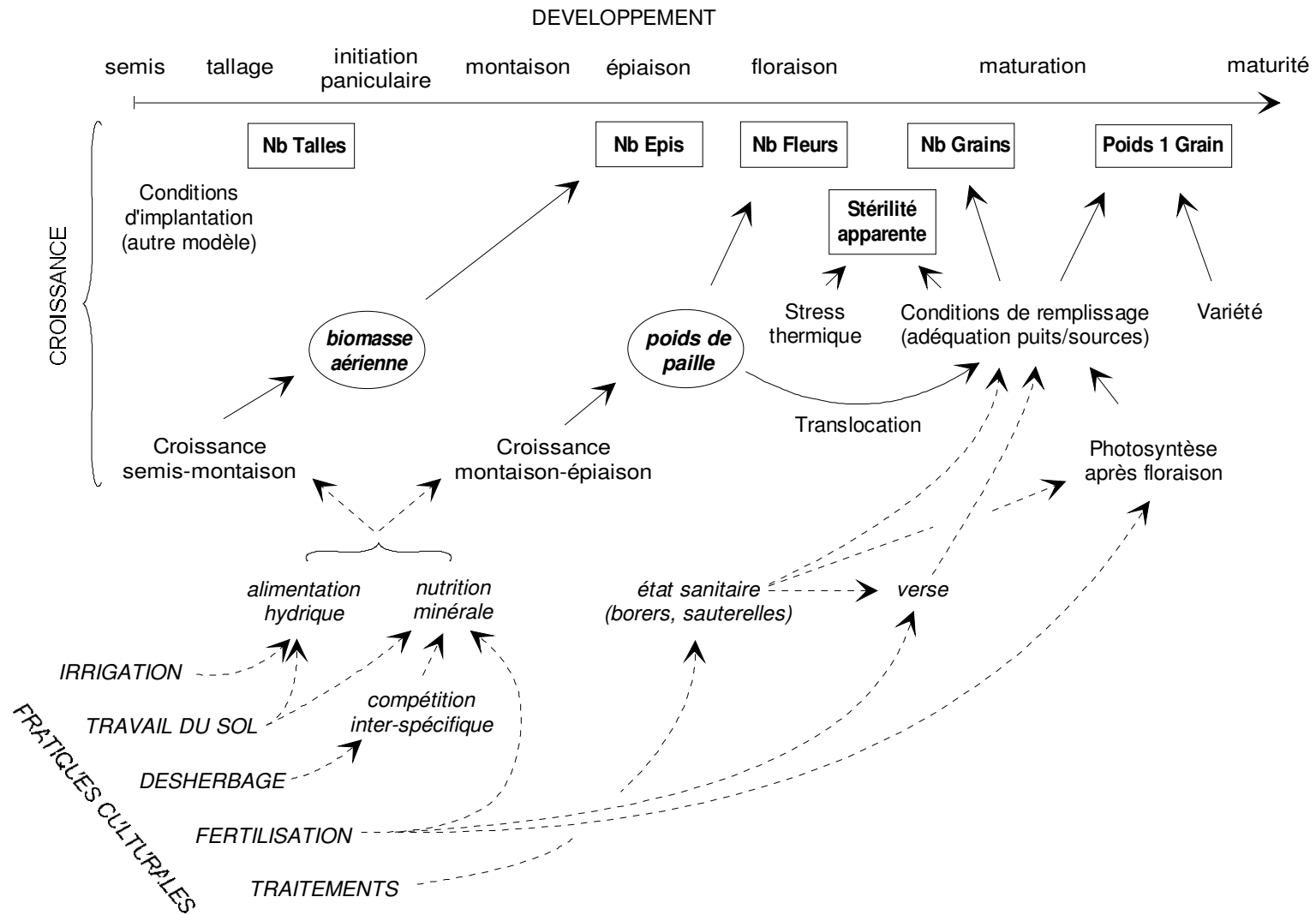
Pour cette étude agronomique, j'ai choisi de distinguer *a priori* les systèmes de culture selon (i) le nombre de cycles de riz réalisés dans l'année, (ii) la saison de culture lorsqu'il n'y a qu'un cycle, et (iii) le mode d'implantation (semis direct ou repiquage) car il influe fortement sur le mode de conduite global du riz. Par ailleurs, les pratiques culturales observées résultent d'un processus de décision influencé *a priori* par l'état de la parcelle (et de la culture qu'elle porte), par le fonctionnement de l'exploitation gérée par l'agriculteur, et de l'aménagement hydro-agricole géré par une ou plusieurs OP.

I-3-1 Dispositif et méthode d'analyse

Un système de culture est mis en œuvre dans une parcelle. Le but étant de caractériser les divers systèmes de cultures existants, j'ai choisi un échantillon de parcelles rizicoles qui permette d'observer une large gamme de variabilité de situations. Compte-tenu de moyens d'observation et de mesure limités, quelques agriculteurs cultivant chacun plusieurs parcelles de riz dans différents types d'aménagement ont été retenus (Tableau 2). Par choix, nos observations se limitaient à des situations pour lesquelles l'agriculture irriguée constituait une activité majeure²⁵.

²⁵ L'échantillon ne permet pas de caractériser les systèmes de riziculture pratiqués par les agro-pasteurs peuls par exemple.

Figure 14 : Schéma d'élaboration du rendement du riz irrigué d'après Durr (1984) et Dingkuhn (1995).



Malgré le nombre très restreint d'agriculteurs choisis, le nombre d'observations à réaliser peut devenir très important. En effet, les relevés de base (pratiques culturales et états de la parcelle) ont été réalisées dans toutes les parcelles rizicoles cultivées par chaque agriculteur ; elles ont été complétées par des mesures de croissance et de composante du rendement du riz dans plusieurs « placettes » (2 à 4) installées dans chaque parcelle. Comprendre la logique à l'échelle de l'exploitation nécessite de connaître aussi les travaux effectués dans les autres parcelles, notamment maraîchères. Comprendre la logique à l'échelle de l'aménagement exige de connaître les activités à cette échelle et les décisions prises par les OP.

Ce suivi a eu lieu pendant deux années consécutives, 1994 et 1995, et durant les deux saisons de culture, saison chaude et hivernage. Les caractéristiques des différentes situations étudiées sont rassemblées dans le tableau 2. Le choix de six agriculteurs en 1994 nous a permis de suivre un assez grand nombre de situations en saison chaude 1994. Mais vu les résultats obtenus, seul un agriculteur a choisi de cultiver en saison chaude 1995. Ceci confirme l'observation faite à l'échelle de l'ensemble de la vallée (Cf. I-2-2) : après les « mauvais » résultats de 1994, les agriculteurs ont été moins nombreux à réitérer la riziculture de saison chaude. Pour compléter les observations, j'ai choisi d'ajouter deux agriculteurs dans le dispositif. Mais trois de ces parcelles ont été abandonnées suite à l'arrêt de l'irrigation dû à une panne du groupe moto-pompe... La mise en place d'un dispositif d'observations et de mesures en « milieu réel » introduit non seulement de nombreuses sources de variabilité, mais se heurte aussi très souvent à ce genre de difficultés.

Les placettes installées dans chaque parcelle permettent d'observer précisément le développement et l'état de la culture (notamment le développement des mauvaises herbes), et de mesurer la densité et la croissance de la culture. Ces mesures (4 répétitions par placette) ont été réalisées à deux dates clés : le début de la montaison, ou « initiation paniculaire » qui marque la fin de la période végétative et l'entrée en phase reproductrice, et la maturité. Ces observations et ces mesures s'appuient sur un « schéma d'élaboration du rendement du riz » (Figure 14). Ce schéma indique les relations entre la croissance de la culture et l'état du milieu qui évolue en fonction du climat et des pratiques culturales. Il propose une décomposition du rendement en « composantes » qui reflètent la croissance du riz à différentes phases. Ici, on mesure la densité de la culture par le nombre de plantes, de talles, d'épis par unité de surface, et la croissance de la culture par la biomasse aérienne et les composantes de rendements (poids moyen d'un grain, nombre de grains et d'épillets). Le modèle RIDEV a été utilisé pour évaluer sur chaque parcelle la stérilité éventuellement due au climat pendant le cycle, ainsi que les décalages entre les calendriers observés, notamment désherbages et apports d'engrais, et les périodes optimales de réalisation des opérations culturales.

Le schéma d'élaboration du rendement du riz a ensuite été utilisé pour estimer les effets de ces décalages.

Pour analyser les résultats de nos mesures et de nos observations, on doit mettre en œuvre des méthodes statistiques qui permettent de distinguer les divers effets biophysiques (année, saison, sol, variété...) sur la croissance du riz, et ceux engendrés par les pratiques des agriculteurs. Ces méthodes sont décrites en détail dans [R-07] en annexe. Le principe consiste à retirer les effets des facteurs (variété, année, saison) pour concentrer l'analyse sur les « résidus », les écarts à la moyenne pour le facteur que l'on veut retirer.

Les caractéristiques physico-chimiques du sol (pH, salinité, capacité d'échange cationique, teneurs en éléments...) peuvent influencer, via des phénomènes de carence ou de toxicité, sur la croissance de la culture. Des analyses ont été pratiquées dans toutes les parcelles suivies. Les teneurs en éléments minéraux, les pH et les conductivités électriques mesurées se trouvaient à l'intérieur des gammes non critiques pour la culture du riz. De même, aucun signe de carence en oligoélément n'a été observé dans les parcelles, et les gammes de pH et de conductivité électrique mesurées ne constituaient pas de contrainte particulière à la croissance du riz (en supposant une irrigation régulière de la culture). J'ai donc fait l'hypothèse que l'état initial du sol ne constituait pas de contrainte majeure.

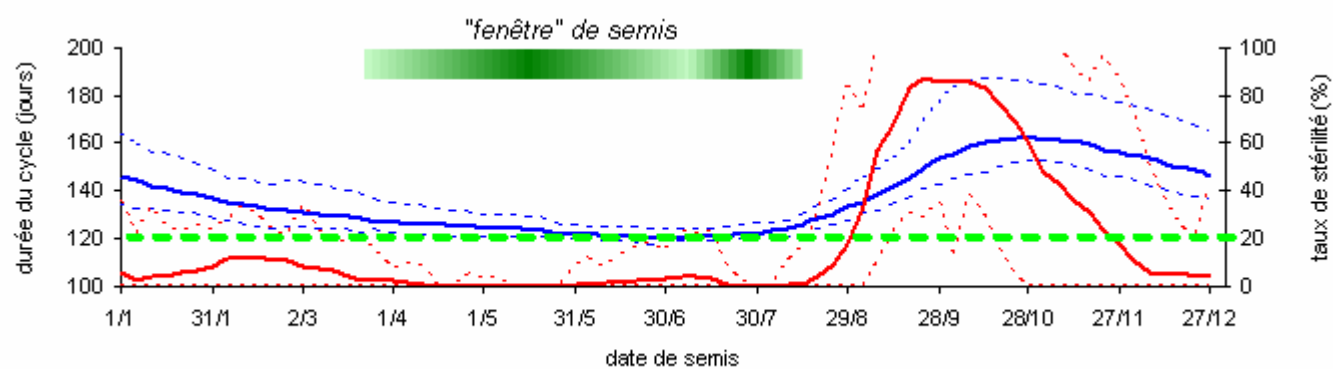
Le climat de l'année – le rayonnement et les températures quotidiennes - détermine le rendement potentiel du riz. De même, la saison de culture, du fait de conditions climatiques assez différentes en saison chaude et en hivernage au début et à la fin du cycle de développement du riz, explique que les résultats varient : la culture de saison chaude se heurte notamment à des conditions défavorables au démarrage de la culture. Enfin, la variété de riz utilisée influe sur les paramètres de croissance de la culture (capacité de tallage, hauteur de paille, nombre d'épillets par panicule et poids moyen d'un grain). J'ai donc évalué successivement l'effet de chacun de ces trois facteurs sur les moyennes (et éventuellement des variances) des variables mesurées, puis j'ai « retiré » leur effet sur les valeurs moyennes, voire les variances, et j'ai poursuivi l'analyse sur les résidus (Cf. [R-07] en annexe).

I-3-2 Les agriculteurs suivent-ils les recommandations techniques ?

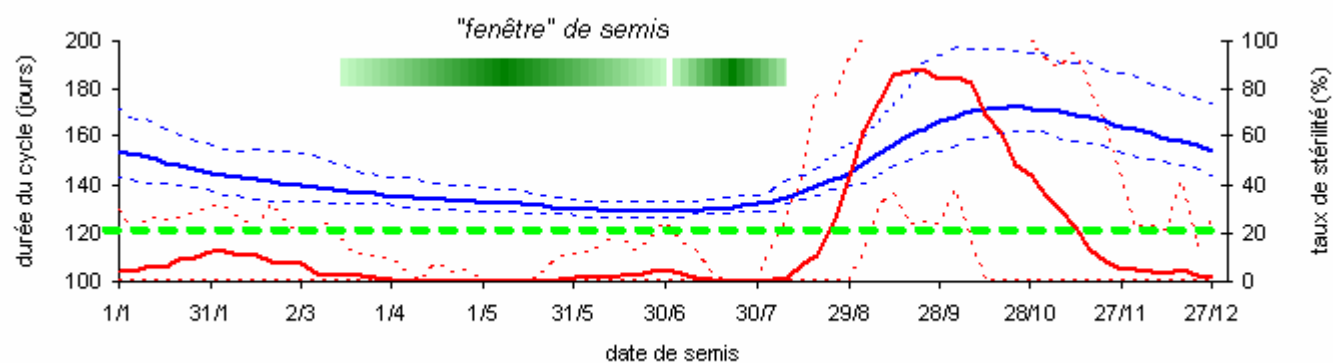
L'échantillon de parcelles a rempli son objectif : observer une large variabilité. Les rendements obtenus dans les parcelles de cet échantillon s'étagent entre 0 et 9,5 t/ha (comme pour l'ensemble de la vallée, Cf. supra), avec une moyenne de 4,1 t/ha en saison chaude 1994, 5,6 t/ha en hivernage 1995, 6,2 t/ha en saison chaude 1995, et 5,9 t/ha en hivernage 1995. Et comme sur l'ensemble de la

Figure 15 : Durée du cycle et taux de stérilité moyens et extrêmes simulés avec RIDEV selon la date de semis pour la variété Sahel 108 (cycle court) dans la région de Podor.

a – Pour une implantation par semis direct.



a – Pour une implantation par repiquage.



vallée, de bien moins nombreuses parcelles ont été cultivées en saison chaude 1995 (la moyenne porte sur seulement 3 parcelles récoltées).

Globalement, les agriculteurs suivent les recommandations sur le plan « quantitatif » : travail du sol mécanisé en deux passages, doses d'engrais et d'herbicide (le sous-dosage est néanmoins fréquent), fractionnement de la fertilisation. Ceci n'est pas étonnant puisque c'est l'OP qui commande la prestation de travail du sol et les quantités d'engrais et d'herbicides qui sont distribuées aux agriculteurs au pro rata des surfaces cultivées, et que le financement des opérations culturales fait l'objet d'un dossier bancaire qui est évalué au plan technique par les techniciens de la SAED.

En revanche, il existe de gros écarts sur le plan « qualitatif » : on observe notamment des décalages assez importants entre le calendrier des opérations culturales et le calendrier jugé optimal vis-à-vis du développement de la culture. Ces décalages peuvent engendrer une moindre efficacité des interventions. Ces décalages concernent principalement le désherbage chimique et les apports d'engrais d'une part, et du repiquage d'autre part. Par ailleurs, les retards au semis peuvent engendrer une implantation en dehors de la période propice et donc un risque de baisse de rendement due à la stérilité des épillets, ou interdire la succession de deux cycles de culture (Figure 15).

Un retard pour le repiquage engendre un stress physiologique plus important. Ce retard est parfois volontaire : les plants plus âgés sont également plus hauts et peuvent alors être repiqués dans une lame d'eau épaisse du fait d'un mauvais nivellement des parcelles²⁶ (ce qui est le cas général, quel que soit l'aménagement dès qu'il est exploité depuis plusieurs années). Les agriculteurs compensent la perte éventuelle de capacité de tallage du riz liée à l'âge avancé des plants, par un nombre plus important de plants de riz repiqués dans chaque touffe. Par ailleurs, lorsque le riz est repiqué, la culture est d'une part moins sensible à un retard d'application d'engrais car les plants ont déjà reçu de l'azote dans la pépinière, et d'autre part le repiquage constitue en lui-même une technique pour maîtriser l'enherbement²⁷.

En cas d'implantation par semis direct, la qualité du travail du sol influe sur la bonne levée des plants²⁸. Les agriculteurs compensent ce défaut - ainsi que l'utilisation de semences non certifiées, moins chères puisque récupérées de la récolte précédente - en augmentant fortement la dose de semences utilisées. Ce mode d'implantation nécessite un contrôle précoce des mauvaises herbes à

²⁶ Un mauvais nivellement engendre un relief inégal, donc une lame d'eau d'épaisseur variable ; une lame d'eau continue freine le développement des mauvaises herbes.

²⁷ Dès son implantation, la culture est à un stade plus avancé que les mauvaises herbes ; la compétition pour la lumière et les éléments minéraux s'oriente donc *a priori* en faveur du riz.

²⁸ Il est recommandé de semer des graines « pré-germées ». Cette recommandation est assez bien suivie, notamment en saison chaude car la température de la lame d'eau n'est pas optimale pour la germination des graines.

l'aide d'un désherbage chimique après évacuation de la lame d'eau (un mauvais nivellement constitue une contrainte forte). Mais les mauvaises conditions de levée du riz ralentissent le développement des plants, ce qui oblige à retarder le désherbage²⁹. Le premier apport d'engrais est effectué après ce désherbage ; un retard sur ce désherbage entraîne donc un retard pour ce premier apport.

Quant au second apport d'engrais, la recommandation « 60 jours après semis » est souvent inadaptée puisque celle-ci ne vaut que pour la culture d'une variété de cycle moyen en hivernage. Pour une variété à cycle court, l'apport doit être d'office plus précoce (environ 8 à 10 jours selon les simulations faites avec RIDEV). En saison chaude, les températures plus faibles en début de culture allongent la durée de la phase végétative (jusque 20 jours environ) ; le second apport doit donc être plus tardif.

L'analyse des composantes de rendement et de l'état de croissance du riz à la fin de la phase végétative a permis de montrer les effets des pratiques [R-07 en annexe]. Les parcelles repiquées ont un état à la fin de la phase végétative (densité et biomasse) moins bon que les parcelles semées directement. Mais à l'inverse de ces dernières, la qualité du désherbage et du premier apport d'engrais sont sans effet significatif. De la même manière, l'enherbement et le second apport d'engrais ont un effet significatif sur la croissance en phase reproductive. Ce diagnostic permet de conclure sur l'importance de la qualité d'installation de la culture. Dans les parcelles repiquées, la densité et la date du repiquage sont les paramètres clés ; dans les parcelles semées directement, réussite du désherbage et apport précoce d'engrais, qui nécessitent un bon nivellement, sont les paramètres clés. En corollaire, les conditions défavorables au démarrage de la culture en saison chaude engendrent un risque plus élevé de mauvaise installation du riz. Ainsi, malgré des rendements potentiels plus élevés qu'en hivernage (Dingkuhn et Sow, 1997), la saison chaude s'avère une période plus risquée pour la riziculture.

La diversité de ces pratiques demeure la cause principale de variabilité des rendements. Ces pratiques changent selon le producteur, et même selon la parcelle chez un même agriculteur. Et finalement, la variabilité de performance et d'efficacité des intrants dans mon échantillon s'est avérée du même ordre qu'à l'échelle de toute la vallée.

²⁹ Un herbicide de post levée (des mauvaises herbes) doit être appliqué lorsque le riz a dépassé le stade trois feuilles pour éviter des dégâts sur la culture.

Figure 16 : Principe du logiciel RIDEV, écran de saisie des paramètres, exemple de résultats

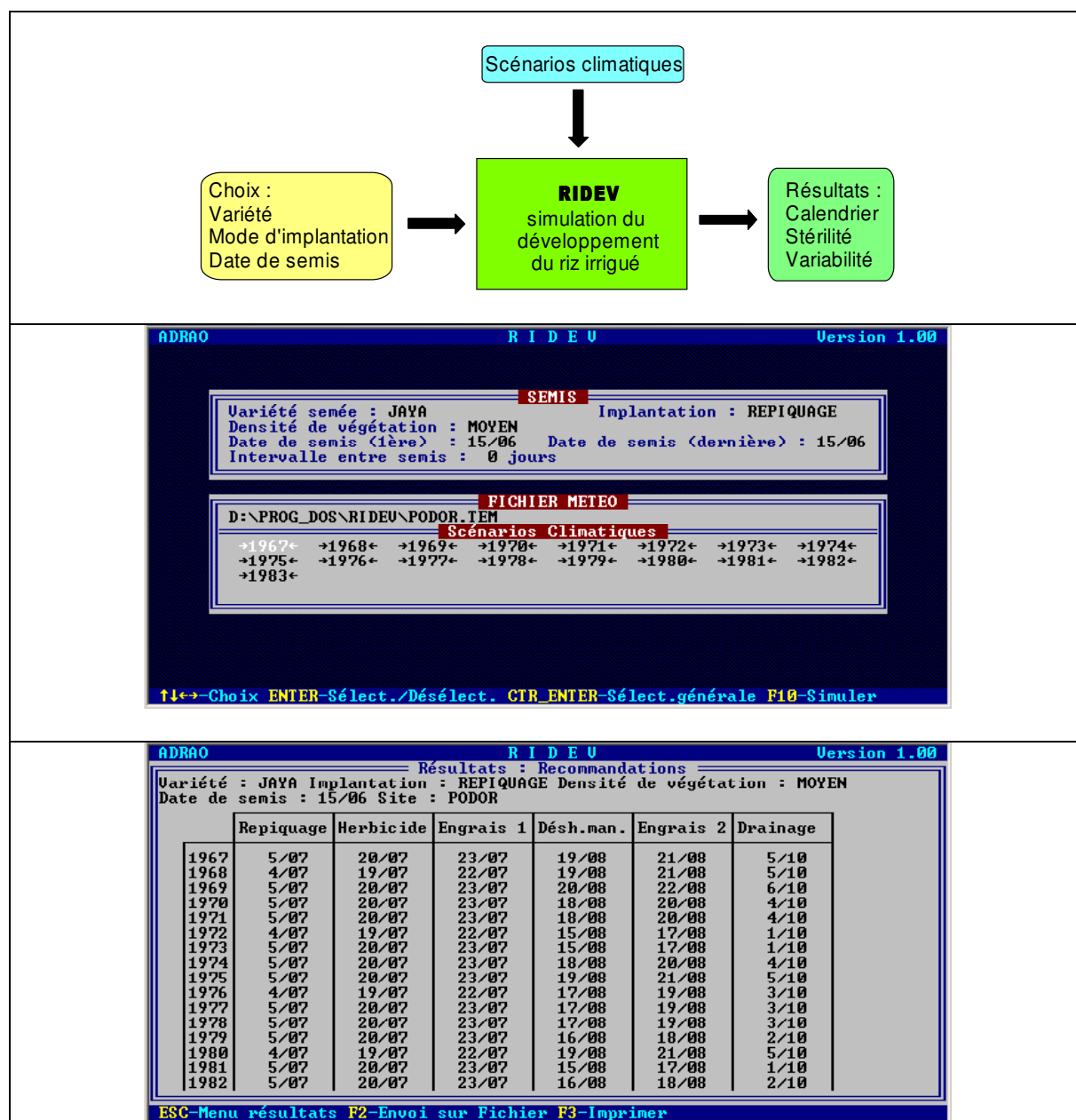


Tableau 3 : Exemples de calendrier prévisionnel fourni par RIDEV pour une culture de saison chaude semée le 15 mars et pour une culture d'hivernage semée le 15 juin (les dates extrêmes des interventions sont notées en italiques).

	Culture de saison chaude	Culture d'hivernage
Variété	Aïwu	Jaya
Mode d'implantation	Repiquage	Repiquage
Date de semis	15/03	15/06
Repiquage	6/04 (3/04 – 14/04)	4/07 (4/07 – 5/07)
Désherbage post-levée	23/04 (18/04 – 6/05)	19/07 (19/07 – 20/07)
1 ^{er} apport d'engrais	26/04 (21/04 – 9/05)	22/07 (22/07 – 23/07)
2 nd apport d'engrais	14/05 (9/05 – 24/05)	19/08 (15/08 – 22/08)
Drainage avant récolte	28/06 (22/06 – 8/07)	3/10 (29/09 – 6/10)
Récolte	13/07 (7/07 – 23/07)	18/10 (14/10 – 21/10)

I-3-3 Améliorer le calendrier des interventions avec RIDEV

Une des contraintes majeures à l'obtention d'un rendement élevé est le mauvais calage du calendrier des interventions par rapport au développement de la culture : retard de repiquage, retard du désherbage et des apports d'engrais, récolte à sur-maturité. Le logiciel RIDEV [L-03] a été conçu sur la base d'un modèle agro-physiologique de développement du riz irrigué au Sahel (Dingkuhn et Miezan, 1994). Il permet de simuler le développement du riz sur la base de la variété, du mode d'implantation et de la date de semis choisis, en fonction des températures journalière (minimum et maximum) enregistrées (Figure 16). A partir du développement simulé, un calendrier cultural optimal de conduite du riz est proposé. Les dates d'intervention sont basées sur les recommandations de l'ADRAO (WARDA et SAED, 2001).

Il est possible d'utiliser ce logiciel pour planifier, à l'échelle de la parcelle, le calendrier cultural de la prochaine campagne rizicole. Pour ce faire, on simule le développement de la culture (pour la variété, le mode d'implantation et la date de semis prévus) avec un nombre important de « scénarios climatiques » matérialisés par les différentes années enregistrées dans une station météorologique proche. On fait donc l'hypothèse que le climat à venir sera proche de celui enregistré par le passé. RIDEV calcule alors les dates optimales d'intervention pour chaque année, ainsi que les dates moyennes et extrêmes pour chaque intervention. Ces dates moyennes et extrêmes permettent de planifier le calendrier cultural de la prochaine campagne.

Le tableau 3 fournit deux exemples de « calendrier prévisionnel » proposé par RIDEV. Un exemple correspond à une culture d'hivernage. On note que l'écart entre dates extrêmes est d'une journée en début de cycle et qu'il atteint sept jours en fin de cycle. Ce faible écart est dû au fait que les températures en hivernage sont optimales pour le développement du riz et qu'il y a peu de variabilité interannuelle des températures à cette saison. En hivernage, l'agriculteur qui respecte le calendrier prévisionnel moyen interviendra aux périodes optimales vis-à-vis de sa culture. L'autre exemple correspond à une culture de saison chaude. L'écart entre dates extrêmes est plus important : il passe de 11 jours en début de cycle à 16 jours en fin de cycle. Ceci est dû aux faibles températures aux mois de mars et avril, qui freinent le développement, et à la variabilité interannuelle. Pour intervenir aux périodes optimales en saison chaude, l'agriculteur devra observer le développement du riz pour mesurer le décalage avec le calendrier prévisionnel moyen, et décaler d'autant ses interventions d'autant. Ainsi, non seulement la saison chaude est plus risquée mais elle nécessite plus de technicité de la part des producteurs.

La construction d'un calendrier prévisionnel à l'échelle de la parcelle avec RIDEV a été mise en œuvre, pour la riziculture d'hivernage, par une équipe de l'ADRAO dans des périmètres privés de la rive mauritanienne où le diagnostic sur la riziculture était quasi identique à celui fait sur la rive sénégalaise (Wopereis *et al.*, 2001). Le rendement moyen a été ainsi amélioré de 2 t/ha par rapport aux parcelles « témoins » sans augmentation du coût de production. Ceci démontre d'une part l'intérêt de RIDEV pour l'aide à la décision individuelle, et d'autre part les possibilités d'une réelle amélioration des performances de la riziculture. Néanmoins, pour la conduite de la riziculture en saison chaude, les calendriers prévisionnels que fournit RIDEV sont peu satisfaisants. Proposer un calendrier cultural pour le riz en saison chaude nécessiterait par exemple de changer la forme des recommandations pour les dates des interventions. Une prescription telle que « premier et second apports d'engrais azotés 30 et 60 jours après semis » néglige que les chiffres 30 et 60 dépendent de la variété, de la saison et du site de culture. Elle n'est donc pas pertinente en saison chaude. Il faudrait plutôt conseiller « premier apport d'engrais lorsque le riz atteint quatre feuilles et second apport à l'initiation paniculaire ». Cette prescription resterait pertinente quels que soient la saison, la variété et le site de culture. Mais elle supposerait aussi de la part du prescripteur qu'il considère l'agriculteur comme un « expert », c'est-à-dire qu'il sache observer sa culture et reconnaître les divers stades de son développement.

La réponse apportée avec RIDEV pour améliorer les performances ne me suffisait pas. Parce que d'une part, elle se limite à un conseil individuel alors que la grande majorité des aménagements met en œuvre une organisation et une gestion collective ; les agriculteurs ne sont donc généralement pas autonomes. Et d'autre part, parce qu'elle apparaît tout aussi « normative » que le conseil agricole classique puisque cette réponse consiste toujours à prescrire l'usage d'un certain paquet technique avec un calendrier optimal vis-à-vis de la culture, sans se soucier des contraintes et des stratégies des producteurs. Il me semblait important de cerner les causes du non respect des recommandations avant de proposer des « remèdes ».

I-3-4 Déterminants des pratiques et organisation des décisions

Le choix du mode d'implantation, semis direct ou repiquage, permet d'illustrer les différents aspects d'un processus de décision [O-07 en annexe]. En effet, les agriculteurs connaissent l'intérêt du repiquage pour lever en partie les contraintes qu'ils désignent eux-mêmes comme majeures pour

Figure 17 : Principaux calendriers cultureux

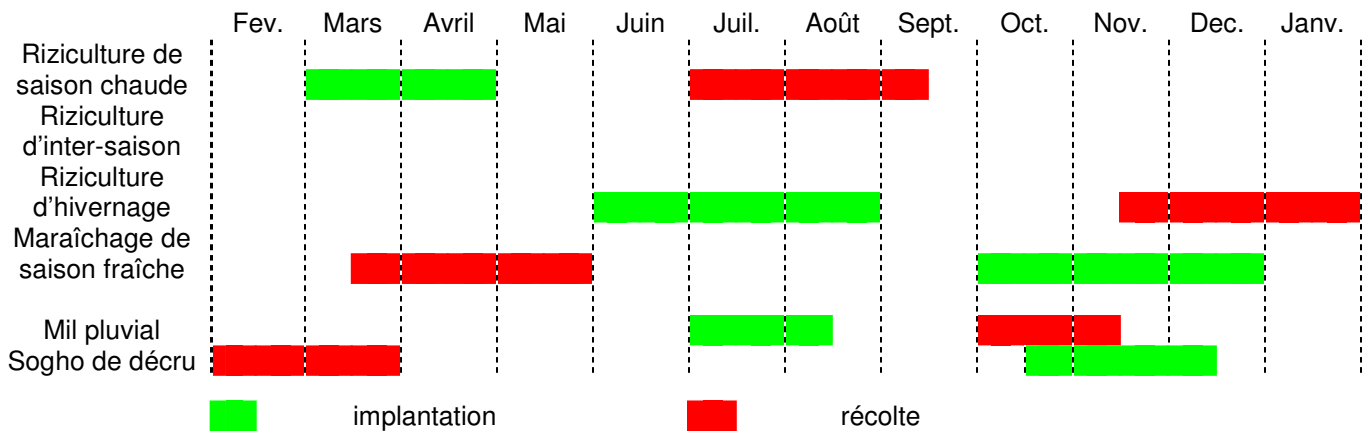
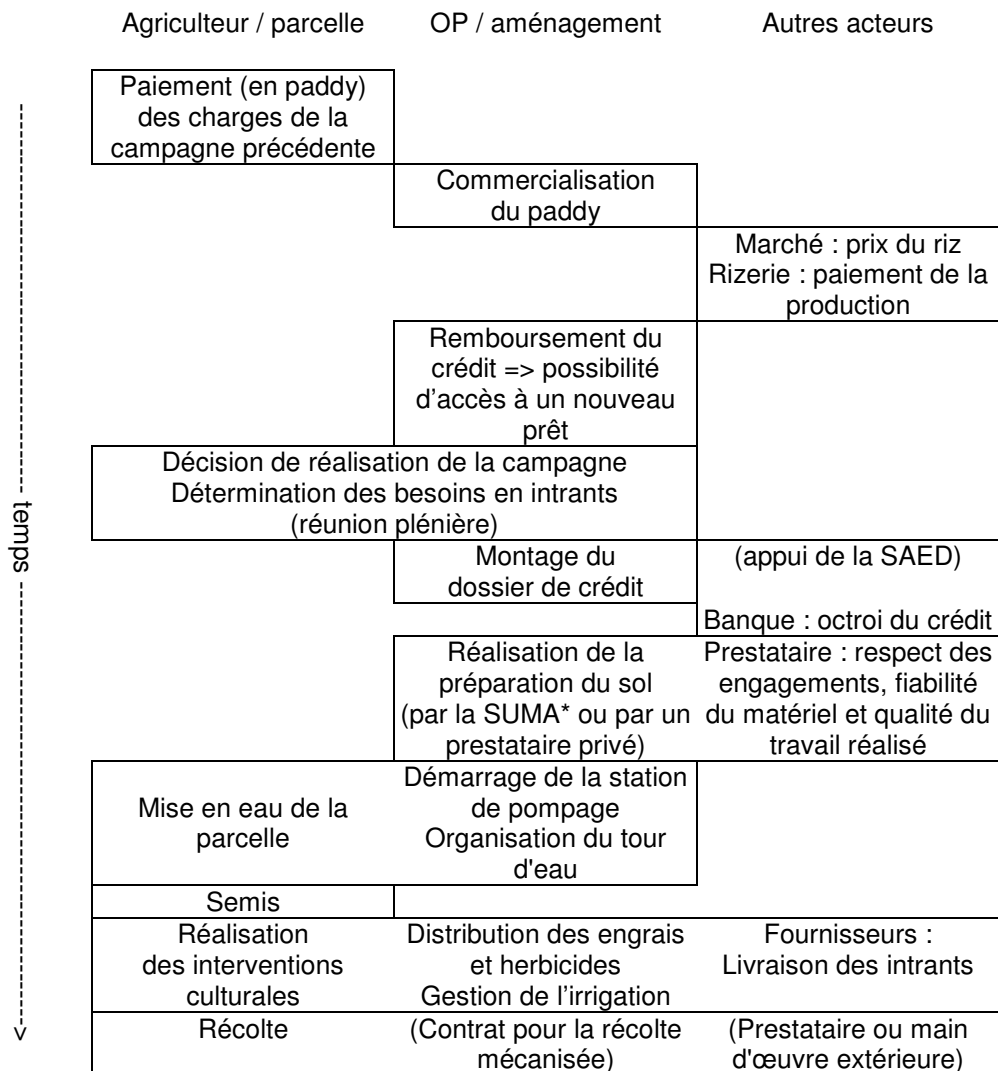


Figure 18 : Déroulement d'une campagne rizicole dans un périmètre irrigué



(* Section d'Utilisation du Matériel Agricole : OP au sein d'un grand aménagement chargée de gérer les matériels agricoles et de réaliser les travaux)

obtenir un rendement élevé (Bélières *et al.*, 1994) : le défaut de planage³⁰ et le développement des mauvaises herbes. Néanmoins, ils choisissent en majorité le semis direct.

Sur le plan du travail nécessaire, les deux modes d'implantation sont très différents. Le semis direct nécessite trois à quatre jours de travail pour une parcelle d'1 ha (pré-germination des semences et mise en eau de la parcelle comprises). La taille d'une pépinière est environ le dixième de celle de la parcelle à repiquer. Le semis d'une pépinière s'effectue de la même manière qu'un semis direct ; l'opération dure moins d'une demi journée. Le repiquage doit être effectué 3 à 4 semaines après le semis de la pépinière afin d'avoir des plants au bon stade. C'est un travail important, qui nécessite une équipe d'une dizaine de personnes pendant au moins tout une journée.

Non seulement la quantité de travail nécessaire est différente, mais surtout l'organisation des travaux est tout autre. Dans le premier cas, le semis, opération individuelle, suit la préparation du sol et la mise en eau de la parcelle, et ces deux opérations relèvent d'actions collectives au niveau de l'aménagement. Dans le second cas, le semis de la pépinière, opération qui peut être réalisée individuellement (sous contrainte de démarrage de la station de pompage de l'aménagement), détermine un « rendez-vous » pour le repiquage de la parcelle. Pour réaliser le repiquage, il faut que la préparation du sol et la mise en eau de la parcelle soient faites.

Comme une majorité de producteurs de la délégation de Podor qui disposent de plus de 0,5 ha irrigué, les agriculteurs de note échantillon exploitent plusieurs parcelles dans différents périmètres. Ils cultivent certaines parcelles en saison chaude et/ou en hivernage pour le riz, et d'autres en saison fraîche pour le maraîchage (essentiellement tomate et oignon). Ces trois calendriers culturels se chevauchent (Figure 17). Aux calendriers des cultures irriguées s'ajoutent ceux des cultures traditionnelles : si l'hivernage est pluvieux, les agriculteurs sèment du mil et du niébé dans le *diéri*, et si la crue du fleuve le permet, ils mettent en place du sorgho dans les cuvettes du *walo* lors de la décrue. Les périodes d'implantation des cultures (riz, tomate, oignon) correspondent aussi aux périodes de récolte d'autres cultures, irriguées ou non. S'il y a concurrence pour le travail, la *priorité* est donnée aux récoltes puisqu'elles satisfont immédiatement aux besoins alimentaires de la famille ou procurent un revenu monétaire. Et lorsque les conditions hydro-climatiques sont favorables, la mise en place des cultures traditionnelles devient prioritaire. Ces priorités contribuent non seulement au choix d'une implantation simple et rapide, comme le semis direct pour le riz, mais aussi à la médiocre qualité des travaux et aux retards, notamment pour le repiquage.

³⁰ Le planage désigne le nivellement de la parcelle ; pour faciliter la gestion de l'eau, parcelle doit être parfaitement nivelée et présenter une pente régulière de 2‰ entre l'entrée et la sortie de l'eau.

Du fait de l'organisation différente des deux modes d'implantation, il est peu envisageable à l'échelle de l'aménagement de laisser chaque agriculteur choisir individuellement entre semis direct et repiquage. Le mode d'implantation est donc un choix collectif. Pour une implantation par repiquage, il est préférable que l'aménagement dispose d'un secteur dédié aux pépinières, ce qui n'est pas le cas général. Les agriculteurs installent alors individuellement leur pépinière dans leur parcelle, ce qui gêne les travaux à réaliser. Ou bien ils réalisent des pépinières collectives, ce qui peut poser problème par la suite du fait d'un repiquage étalé à cause du tour d'eau : si l'âge des plants est adéquat pour les premières parcelles repiquées, il ne l'est plus du tout pour les dernières (Cf. infra).

L'implantation de la culture est très fortement influencée par l'organisation des décisions et des actions au cours d'une campagne (Figure 18). La décision de réaliser une campagne de culture est prise collectivement ; le choix est fait généralement par son président, et les paysans réunis en assemblée générale entérinent cette décision (Tarrière, 1993). La situation financière de l'OP conditionne fortement cette décision, car la réalisation d'une campagne suppose de financer les avances aux cultures : préparation du sol, gas-oil pour l'irrigation, engrais et herbicide. Cette capacité de financement dépend le plus souvent de l'octroi d'un crédit bancaire, lequel est conditionné par le remboursement de l'emprunt précédent. Après la récolte du cycle précédent, les agriculteurs remboursent à leur OP les charges de culture ; le paiement s'effectue en paddy. C'est la commercialisation de ce paddy qui permet à l'OP de rembourser l'emprunt bancaire. Mais le remboursement des charges par les agriculteurs n'est pas immédiat. Il dure plusieurs semaines du fait de l'étalement de la récolte, et des difficultés qu'ont les agriculteurs à rembourser lorsque leur rendement est faible. Les opérateurs privés qui achètent le paddy se chargent également d'évacuer la production et font appel à des transporteurs. L'enclavement de certains villages, l'indisponibilité des camions, ou le paiement différé sont des déboires fréquents. Il n'est donc pas rare de voir le démarrage d'une campagne fortement retardé. Dans ces conditions, le semis direct apparaît plus adapté.

Chacune des relations entre les différentes catégories d'acteurs est entachée d'incertitude et souffre de dysfonctionnement. L'ensemble du processus pèse fortement sur les décisions individuelles et apparaît totalement non maîtrisable. L'horizon de prévision d'un agriculteur est faible : sur le grand périmètre de Nianga par exemple, Barreteau (1994) a montré que cet horizon ne dépassait pas une semaine, alors que le tour d'eau est de dix jours... Ceci gêne, voire interdit, toute programmation des actions pour la conduite des cultures. Il en découle une conduite "par défaut" de la riziculture (qui n'est pas sans rappeler l'opportunisme des semis de mil et sorgho face aux aléas hydro-climatiques) : l'agriculteur sème lorsque c'est son tour d'avoir l'eau et que le travail du sol est

réalisé, et plus tard, il épand l'herbicide ou les engrais lorsque les produits sont livrés. Dès lors, l'agriculteur ne peut construire un « modèle d'action » pour la conduite de la riziculture (et des autres cultures irriguées). Il peut néanmoins développer des stratégies pour « gérer » les incertitudes qui pèsent sur le processus. Lorsque la surface irriguée est très faible, l'exploitation des parcelles reste une activité marginale (Santoir, 1994). Lorsque la surface irriguée est importante, les parcelles sont distribuées dans plusieurs aménagements ; l'agriculteur gagne ainsi de l'autonomie vis-à-vis de chaque OP. Un même agriculteur peut en conséquence s'avérer « bon » sur un périmètre et « mauvais » sur un autre. Dans tous les cas, l'OP est seule responsable auprès de la banque ; l'absence de remboursement en paddy expose l'agriculteur à un risque « social » uniquement. Et lorsque l'OP est endettée, elle peut disparaître, puis réapparaître sur un autre aménagement (Wakerman, 1994). Ou encore, le bailleur de fonds qui est à l'origine de l'aménagement peut renflouer les OP qui exploitent ce périmètre afin de conserver une « vitrine » de son action pour le développement de la région. Et lorsqu'une majorité d'OP est endettée, l'Etat peut décréter un « moratoire » qui efface les impayés à la Caisse Nationale de Crédit Agricole du Sénégal (CNCAS).

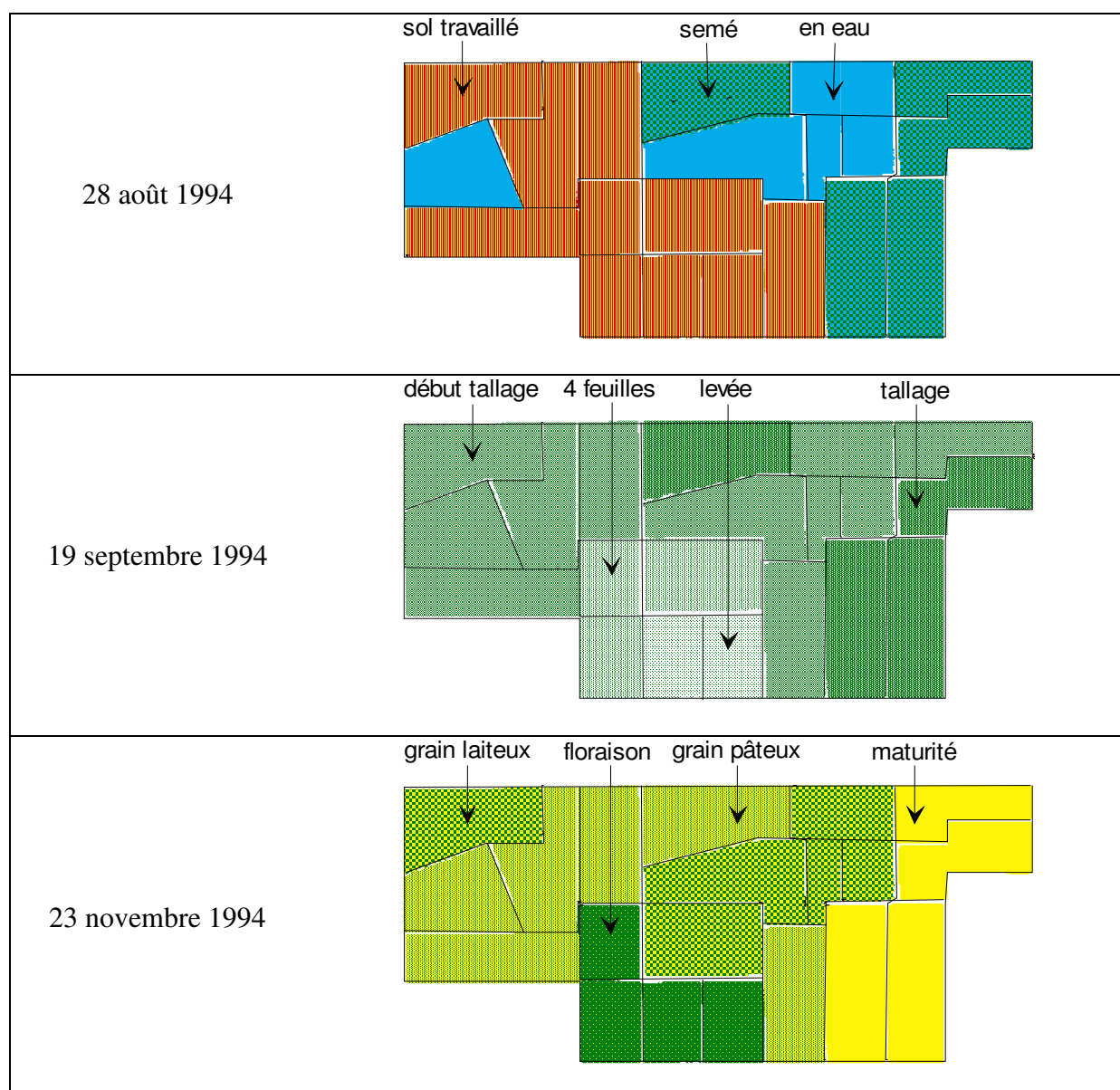
L'endettement dû à l'agriculture irriguée et qui concerne une forte proportion d'agriculteurs se traduit par l'absence de mise en culture des périmètres, voire leur abandon. Cette absence de mise en culture engendre alors une remontée des sels par évaporation et une salinisation des sols (Wopereis *et al.*, 1998). La salinisation des sols n'est donc plus une cause mais une conséquence de l'abandon des périmètres.

Néanmoins, cet endettement « généralisé » n'apparaît pas dans les villages de la vallée qui maintiennent et développent des activités socio-économiques, visibles notamment par les diverses associations et groupements (Tarrière, 1995), les marchés hebdomadaires (Grijol et Decoudrais, 1996) ou l'édification de mosquées. Ces transformations liées au développement de l'agriculture irriguée se notent également dans l'importance donnée aux lieux de résidence. La résidence du *walo*, proche des périmètres, est souvent devenue l'implantation principale du village. La résidence du *diéri* conserve son intérêt en hivernage pour les troupeaux confiés aux pasteurs peuls. En l'absence de crue du fleuve, la résidence en bordure de *walo* perd son intérêt en dehors de sa proximité de la route nationale qui lie St-Louis à toutes les grandes villes du fleuve.

L'installation des aménagements dans la vallée aura donc au moins permis le développement d'une agriculture irriguée à « vocation sociale » (IPTRID, 2004). Mais ce développement a un coût. A la fin des années 1990, les pertes de la CNCAS étaient estimées à environ 10 million \$US. A ces pertes, il conviendrait d'ajouter le coût de la réhabilitation récurrente des grands aménagements,

liée notamment à la fixation d'une redevance trop faible, et celui de la création de nouveaux périmètres pour compenser l'abandon de PIV dégradés.

Figure 19 : Etats des parcelles et stade du riz au sein d'une maille hydraulique du grand périmètre de Nianga à trois dates au cours de la campagne d'hivernage 1994.



I-4 Du diagnostic à l'action au niveau de l'aménagement

L'organisation collective de la production - préparation du sol, achat groupé des engrais et herbicides puis distribution au *pro rata* de la surface cultivée, tour d'eau pour l'irrigation) engendre *a priori* l'uniformité. On pourrait donc s'attendre à observer une homogénéité entre parcelles au sein d'un même aménagement.

Dans le cadre de mes suivis en 1994 et 1995, j'ai observé l'état de toutes les parcelles de la maille hydraulique autour de celle que je suivais (Figure 19). Dans ce cas précis, la règle de tour d'eau imposait un démarrage par les parcelles de droite, du haut vers le bas du schéma, puis un avancement vers les parcelles de gauche. On devrait donc observer des parcelles semées dans la partie droite, des parcelles en eau dans la partie centrale, et des parcelles où le sol est travaillé dans la partie gauche. Tel n'est pas le cas : les agriculteurs réaménagent le « tour » entre parcelles selon leur disponibilité. Barretteau (1994) a fait la même observation, complétée par celle-ci, qui confirme la précédente : le tour d'eau n'est respecté que si c'est un aigüadier qui est chargé de l'irrigation des parcelles. A partir de ce décalage initial, le reste suit ; finalement, cette maille hydraulique d'une dizaine d'hectares seulement ressemble à un damier désordonné. L'hypothèse d'homogénéité est donc sensiblement affaiblie.

I-4-1 Quelle est la variabilité au sein d'un périmètre irrigué ?

Je me réfère ici aux travaux auxquels j'ai participé dans un périmètre irrigué villageois installé sur la rive mauritanienne [C-15, R-11 en annexe]. Ces travaux ont été effectués dans le cadre du Pôle de recherche CORAF (Conseil Ouest et Centre Africain pour la Recherche et le Développement Agricole) sur les Systèmes Irrigués sahéliens (PSI-CORAF).

Ce périmètre irrigué villageois, d'une superficie de 27,5 ha, regroupe 119 parcelles exploitées par 29 agriculteurs qui cultivent du riz uniquement en hivernage. La campagne rizicole est organisée de la même façon que sur la rive sénégalaise. Une OP a en charge la gestion de la station de pompage (l'OP emploie un agriculteur qui fait office de « pompiste ») et l'irrigation (les agriculteurs font, à tour de rôle, office d'aigüadier). Elle finance à crédit la campagne (achat de gas-oil, engrais, herbicides et éventuellement semences certifiées, paiement des prestataires pour le travail du sol et éventuellement la récolte), distribue les fournitures aux agriculteurs au *pro rata* de la surface qu'ils

Figure 20 : Calendriers culturels réalisés et optimal à l'échelle du périmètre pour l'hivernage 1998.

Le calendrier réalisé est indiqué en gris foncé ; le calendrier optimal est indiqué en gris clair. L'infestation par les adventices à l'initiation paniculaire, les variétés et semences utilisées, le type et les doses d'herbicide et d'engrais sont également indiqués.

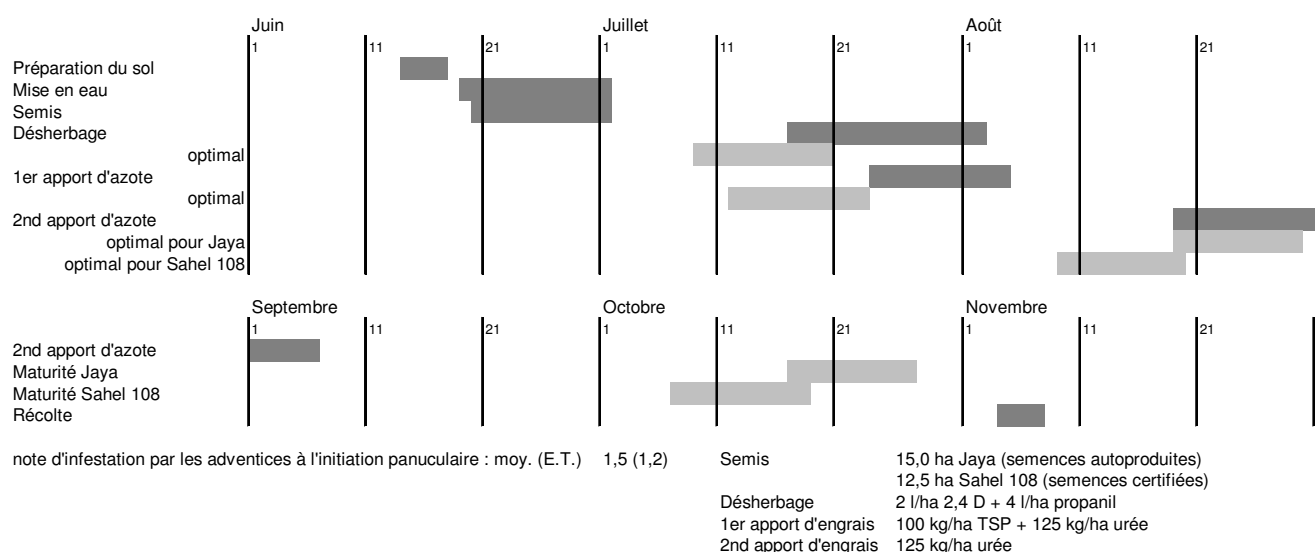


Figure 21 : Distribution des rendements selon le nombre d'irrigation et distribution du nombre d'irrigations selon la variété observées en hivernage 1994 dans le périmètre irrigué de Nakhlet

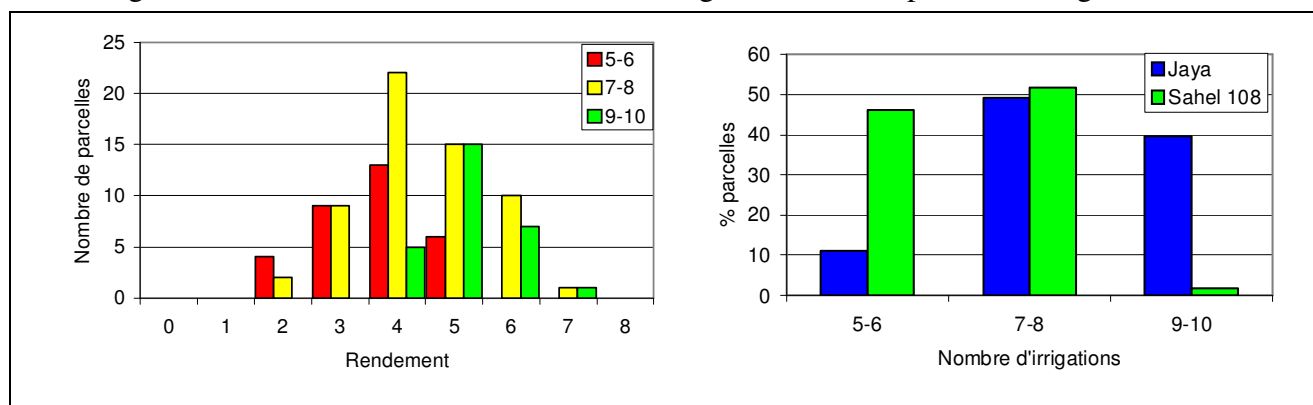


Tableau 4 : Rendements obtenus en 1998 dans les parcelles semées avec Jaya et Sahel 108 et apports d'eau estimés en fonction du nombre d'irrigation après la mise en eau

Nombre d'irrigations après mise en eau	4	5	6	7	8	9
Apport d'eau (mm)	528	602	666	720	774	828
Nombre de parcelles	11	21	26	33	14	14
Rendement (t/ha)	4.07	4.03	4.50	5.04	5.37	5.92
moy. (ET)	(0.24)	(0.18)	(0.21)	(0.14)	(0.17)	(0.18)
Nombre de parcelles semées avec Jaya	1	6	11	20	13	14
Rendement (t/ha)		5.47 ***			5.41 ***	
moy. (ET)		(0.90)			(0.79)	
Nombre de parcelles semées avec Sahel 108	10	15	15	13	1	0
Rendement (t/ha)		3.79 ***			4.48 ***	
moy. (ET)		(0.47)			(0.55)	

(*** : comparaison entre variétés avec test de Student et $p < 0.001$)

cultivent), et récupère ces avances sous forme de paddy à la récolte afin de rembourser son emprunt bancaire.

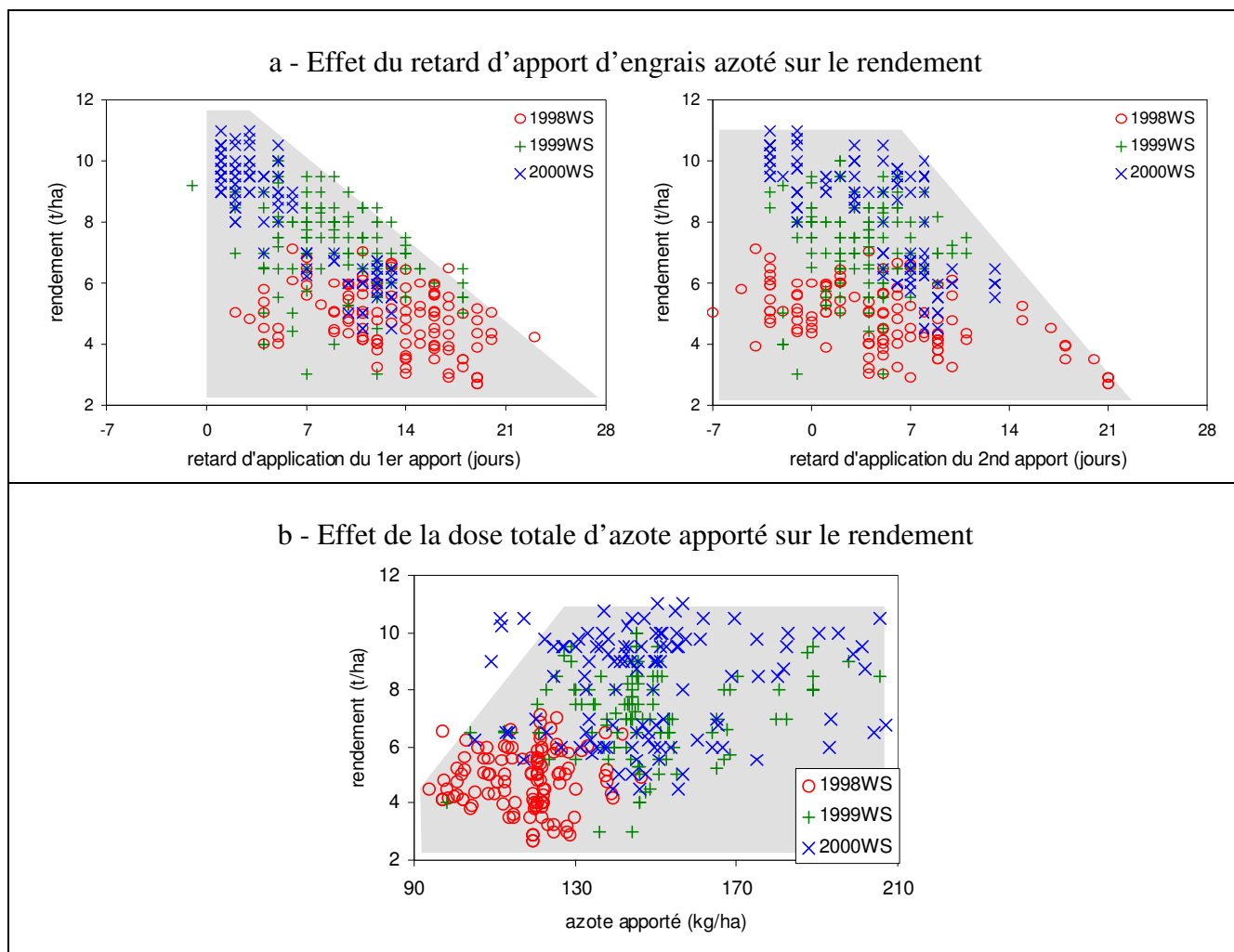
Un diagnostic a été effectué sur le déroulement de l'hivernage et les rendements obtenus en hivernage 1998. Les 119 parcelles ont été suivies en particulier pour les dates des irrigations et des interventions culturales, des semences utilisées, des doses d'herbicide et d'engrais apportées. Ce suivi des pratiques a été complété par des observations sur l'envahissement par les adventices et par une mesure du rendement sur une placette de 25 m². Deux autres suivis ont été réalisés à l'échelle de l'OP : l'un concernait l'irrigation (fonctionnement de la station de pompage, volumes d'eau utilisés, mesure des hauteurs de pluies) et l'autre, les aspects comptables (relevé des factures et des salaires, quantité et prix de vente du paddy).

Des modèles ont été utilisés pour effectuer ce diagnostic : un modèle de l'évapotranspiration du riz pour faire un bilan sur l'irrigation, un modèle pour évaluer le rendement potentiel du riz en fonction du rayonnement net et des températures, et le modèle RIDEV pour reproduire le développement de la culture dans chaque parcelle et évaluer les décalages des interventions culturales.

En hivernage 1998, les agriculteurs ont utilisé des semences de deux variétés et de provenances différentes : la variété Jaya provenant de la récolte précédente dans 65 parcelles, et la nouvelle variété Sahel 108, préconisée par les conseillers agricoles de la SONADER (l'équivalent en Mauritanie de la SAED au Sénégal), dans les 54 autres. Le riz a été semé du 20 juin au 1^{er} juillet, et récolté manuellement du 4 au 8 novembre, 2 à 3 semaines après la maturité physiologique du riz (Figure 20). Alors que les rendements potentiels s'élevaient à 8,2 t/ha pour la variété Jaya et 8,7 t/ha pour la variété Sahel 108, les rendements des parcelles s'échelonnaient entre 2,7 et 7,1 t/ha, avec une moyenne de 4,8 t/ha. Le coût total de production équivalait à 1,4 t/ha de paddy. On retrouve donc, au sein d'un même périmètre irrigué, une variabilité de l'ordre de celle observée à l'échelle de l'ensemble de la vallée. Par ailleurs, les agriculteurs s'interrogeaient sur la « nouvelle variété » Sahel 108 dont les rendements leur semblaient plus faibles qu'avec la variété Jaya.

Les premières observations concernent l'irrigation, dont la fréquence est très variable entre parcelles. En effet, les parcelles sont irriguées entre 5 et 10 fois, soit un intervalle entre 2 irrigations variant entre 10 et 20 jours. L'impact du nombre d'irrigations est net (Figure 21) et hautement significatif (Tableau 4). Les parcelles situées en tête du réseau ont été irriguées plus souvent que celles situées en queue. Cette différence était due aux règles de tour d'eau : (i) le tour d'eau commençait par les parcelles situées en tête et se poursuivait vers l'aval, et (ii) le tour d'eau était « réinitialisé » en cas de pluie. L'agriculteur-aiguadier n'informait pas systématiquement l'« aiguadier suivant » des parcelles qu'il avait irriguées dans sa journée. Ce défaut de transmission

Figure 22 : Effet des dates et doses des apports d'engrais azoté sur le rendement à Nakhlet en hivernages 1998, 1999 et 2000.



d'information entre agriculteurs-aiguadiers était à l'origine de la seconde règle : comment faire autrement en cas de pluie quand on ne sait pas quelles ont été les dernières parcelles irriguées ? Ce défaut explique aussi la forte variabilité de fréquence d'irrigation.

Les parcelles semées avec la variété Sahel 108 étaient plutôt situées à l'aval, les agriculteurs ayant *a priori* une préférence pour la variété Jaya qu'ils avaient l'habitude de cultiver. Une fréquence d'irrigation plus faible explique en partie les moins bons rendements obtenus avec cette variété, plus sensible à la salinité. Néanmoins, dans les parcelles irriguées 7 ou 8 fois, la différence entre les deux variétés restait significative.

L'analyse du calendrier des interventions a montré l'existence d'un retard pour le second apport d'engrais plus important dans les parcelles implantées en Sahel 108 (Figure 20). Ce retard est dû à des recommandations fondées sur le développement de variété de riz à cycle moyen, qui sont inappropriées pour cette variété précoce. Malgré une distribution des engrais aux agriculteurs « au pro rata de la surface » sur la base de doses voisines des recommandations, les doses d'engrais effectivement apportées étaient très variables : la quantité totale d'azote apportée variait en effet entre 90 et 150 kg/ha selon la parcelle. Or l'impact d'un retard d'apport d'engrais se traduit par une baisse de rendement (Figure 22-a), alors qu'une dose totale d'azote apportée supérieure à 120-130 kg/ha ne semble pas avoir d'effet sur le rendement (Figure 22-b).

Les observations réalisées indiquaient une mauvaise utilisation des herbicides (sous-dosage des herbicides et conditions d'application inadéquates) se traduisant par une forte densité d'adventices à l'initiation paniculaire dans un grand nombre de parcelles.

On peut ainsi conclure que l'uniformité des techniques et l'existence d'un tour d'eau équitable entre parcelles, qui auraient permis une certaine homogénéité au sein d'un aménagement, sont purement théoriques. En pratique, l'irrigation des parcelles, les calendriers culturaux et les doses d'intrants sont très variables d'une parcelle à l'autre. Ceci explique pourquoi la distribution de rendements au sein du même périmètre ressemble encore (Cf. I-3) à s'y méprendre à celle qu'on trouve à l'échelle de l'ensemble de la vallée.

I-4-2 Planifier la campagne sur le périmètre pour améliorer les performances

Mes suivis du fonctionnement des OP m'ont conduit à conclure à une constante : l'absence de prévision. Par exemple, lorsque le président de l'OP et les producteurs décident en assemblée

Figure 23 : Ecran de saisie du logiciel CalCul
(mode d'implantation, pré-irrigation, délais de ressuyage, durées des chantiers collectifs, date de démarrage des semis, station météorologique)

The screenshot shows a DOS-style window titled "D:\Prog_DOS\calcul\DISQUE~1\CALCUL.EXE". The interface has a blue header bar with "P.S.I. CORAF" on the left, "C a l C u l" in the center, and "Version 1.03" on the right. The main area has a dark blue background with white text. Two main sections are highlighted with red headers: "Caractéristiques" and "Prévisions et Simulation".

Caractéristiques

Implantation :	REPIQUAGE
Pré-irrigation (O/N) :	OUI
Délais de ressuyage :	10 jours
Durée des chantiers (en jours) :	
Préparation du sol :	4
Mise en eau :	15
Repiquage :	15
Récolte :	25

Prévisions et Simulation

Debut des semis :	15/06
Variété 1 :	Jaya
Variété 2 :	Jaya
Fichier météo :	D:\PROG_DOS\CALCUL\DISQUE~1\PODOR.TEM

On échelonne les semis selon la durée de la récolte

Entrez le nom du fichier ou *.tem pour choisir dans la liste

générale de réaliser une campagne, le seul résultat est le montage du dossier de crédit. Aucune « prévision » n'est faite sur le déroulement probable des événements et sur les possibles accidents de parcours qui viendraient entraver ce déroulement. L'assemblée se réunit peu de temps avant le démarrage de la saison, et vu les délais d'instruction des dossiers et les retards qui s'accumulent, la période « optimale » de semis est fréquemment largement dépassée lorsque les travaux démarrent. L'horizon de prévision du président de l'OP n'est donc pas beaucoup plus éloigné que celui d'un agriculteur attendant son tour pour irriguer sa parcelle. Deux autres exemples, plus techniques, permettent de mesurer les conséquences de cette absence de prévision.

J'ai assisté au semis de pépinières collectives dans un PIV : les trois parcelles d'environ 0,5 ha chacune étaient semées le même jour sous la surveillance d'un conseiller agricole. Or les producteurs estimaient le temps nécessaire au repiquage sur l'ensemble du périmètre entre 20 et 30 jours. Par conséquent, seules les premières parcelles étaient repiquées au bon stade, tandis que la plupart des autres l'étaient *a fortiori* avec retard.

Compte-tenu des vitesses des chantiers de travail du sol, de mise en eau et de semis direct, un grand aménagement du delta d'environ un millier d'hectares peut être implanté en moins de 3 semaines (la SAED et les OP responsables en sont fiers). Malheureusement, vu le nombre de matériels disponibles dans la délégation et l'enclavement du périmètre³¹, la récolte de la campagne d'hivernage 1998 n'a pas pu être faite « comme prévu » à la moissonneuse-batteuse. Après avoir attendu les moissonneuses-batteuses, les paysans se sont résignés à récolter leurs parcelles et battre leur riz manuellement. La récolte a donc démarré avec retard et s'est ensuite poursuivie sur plus de deux mois. Ce même aménagement disposait d'une unité de décorticage du paddy ; le taux d'usage³², noté pour chaque lot de paddy traité, était passé d'un peu plus de 65% au début de la récolte, à moins de 55%. Cette chute du taux d'usage est liée à la sur-maturité du riz, laquelle engendre également au champ une perte par égrenage. Il aurait donc fallu tenir compte de la durée de la récolte dans l'organisation de l'implantation, ou prévoir bien avant la maturité du riz l'engagement de prestataires pour la récolte et passer contrat avec eux.

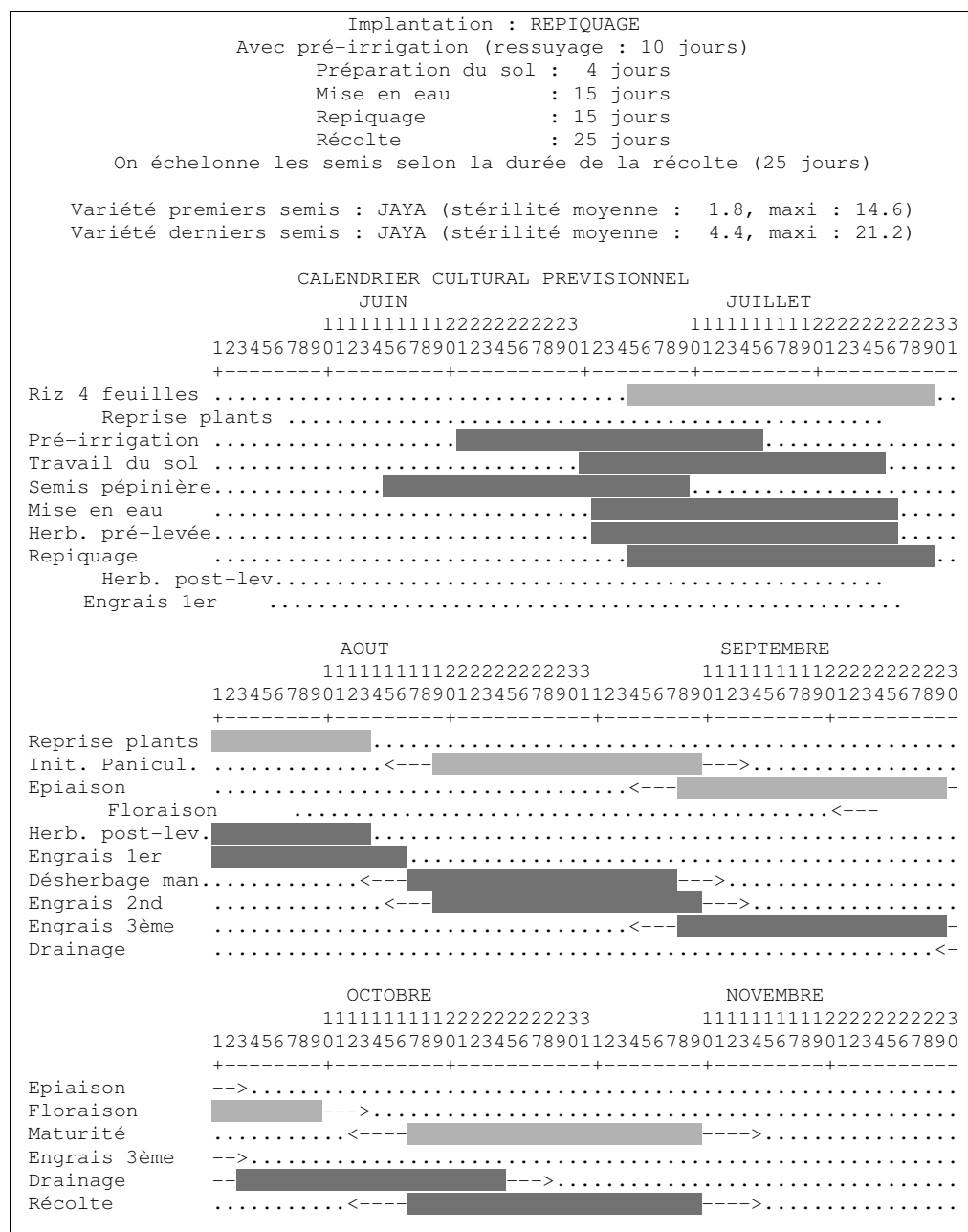
C'est pour répondre à ce problème d'organisation des chantiers que j'ai conçu le logiciel baptisé CalCul [L-04 ; C-15 ; R-10 ; R-11]. L'ambition de cet outil est de proposer un calendrier cultural optimal à l'échelle d'un aménagement (ou d'un secteur d'aménagement) en fonction des performances des principaux chantiers réalisés de façon collective, et de la date prévue pour le

³¹ Le périmètre de Débi-Tiguet, situé en bordure du parc national du Djouj, est situé à plus d'une dizaine de kilomètres de la route nationale et n'est accessible que par une piste inondée en période pluvieuse (à partir de novembre).

³² Rapport de la quantité de riz blanc produit sur la quantité de paddy traité ; ce taux chute lorsqu'il y a production d'un taux élevé de brisure ; ce taux élevé est fréquemment lié à une récolte du riz à sur-maturité.

Figure 24 : Exemple de calendrier cultural prévisionnel proposé par le logiciel.

Les périodes d'atteinte d'un certain stade du riz sont figurées en gris clair, les périodes de réalisation des travaux sont figurées en gris foncé ; les dates extrêmes (minimales et maximales simulées) sont figurées par les signes '<' et '>'.



démarrage des semis, ainsi que du mode d'implantation et de la variété choisie pour l'ensemble du périmètre (Figure 23).

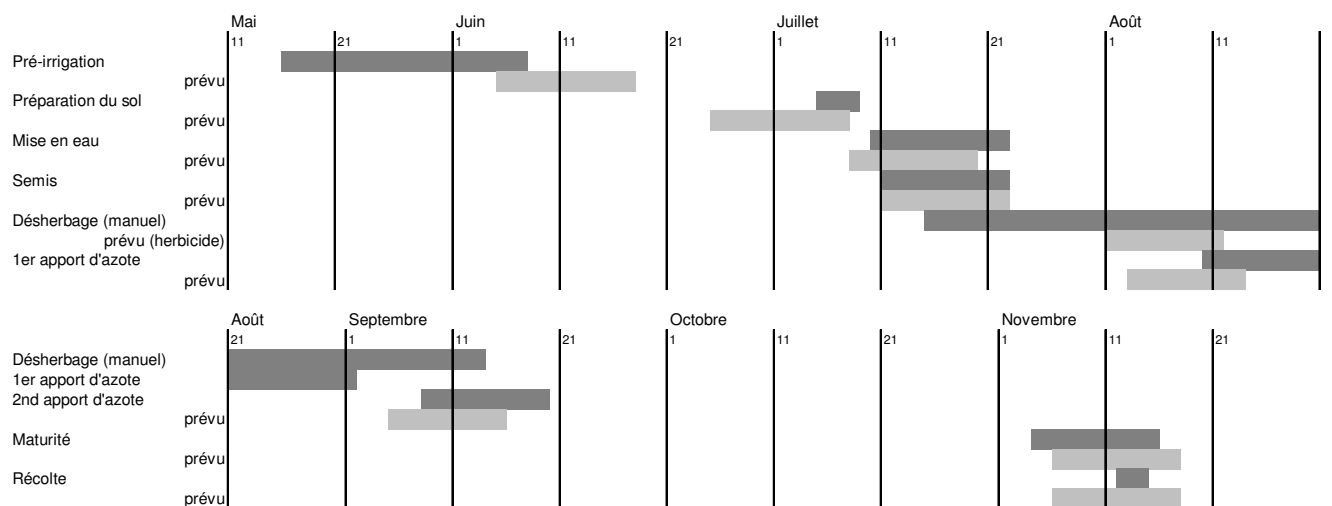
Le fonctionnement de CalCul est très simple. A partir des durées, à l'échelle de l'ensemble du périmètre, des différents chantiers collectifs (mise en eau ou pré-irrigation, travail du sol, repiquage, récolte), on retient la durée plus importante : c'est à ce rythme que devront se dérouler les opérations, notamment les interventions qui concernent directement la culture (semis, désherbage, apports d'engrais, drainage avant récolte et récolte), afin qu'elles soient réalisées dans toutes les parcelles au même stade. Ensuite, deux séries de simulation du développement du riz sont effectuées en utilisant des données climatiques (températures journalières minimales et maximales de l'air) d'une station météorologique proche et les caractéristiques variétales de la variété de riz choisie : une série de simulations pour la date de démarrage des semis, l'autre série pour la date de fin des semis. On réalise autant de simulations dans chaque série qu'il existe d'années enregistrées. On obtient alors, comme avec RIDEV, des dates moyennes et extrêmes des différents stades du riz, stades sur lesquels sont calées les interventions culturales. On obtient donc pour chaque intervention une période de réalisation située entre la date minimale observée pour la première série et la date maximale observée pour la seconde série. La période « la plus probable » est alors située entre les deux dates moyennes (Figure 24). Comme pour RIDEV, ce calendrier « prévisionnel » est plus précis en hivernage ; en saison chaude, il suffit d'observer le développement du riz dans les premières parcelles implantées pour corriger le calendrier.

L'utilisation du logiciel est aussi le moyen de discuter de l'organisation des chantiers collectifs. Les durées sont-elles théoriques ou réelles ? Peut-on faire mieux ? Pourquoi faut-il conserver un rythme constant ? Pourquoi se fonder sur le chantier le plus lent ? Elle permet aussi de réfléchir à la période de semis en fonction de la date prévue pour la récolte : caler la maturité du riz d'hivernage avant l'arrivée des pluies, réfléchir à la possibilité de réaliser une double culture lorsque le chantier le plus lent dure un mois... L'utilisation de cet outil s'insère donc dans une démarche de conseil assez différente de celle qui existait à l'époque à la SAED et à la SONADER, son équivalent en Mauritanie. Il ne s'agit plus en effet de « prescrire » des techniques, mais avant tout de comprendre le fonctionnement actuel et de proposer des moyens accessibles pour lever les contraintes. Cette démarche correspond à l'approche FARMSCAPE (Carberry *et al.*, 2002) : une recherche participative avec les agriculteurs et leurs conseillers agricoles, qui combine suivi, diagnostic et réflexions basées sur des simulations, sur la gestion collective de l'aménagement. En accord avec ce type de démarche, la "simplicité" du simulateur (simplicité dans la façon dont la solution est obtenue) peut être un atout : sa facilité de prise en main et d'utilisation accélère l'appropriation par les agriculteurs et leurs conseillers agricoles d'une démarche leur permettant une meilleure maîtrise

Figure 25 : Calendriers culturels prévisionnel et réalisé à l'échelle du périmètre en 1999 et 2000.

Le calendrier réalisé est indiqué en gris foncé ; le calendrier prévisionnel est indiqué en gris clair.
L'infestation par les adventices à l'initiation paniculaire, les variétés et semences utilisées, le type et les doses d'herbicide et d'engrais sont également indiqués.

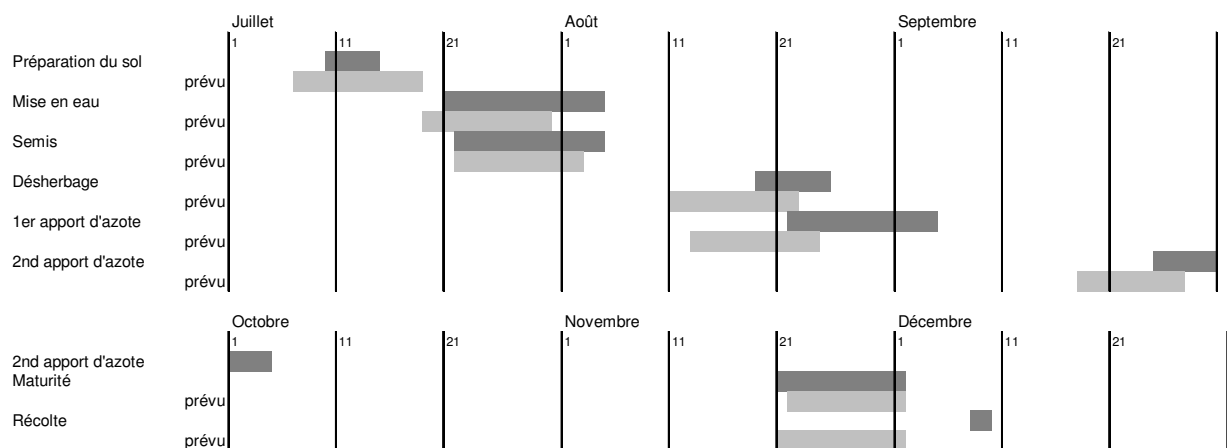
a – hivernage 1999



note d'infestation par les adventices à l'initiation paniculaire : moy. (E.T.) 1,1 (1,6)

	Réalisé	Prévu
Semis	26,6 ha Jaya 0,9 ha Sahel 108	27,5 ha Jaya (semences auto-produites)
Désherbage	manuel	2 l/ha 2,4 D + 4 l/ha propanil
1er apport d'engrais	150 kg/ha urée	100 kg/ha DAP + 50 kg/ha urée
2nd apport d'engrais	150 kg/ha urée	150 kg/ha urée

b - hivernage 2000



note d'infestation par les adventices à l'initiation paniculaire : moy. (E.T.) 0,8 (1,2)

	Réalisé	Prévu
Semis	22,5 ha Sahel 202 5,0 ha Jaya	27,5 ha Sahel 202 (semences certifiées)
Désherbage	2 l/ha 2,4 D + 4 l/ha propanil	2 l/ha 2,4 D + 4 l/ha propanil
1er apport d'engrais	150 kg/ha urée	100 kg/ha DAP + 50 kg/ha urée
2nd apport d'engrais	150 kg/ha urée	150 kg/ha urée

de l'anthropisation du milieu. En cela, cet outil d'aide à la décision se conforme au principe « Keep It Simple and Stupid » proposé par Axelrod (1997).

I-4-3 L'expérience de la planification sur un périmètre irrigué villageois

Le diagnostic précédent a été présenté aux agriculteurs réunis en assemblée générale en avril 1999 et l'équipe PSI-CORAF a formulé une série de propositions pour améliorer la situation. Ces propositions ont été discutées avec les agriculteurs pendant la même assemblée générale. Une famille de propositions concernait l'irrigation et le tour d'eau :

- remise en état manuelle des canaux d'irrigation afin de réduire les pertes d'eau et d'améliorer sa distribution dans les parcelles en queue de réseau ;
- changement de la règle de tour d'eau suite à une pluie (l'irrigation des parcelles s'arrête et le tour d'eau se poursuit sans réinitialisation) ;
- élaboration d'un calendrier prévisionnel de l'irrigation des parcelles fondé sur le tour d'eau, avec affichage du plan parcellaire à l'entrée du périmètre ; ce calendrier sert à l'aiguadier qui coche les parcelles qu'il a irriguées dans la journée.

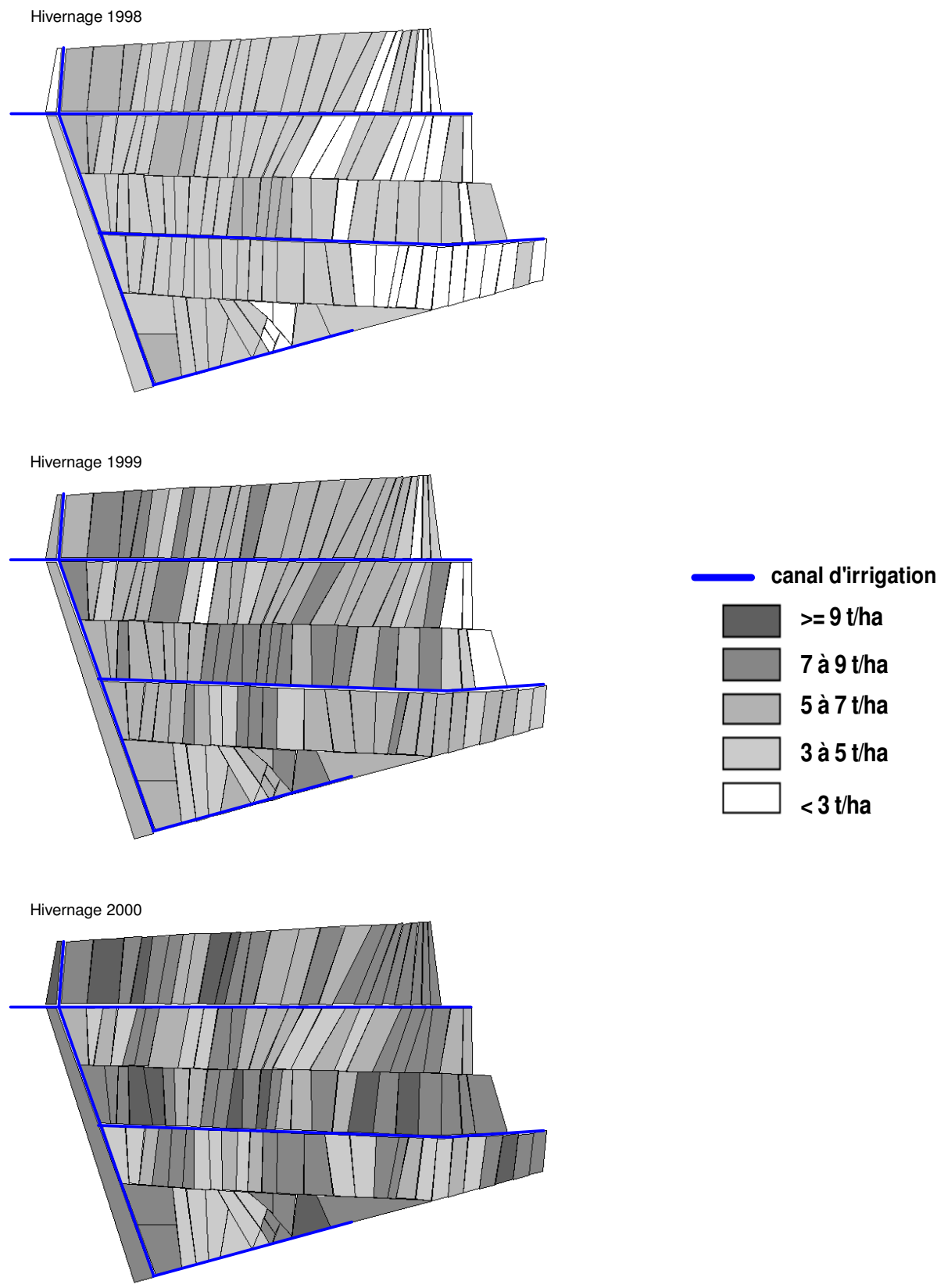
Une seconde famille concernait plus spécifiquement la conduite du riz :

- réalisation d'une « pré-irrigation » avant le travail du sol et le semis, pour éliminer en grande partie les adventices qui ont levé lors de la préparation de la parcelle ;
- construction d'un calendrier cultural prévisionnel à l'échelle de l'aménagement, pour la réalisation des chantiers, depuis la pré-irrigation jusqu'à la récolte ;
- affichage en tête du périmètre du calendrier des opérations à réaliser et des parcelles à traiter (sur la base du tour d'eau).

L'affichage du calendrier cultural à l'échelle du périmètre et des parcelles à irriguer et à traiter chaque semaine constitue la base de l'information des agriculteurs. Ces propositions concernent donc essentiellement l'organisation collective en matière de *planification* des chantiers et d'*information* des individus.

En 1999 et 2000, le nombre d'irrigations dans chaque parcelle a été homogénéisé, sans accroissement de la durée de pompage (et donc du coût de l'irrigation). La pré-irrigation a été

Figure 26 : Cartes des rendements obtenus dans les parcelles du PIV de Nakhlet en 1998, 1999 et 2000.



réalisée en 1999 ; elle a permis la levée des mauvaises herbes qui ont été détruites par le travail du sol quatre semaines après. Les agriculteurs ont alors décidé de faire l'économie de l'herbicide et d'effectuer un désherbage manuel. Ce choix a été malheureux puisque l'infestation a tout de même nécessité un long désherbage manuel, lequel a retardé le premier apport d'engrais. Les autres interventions ont néanmoins été plus proches des dates optimales qu'en 1998 (Figure 25-a). En 2000, les agriculteurs ont choisi une implantation classique, sans pré-irrigation et avec un désherbage chimique (Figure 25-b). Malheureusement, les herbicides et les engrais ont été livrés en retard (fin juillet au lieu de fin juin) ; les premières parcelles semées ont subi plus fortement ce retard et ont obtenu des rendements plus faibles.

Globalement, le rendement moyen sur le périmètre est passé de 4,8 t/ha en 1998, à 7,2 t/ha en 1999 et 8,2 t/ha en 2000 (Figure 26). Les coûts de production, hors récolte, ayant peu varié, la marge brute dégagée est passée de 3,2 t/ha d'équivalent paddy à 5,9 t/ha en 1999 et 6,5 t/ha en 2000.

Cette expérience montre d'une part la marge très importante de progression des systèmes rizicoles irrigués dans la vallée du Sénégal, et souligne d'autre part qu'aucun bouleversement technologique n'est nécessaire pour améliorer ces performances. L'amélioration de la gestion technique collective des aménagements (planification des opérations, mise en place d'un système d'information) permet d'atteindre les rendements potentiels des variétés actuelles en utilisant le « paquet technologique » existant.

Peut-on mettre en œuvre la même démarche dans un grand aménagement géré par une cascade d'OP ? Comment régler le problème de l'imprécision de la prévision du calendrier en saison chaude ? Il est sans doute possible de répondre à ces questions en travaillant toujours à l'échelle de l'aménagement.

Construire une prévision à l'échelle de l'aménagement mène à analyser comment les chantiers collectifs sont organisés, à repérer parmi ceux-ci celui qui freine le rythme d'avancement, et à améliorer son fonctionnement par rapport l'ensemble. C'est aussi un moyen pour vérifier s'il est possible d'enchaîner plusieurs campagnes - un riz de saison chaude puis un riz d'hivernage par exemple - sur l'aménagement, en tenant compte des délais d'autres « chantiers » : depuis le remboursement en paddy par les producteurs, jusqu'au déblocage du nouveau crédit de campagne.

La planification de la campagne à l'échelle de l'aménagement ne lève néanmoins pas les freins qu'induisent d'autres acteurs dans la filière. La récolte mécanisée, par exemple, est nécessaire pour accélérer la récolte dans les grands aménagements (Le Gal et Papy, 1998). S'assurer de la présence

d'un nombre suffisant de moissonneuses-batteuses à la maturité nécessite de contractualiser les relations avec les prestataires de services ; planifier la campagne agricole peut y aider.

Mais le parc de matériel est-il suffisant pour faire face à la demande de l'ensemble des grands aménagements ? Analyser le processus de décision complet supposerait une autre étude à une autre échelle.

Conclusion

L'aménagement du fleuve Sénégal a modifié profondément les écosystèmes, notamment dans le delta. Face à ces impacts environnementaux irréversibles, la riziculture irriguée, qui a motivé ces aménagements, affiche des résultats très en dessous des espérances projetées. Les projections de mise en valeur et de résultats étaient en effet environ deux fois plus élevées que ce qui a été accompli en termes de surfaces aménagées (70 000 ha, dont 30 000 ha en PIP, au lieu des 100 000 ou 240 000 ha prévus), d'intensité culturale (0,5 à 1 au lieu des 1,6 prévus) et de production (la production locale de riz représente seulement le quart de la consommation annuelle du pays). A cela s'ajoute le fait que les aménagements ne sont pas entretenus, qu'ils se dégradent puis sont réhabilités aux frais des bailleurs de fonds, que les emprunts au Crédit Agricole ne sont pas remboursés en totalité, que les dettes s'accumulent, que l'Etat doit intervenir... L'agriculture irriguée est assistée. Etait-ce une erreur de réaliser ce projet de développement ? L'état des villages dans la vallée semble démontrer le contraire, et il aurait fallu profondément améliorer et sécuriser le système de production traditionnel pour qu'il couvre les besoins d'une population qui a plus que doublé depuis 1960. Les populations ont intégré l'agriculture irriguée dans leurs activités au point qu'il peut leur sembler impensable de revenir au système traditionnel [D-01]. Ce développement social est-il durable ? Le financement de l'agriculture irriguée et des Organisations Paysannes était loin d'être parfait, mais la privatisation de la filière est sans doute un moyen d'assainir cette situation et de faire émerger des acteurs « professionnels » et performants³⁷.

Pourquoi ces résultats sont-ils aussi médiocres ? Les études agronomiques se seraient-elles trompées sur les potentialités de la riziculture dans la vallée du Sénégal ? Tous les diagnostics démontrent le contraire. Tout d'abord, les conditions d'ensoleillement, seul facteur limitant si on apporte l'eau et les nutriments, permettent d'excellents rendements, en hivernage comme en saison chaude, si l'on respecte certaines règles : choisir la bonne période de semis et la variété adaptée pour éviter un risque trop élevé de stérilité. Ensuite le « paquet technologique » vulgarisé permet d'atteindre ces rendements potentiels. Le pompage pour l'irrigation augmente le coût de production, mais globalement, il est possible de produire localement un riz compétitif sur le marché mondial. L'explication doit donc être cherchée ailleurs.

³⁷ Même si actuellement le riz de la vallée ne couvre toujours que le quart de la consommation nationale, le rendement a fortement progressé (5,6, t/ha en 2004).

La riziculture irriguée est une activité prenante. La conduite d'une parcelle de riz requiert des interventions en cours de culture, un désherbage et des apports d'engrais qui supposent une présence permanente. C'est aussi une activité risquée. En saison chaude par exemple, les températures plus ou moins fraîches pendant l'installation de la culture peuvent ralentir plus ou moins le développement du riz. Par la suite, les fortes chaleurs, l'Harmatan desséchant, ou les oiseaux mange-mil peuvent entraîner de fortes pertes de rendement. Comme les cultures traditionnelles, la production de la riziculture irriguée n'est pas certaine, mais à la différence des premières, elle induit des coûts. Ces coûts supposent d'accéder au crédit bancaire... Récupérer le paddy auprès des producteurs, vendre ce paddy, monter le dossier pour obtenir le crédit de campagne, le faire évaluer aux plans technique et financier... Toutes ces opérations demandent du temps. Finalement la campagne d'hivernage, plus sûre et plus régulière que celle de saison chaude peut démarrer en retard, et les faibles températures qui apparaissent en novembre provoquent alors une chute de rendement. Ce scénario « catastrophe » s'est déroulé en 1994. Vu l'importance des conséquences engendrées par l'échec d'une campagne, on peut mieux comprendre l'aversion au risque de ces agriculteurs auxquels le système de production traditionnel très sujet aux aléas a appris à diversifier leurs activités. Mais avec l'agriculture irriguée, cet aléa hydro-climatique, non « maîtrisable », a été remplacé des incertitudes socio-économiques, tout aussi peu maîtrisables.

Pour repérer quelles contraintes pèsent sur l'élaboration du rendement, l'agronome doit observer le processus de production dans une parcelle, voire une placette. Il peut ensuite essayer de lever ces contraintes en proposant de nouvelles techniques : une variété plus précoce permettant de faire plus facilement deux cycles de riz, ou plus tolérante à la salinité pour compenser une gestion de l'eau déficiente, des herbicides plus efficaces, des matériels de récolte à chenilles pour entrer dans les parcelles boueuses, ou la culture attelée pour réduire les coûts... Ou bien encore proposer des outils comme RIDEV qui permettent d'intervenir dans la parcelle au moment le plus adéquat pour la culture.

Afin de repérer l'origine des contraintes, il faut analyser la gestion du processus de production, changer d'échelle et de sujet d'observation. L'agronome est-il tout à fait compétent pour cela (Milleville, 1987) ? En tous cas, il partage avec les économistes l'échelle de l'exploitation agricole et le sujet de sa gestion par l'agriculteur. Mais cette échelle ne suffit pas ici puisque d'une part le processus de décision en agriculture irriguée s'articule autour d'un instrument commun, l'aménagement hydro-agricole, ayant des règles collectives de fonctionnement, et d'autre part ce processus fait intervenir des acteurs non agriculteurs qui influencent directement ou indirectement le processus de production. La collaboration avec des spécialistes de sciences humaines s'impose pour compléter l'analyse à cette échelle.

Améliorer l'organisation et la planification collective pour accroître les performances est une voie qui a porté ses fruits. Je retiens de cette expérience de diagnostic et d'action à plusieurs échelles deux aspects essentiels : 1) utiliser un jeu de cartes qui supportent l'information à transmettre, et 2) produire des modèles simples pour accélérer leur appropriation par les acteurs, et qui leur permettent de réagir efficacement.

La carte de l'aménagement nous a permis d'informer les agriculteurs sur les interventions à réaliser, en indiquant chaque semaine les parcelles à traiter. Mieux encore, la carte a servi aux aiguadiers de manière interactive puisqu'elle a permis d'indiquer les parcelles qui devaient être irriguées et celles qui l'avaient été. Je rejoins en cela les travaux réalisés en cartographie pour l'aide à la décision en aménagement (Steinberg, 2000). La carte est une représentation de l'espace dans lequel les acteurs agissent et sur laquelle ils peuvent s'accorder (Antoni *et al.*, 2004), surtout lorsque sa construction respecte certaines règles (Bertin, 1967). Dans notre démarche, aucun logiciel n'a été utilisé pour produire de cartes ; le plan parcellaire du périmètre a simplement été photocopié et l'information a été « spatialisée » manuellement. Si les SIAD destinés aux agriculteurs, exceptés les Systèmes d'Information Géographique (SIG), utilisent rarement le support cartographique pour saisir les données ou présenter les résultats, c'est sans doute parce que les programmes informatiques capables de gérer les graphiques sont plus sophistiqués, moins accessibles aux non-informaticiens.

La simplicité du modèle est un atout. CalCul, par exemple, exige des paramètres en entrée à la fois peu nombreux et accessibles, et produit en sortie un calendrier dont la logique est claire. L'élément le moins « clair » dans le principe de cet outil, c'est le choix d'un rythme d'avancement commun fondé sur le chantier le plus long. L'objectif est alors d'inciter les agriculteurs à réfléchir ensemble à leur organisation en mesurant les conséquences de celle-ci sur le calendrier de la campagne de culture. Le modèle-instrument devient ainsi un support à l'élaboration de règles collectives (Jelassi et Beauclair, 1987). La condition nécessaire pour ce « Group Decision Support System » est que le modèle sous-jacent soit accepté par tous les participants. Concevoir un modèle simple et intelligible permet de satisfaire plus facilement cette condition.

On pourrait imaginer utiliser le même type de démarche avec toutes les catégories d'acteurs impliqués dans les performances de la riziculture irriguée, depuis les paysans qui ne respectent pas les recommandations car ils ont d'autres préoccupations, jusqu'aux bailleurs de fonds qui financent des aménagements sans « contrôler » leur fonctionnement [D-01]. Il s'agirait de confronter la vision de chaque catégorie d'acteurs afin de montrer de quelles façons elles interagissent. Cette évaluation *ex post* du développement de l'irrigation permettrait peut-être de corriger quelques incohérences.

2^{ème} Partie

PROJET DE RECHERCHE

Une modélisation spatialisée des activités
au service d'une anthropisation durable

Les travaux de l'Unité Mixte de Recherche « Gestion de l'Eau, Acteurs, Usages » (UMR G-eau), à laquelle j'appartiens depuis 2004, rejoignent en partie ceux que mène le Groupe d'Etude des Géomatériaux et des Environnements Naturels et Anthropiques sur les pollutions diffuses en milieu rural. En effet, au sein de cette UMR, le troisième axe de recherche concerne le comportement des usagers - essentiellement dans le domaine agricole - ainsi que leurs déterminants, la performance des systèmes de production agricole et des matériels d'irrigation, y compris leurs effets sur l'environnement, et la mise au point d'améliorations de ces performances.

Dans cette UMR, j'ai choisi d'étudier *la demande agricole en eau*, qui désigne la quantité d'eau *demandée* par les agriculteurs pour irriguer leurs cultures, et qui correspond donc à une évaluation *ex ante* de la quantité d'eau consommée. Mon objectif est de proposer des méthodes et des outils pour faire cette évaluation et pour réfléchir à son évolution. Délaissant l'échelle de la parcelle, j'ai choisi de travailler tout d'abord au niveau d'un territoire, correspondant à un espace aménagé, un bassin versant ou un sous-ensemble de bassin versant. A ces échelles, en effet, il s'agit d'étudier l'adéquation entre la demande en eau liée aux activités notamment agricoles et l'offre en eau constituée par les ressources mobilisables. Cette demande agricole en eau résulte des activités de production que les agriculteurs choisissent et combinent au sein de leurs exploitations.

Pendant plusieurs décennies, ce sont ceux qui construisaient des aménagements qui s'occupaient de la gestion de l'eau. Gérer l'eau signifiait accroître la disponibilité des ressources en eau de surface³⁸. Aujourd'hui, l'exploitation de ces ressources ne suffit plus, et les nappes sont de plus en plus mises à contribution pour le développement de l'irrigation (Foster *et al.*, 2000). Ces ressources sont librement accessibles puisqu'aucun aménagement important n'est nécessaire à leur exploitation : il suffit de creuser un puits, voire un forage, et d'installer une pompe électrique immergée. Pour prévenir la surexploitation de ces ressources en eau, il devient de plus en plus nécessaire de gérer l'eau en agissant sur la demande (Brooks, 2006). Mais comment « gérer » cette demande ? Pour la Banque Mondiale, « gérer la demande en eau » consiste à mettre en œuvre un ensemble d'actions susceptibles de modifier les paramètres qui jouent sur cette demande (Berkoff, 1994). Ces actions regroupent des mécanismes techniques ou institutionnels, et des comportements économiques (Froukh, 2007). A mon sens, il est donc important de focaliser l'analyse de la gestion de l'eau sur les exploitations agricoles où sont effectués les choix des cultures et des techniques, afin de proposer un modèle de la demande en eau qui permette de la gérer au mieux.

Cette analyse se heurte à deux sortes de difficultés. Tout d'abord, il existe une multiplicité d'acteurs en jeu (les agriculteurs) dont chacun a une façon de combiner, au sein de son exploitation, des

³⁸ L'eau de surface désigne l'eau directement accessible dans les cours d'eau et les retenues, par opposition à l'eau souterraine qui désigne les nappes.

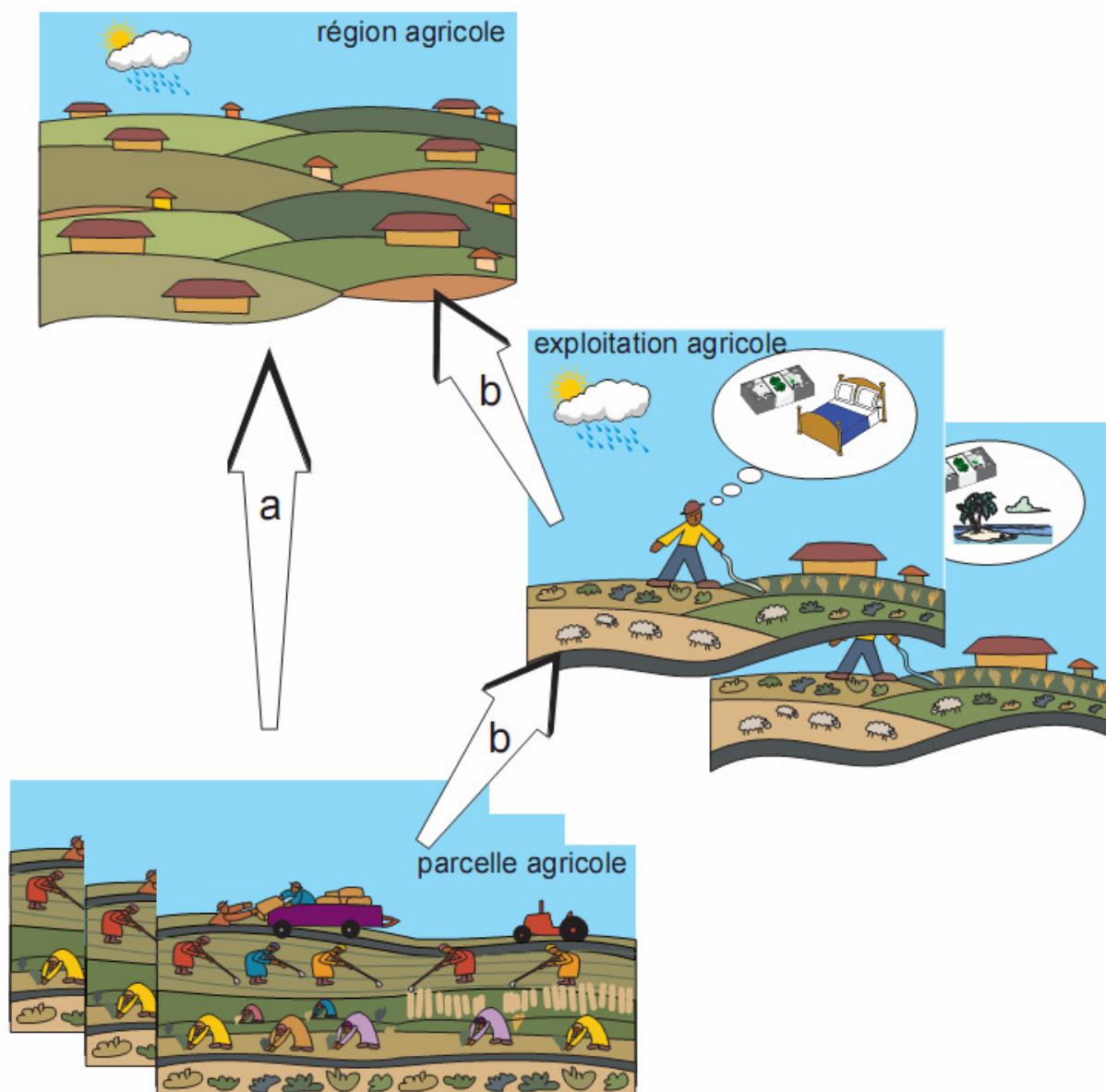
activités de production localisées sur le territoire. Ensuite, la cohérence d'ensemble est la conséquence des nombreuses interrelations entre ces activités, les espaces sur lesquelles elles sont menées, et ces agriculteurs (Benoît *et al.*, 2006).

Néanmoins, la modélisation est toujours une simplification. Cette simplification correspond à des choix qui doivent être faits et discutés en fonction de l'objectif du modèle construit. L'objectif du modèle de la demande en eau que je me propose ici n'est pas de rendre compte de la logique des usages agricoles de l'eau, mais d'être utile à leur gestion et d'accroître la maîtrise de leur efficacité et de leur durabilité. La construction de ce modèle utilise un cadre de représentation qui n'est pas spécifique de l'eau et de l'agriculture irriguée. La généricité³⁹ de ce cadre ouvre ainsi des perspectives qui sont de bâtir des modèles au service d'une anthropisation durable du milieu.

L'exposé de ces perspectives requiert d'abord de procéder à une analyse critique des méthodes utilisées pour évaluer la demande agricole en eau. Cela m'amènera à bâtir un cadre pour modéliser cette demande, et je fonderai ce cadre sur la création et l'organisation d'objets spatialisés très simples. La généricité des objets manipulés et leurs fonctionnalités permettent d'envisager des applications dans de multiples domaines. Je décrirai ensuite l'application de ce cadre de modélisation sur un exemple tunisien pour en montrer la pertinence en termes de représentation et de gestion du système. Je passerai en revue les étapes de sa mise en œuvre : construction d'un modèle régional de l'activité agricole, estimation de la demande en eau pour l'irrigation des cultures et test de scénarios avec les acteurs. Je considérerai les contraintes qu'implique cette démarche et les limites du cadre de modélisation, et j'envisagerai les futurs usages de la méthode proposée ainsi que les collaborations nécessaires avec d'autres spécialistes, notamment des jeux de simulations, pour la compléter.

³⁹ En informatique, la généricité d'un programme (ou d'un modèle) repose sur son indépendance vis-à-vis des données qu'il manipule et des paramètres du cas traité. C'est un concept important car il permet d'augmenter le niveau d'abstraction du modèle.

Figure 1 : La région vue comme a) un ensemble de parcelles ou comme b) un ensemble d'exploitations cultivant un ensemble de parcelles.



II-1 Comment représenter la demande agricole en eau ?

A l'échelle d'une parcelle cultivée, la consommation d'eau pour l'irrigation résulte des pratiques d'irrigation que l'agriculteur met en œuvre au cours de la campagne. Ces pratiques rendent compte à la fois des besoins en eau de la culture, qui sont fonction de sa nature et des conditions pédoclimatiques, de l'efficacité⁴⁰ de la technique d'irrigation, et de la stratégie d'irrigation qu'a choisie l'agriculteur : veut-il couvrir totalement⁴¹ ou seulement partiellement⁴² les besoins en eau de la culture ?

Pour donner une estimation de cette consommation d'eau, il est donc nécessaire de combiner des processus biophysiques (le fonctionnement du système eau-sol-plante-atmosphère) et techniques (l'efficacité du système d'irrigation), avec des choix économiques (les stratégies des agriculteurs). La consommation d'eau à l'échelle régionale est alors l'agrégation des consommations élémentaires des parcelles qui la composent. Comme le représente schématiquement la figure 1, cette agrégation des consommations peut être faite directement : une région est alors considérée comme un ensemble de parcelles. Ou bien l'agrégation utilise un niveau intermédiaire que sont les exploitations agricoles : une région est un ensemble d'exploitations, qui sont elles-mêmes des ensembles de parcelles. Ce niveau intermédiaire permet de rendre compte des décisions des agriculteurs en matière d'assolement et de stratégie d'irrigation. Dans le premier cas, on peut se contenter de modèles biophysiques et d'hypothèses sur les pratiques des agriculteurs pour estimer (et prédire) ces consommations d'eau (futures). Dans le second cas, il faut aussi prendre en compte les choix des agriculteurs, lesquels évoluent selon contexte à la fois économique et institutionnel.

II-1-1 Estimer la demande en eau sur la base de modèles biophysiques

La plupart des méthodes de prévision des consommations d'eau pour l'irrigation des cultures se fonde sur l'estimation de leurs besoins en eau. Elles utilisent des modèles, notamment CROPWAT de la FAO (Allen *et al.*, 1998), qui fournissent la quantité d'eau à apporter en plus des pluies pour obtenir une évapotranspiration maximale de la culture et donc son rendement potentiel⁴³. Les modèles sont utilisés avec des scénarios climatiques constitués par les enregistrements

⁴⁰ L'efficacité est le rapport entre la dose d'eau utilisable par la culture et la dose apportée ; elle est (*a priori*) maximale avec les systèmes de micro-irrigation.

⁴¹ L'irrigation permet une évapotranspiration maximale (ETM) de la culture.

⁴² On parle d'irrigation déficitaire, représentant une fraction d'ETM.

⁴³ Dans l'hypothèse que seuls le rayonnement et l'eau limitent le rendement.

météorologiques des années passées. On fait donc l'hypothèse que les processus en jeu sont stationnaires et que les événements futurs sont une répétition des événements passés, en faisant éventuellement des hypothèses sur l'évolution du climat (Victoria *et al.*, 2005). Beaucoup de modèles évaluent la consommation totale d'eau à l'échelle régionale en agréant celle de chaque parcelle, en tenant compte de l'assolement observé et sur la base des besoins unitaires estimés pour chaque culture (Herrero and Casterad, 1999 ; Mateos *et al.*, 2002).

Néanmoins, l'objectif n'est pas d'estimer la consommation passée, mais de prévoir la quantité d'eau que le gestionnaire de bassin ou de périmètre devra fournir pour la ou les années suivantes. Les modèles doivent donc établir une prévision des volumes d'eau nécessaires à l'irrigation. Dans ces conditions, il faut commencer par faire des hypothèses sur l'assolement futur. C'est ce que font par exemple Benoît *et al.* (2001) ou Leenhardt *et al.* (2005) en utilisant des probabilités de transition d'une culture à une autre. Ces probabilités sont construites à partir des assolements successifs observés dans le passé. Une fois qu'a été établie une prévision d'assolement, il s'agit également de prévoir les stratégies d'irrigation des agriculteurs. Bergez *et al.* (2005) proposent ainsi un modèle régional de « demande agricole en eau » qui intègre ces stratégies en se fondant sur une typologie des pratiques d'irrigation observées dans le passé chez les agriculteurs. Dans les deux cas (prévision d'assolement et prévision des stratégies d'irrigation), on représente les choix des agriculteurs en partant de l'hypothèse que les processus de décision sont stationnaires, comme les processus biophysiques.

II-1-2 Optimiser les systèmes de production au plan économique

Peut-on conserver cette hypothèse de stationnarité pour les processus décisionnels ? Le contexte socio-économique - notamment les prix - qui influe directement sur les choix des agriculteurs, évolue rapidement (Cantin *et al.*, 2005). Que seront en Europe par exemple les assolements et les stratégies d'irrigation des cultures suite à la suppression du gel de terres et à l'augmentation généralisée des prix des céréales ? C'est à ce type de question que des instruments d'optimisation économiques utilisant la programmation mathématique ou des modèles économétriques tentent de répondre (Scheierling *et al.*, 2005 ; Bartolini *et al.*, 2007). Dans ces modèles économiques, la demande agricole en eau résulte du choix optimal dans chaque exploitation agricole d'un assolement associé à des pratiques d'irrigation. Ce choix répond à un certain contexte de marché, défini par les prix des productions et les coûts des consommations, dont l'eau (Gomez-Limon et Riesgo, 2004). Ces modèles, qui bâtissent des hypothèses sur le comportement économique des

agriculteurs⁴⁴, présentent l'intérêt d'ajouter à l'analyse le niveau de l'exploitation. A ce niveau, l'agriculteur est censé choisir une combinaison d'activités de production et une façon de conduire chacune d'elles qui répondent au mieux à son objectif (généralement maximiser le revenu) sous contrainte de son système d'exploitation (surface, disponibilité en eau, en équipement, en main d'œuvre...).

II-1-3 Explorer des scénarios avec un simulateur budgétaire

Comment « gérer » la demande en eau ? Excepté les usagers, personne ne peut « gérer » directement la consommation d'eau. Gérer signifie donc ici agir sur les comportements des usagers, leurs choix d'assolement et leurs pratiques d'irrigation. Comme le montre Wichelns (2003), les choix et les comportements des agriculteurs en matière d'irrigation ne sont pas indépendants de leurs autres activités de production. Il faut donc replacer l'usage de l'irrigation dans le contexte du fonctionnement de l'exploitation agricole considérée comme un tout cohérent.

Gérer la demande en eau consiste alors à modifier le contexte de décision des diverses activités de production au sein des exploitations agricoles. Ces modifications de « contexte » peuvent concerner non seulement les coûts et les prix - pour les modèles économiques précédents, utilisant la programmation linéaire par exemple, cela signifierait changer le système de prix sans modifier ni la structure de la matrice ni la forme de la fonction-objectif - mais aussi inciter (par des prix, des subventions ou des règlements) les agriculteurs à modifier leurs contraintes initiales ou à développer de nouvelles activités – ce qui signifierait pour ces modèles économiques des changements de structure dans la situation à optimiser. Du fait des combinaisons variées des activités au sein des exploitations, les réactions des agriculteurs ont toutes les chances d'être hétérogènes (Montginoul, 1997). La voie de l'optimisation trouve ici une limite puisqu'il ne s'agit plus de déterminer une solution optimale pour un système de contraintes et d'activités donné, mais de réfléchir à la façon de modifier ce système de manière à maintenir le mieux possible la satisfaction de l'objectif initial, lequel n'est pas systématiquement la maximisation du revenu.

Ce type de question peut être abordé par simulation. Sur la base des travaux de Le Grusse (2001), Le Bars et Le Grusse (2008) ont proposé par exemple d'utiliser un simulateur budgétaire⁴⁵ dédié au fonctionnement de l'exploitation agricole pour explorer, à l'échelle d'un périmètre irrigué, des scénarios d'assolements en réponse à des stratégies d'allocation de l'eau. Cette démarche se base

⁴⁴ Hypothèse classique – conforme à la théorie de la décision – de rationalité complète du décideur qui a une connaissance parfaite de la situation et qui cherche alors à maximiser son profit sous diverses contraintes.

⁴⁵ La description technico-économique des activités de production permet de calculer le revenu dégagé par l'exploitation ainsi que les consommations et les productions en volumes.

Tableau 1 : Assolement, consommations (eau et travail manuel), productions, et marge dégagée à l'échelle de l'ensemble de la zone étudiée calculés à l'aide du modèle.

Jachère (ha)		1 452
Cultures pluviales (ha)	Oliviers et amandiers seuls	2 161
	Oliviers intercalaires	660
	Céréales	2 266
	Sous total cultures pluviales	4 647
Cultures irriguées (ha)	Oliviers et amandiers seuls	2 195
	Oliviers intercalaires	2 479
	Céréales	2 232
	Melons et pastèques	2 445
	Tomates et piments (ha)	1 587
	Fèves et maraîchage d'hiver	933
	Arbres fruitiers	670
Sous total cultures irriguées		10 888
Consommation	Volume total d'eau d'irrigation (millions m ³)	36,8
	Pour le maraîchage	20,7
	Pour les céréales	5,2
	Pour les arbres fruitiers	11,0
Travail manuel (milliers jours)		927,6
Production (milliers t)	Olives	8,95
	Blé	6,75
	Pastèques	44,69
	Melons	28,50
	Tomates	37,52
	Piments	16,56
Marge dégagée (millions Dinars)		18,01

sur l'agrégation des choix individuels, puis l'analyse du résultat global et de ses éventuelles répercussions sur la gestion du réseau et sur les performances individuelles⁴⁶. Ces répercussions engendrent de nouvelles simulations, fondées sur de nouveaux choix individuels et des compromis entre acteurs, le but étant d'approcher une solution collective satisfaisante. L'intérêt de cette démarche est de proposer un modèle simple, qui rende compte à la fois de la diversité des comportements individuels face au même contexte technique, économique et institutionnel, et d'une situation globale résultant de l'agrégation de ces comportements individuels.

II-1-4 Représenter la demande en eau dans une région

J'ai expérimenté la méthode agrégative proposée par Le Grusse (*op. cit.*) pour évaluer la demande en eau d'irrigation dans la plaine de Kairouan en Tunisie centrale [R-12]. Ces travaux ont été conduits dans le cadre d'un programme de recherche pluridisciplinaire franco-tunisien baptisé MERGUSIE (Merguellil, Ressources, Gestion et Usages Intégrés de l'Eau) ayant pour objectif de concevoir des méthodes et des modèles de gestion intégrée de l'eau.

L'irrigation dans la plaine de Kairouan se fait par pompage dans une nappe dont la recharge est assurée par trois bassins versants fermés chacun par un barrage. Le Commissariat Régional du Développement Agricole (CRDA) de Kairouan⁴⁷ gère les trois retenues et effectue des lâchers d'eau pour améliorer la recharge de la nappe de Kairouan. Malgré ces recharges, cette nappe baisse de près d'un mètre par an du fait des prélèvements pour l'irrigation dans la plaine. Les cultures irriguées, qui étaient à l'origine concentrées dans quelques « périmètres publics irrigués » (PPI), se sont développées autour de puits et de forages privés (on en dénombre actuellement plusieurs milliers).

Avec l'aide des personnels du CRDA de Kairouan, j'ai réalisé l'inventaire des exploitations dans une zone couvrant 300 km². Puis j'ai effectué des enquêtes pour bâtir deux typologies : celle des ateliers de production⁴⁸, et celle des exploitations. Ces typologies ont été discutées avec les personnels du CRDA, notamment les conseillers agricoles qui ont une bonne connaissance de leur zone d'action. Sur la base des effectifs d'exploitations dans chaque type obtenus grâce à l'inventaire, j'ai pu reconstruire l'ensemble de la zone au plan de ses activités agricoles en agrégeant les ateliers de production de ces exploitations, ainsi que leurs consommations d'eau pour l'irrigation. Les résultats de cette construction - surfaces cultivées, productions et consommations

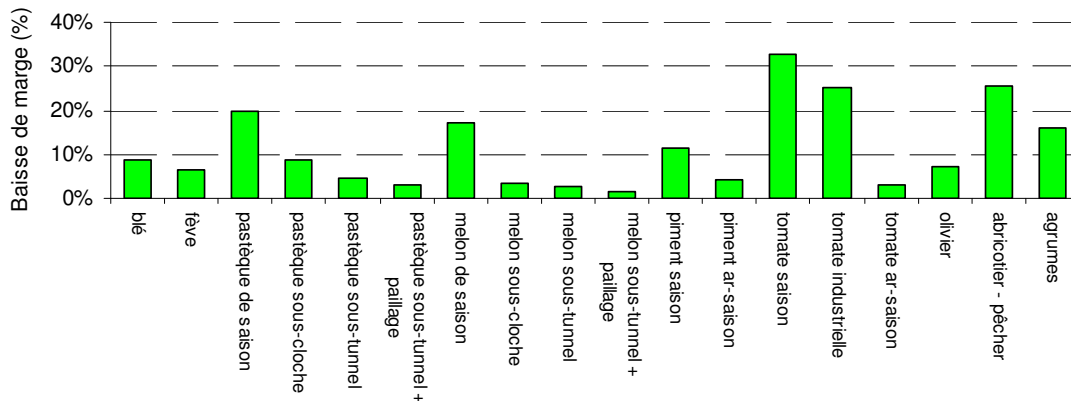
⁴⁶ Une réduction des volumes d'eau consommés se répercute sur le coût unitaire de l'eau, lequel permet de recouvrir des charges fixes et de maintenance du réseau : ce coût est donc d'autant plus bas que le volume consommé est important.

⁴⁷ Institution étatique chargée du développement agricole et rural dans le Gouvernorat.

⁴⁸ Les cultures ou les élevages et leur mode de conduite.

Figure 2 : Impact d'une hausse du prix de l'eau sur les ateliers de production des cultures irriguées dans la plaine de Kairouan.

a – Baisse de marge unitaire engendrée par la hausse du prix de l'eau pour chaque atelier-type



b - Marge unitaire dégagée et consommation d'eau par hectare pour chaque atelier-type

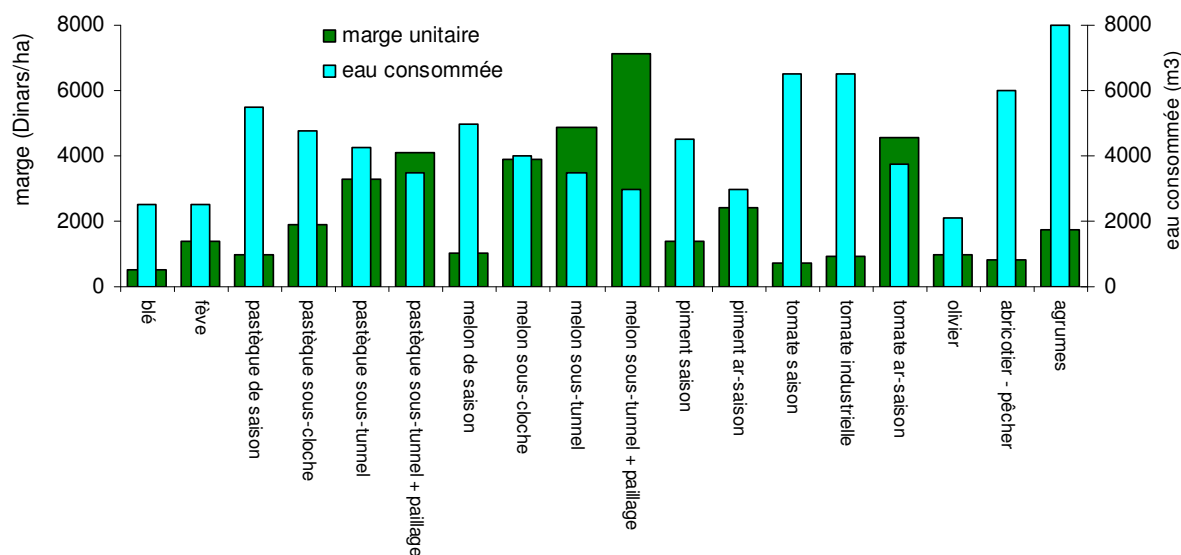
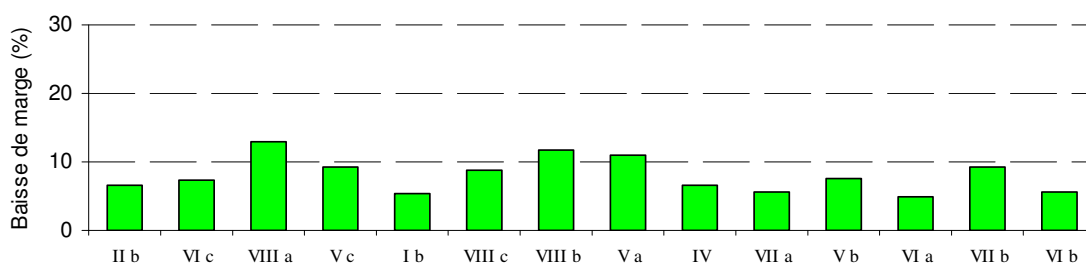
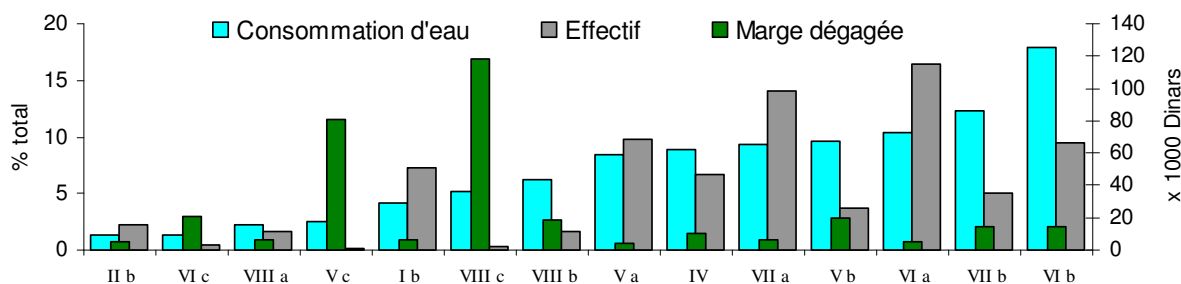


Figure 3 : Impact d'une hausse du prix de l'eau sur les exploitations irriguées dans la plaine de Kairouan.

a – Baisse de marge engendrée par la hausse du prix de l'eau pour chaque exploitation-type



b - Marge dégagée par chaque exploitation-type, effectif et consommation d'eau en proportion du total



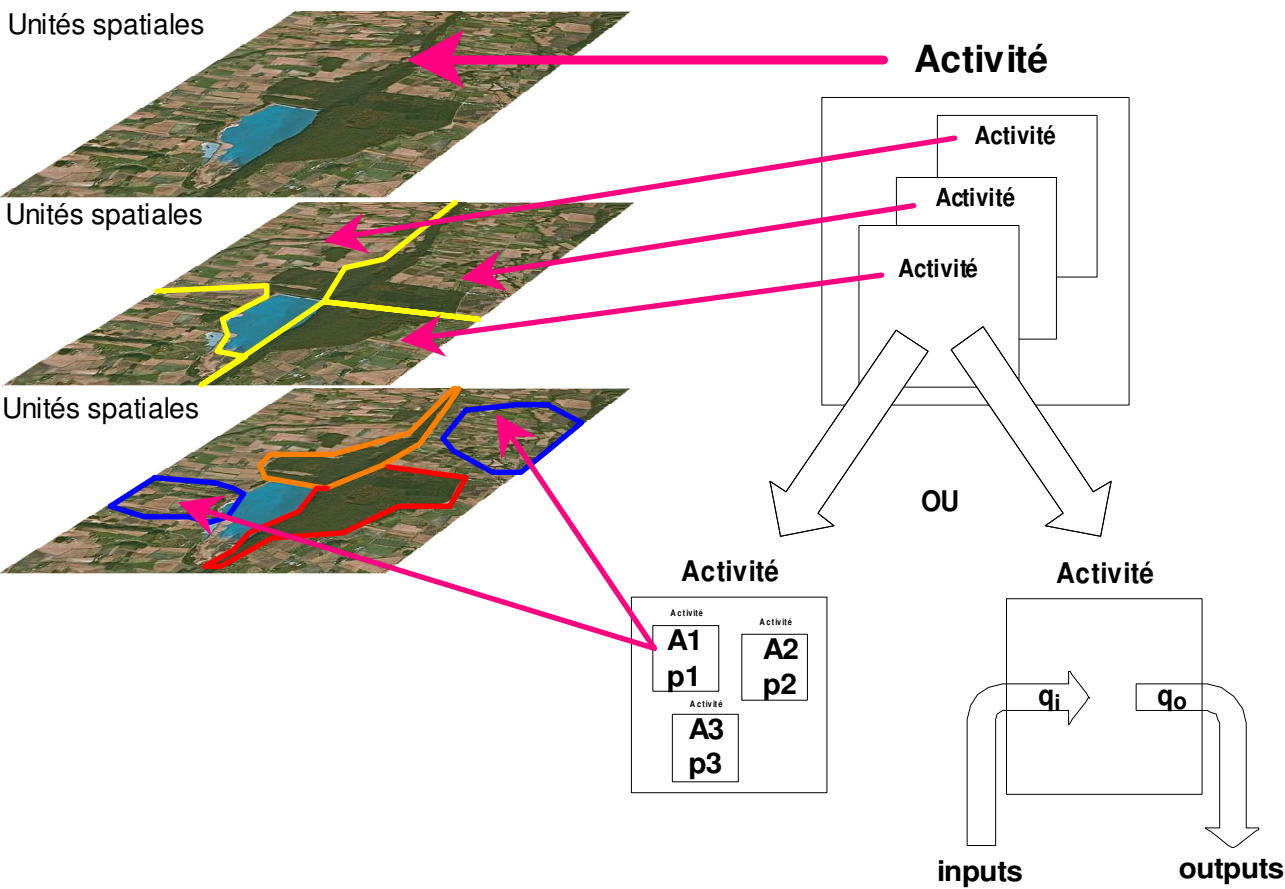
agrégées (Tableau 1) - ont été confrontés aux chiffres disponibles (Albouchi, 2006) afin de caler la représentation et de la valider. D'après ce modèle, le volume total d'eau consommée pour l'irrigation dans la zone était estimé à environ 37 millions de m³ ; l'activité agricole dégagait 18 millions de Dinars tunisiens (soit 12,6 millions d'Euros) et nécessitait plus de 900 000 journées de travail.

La tarification de l'eau est souvent utilisée pour freiner sa consommation (Montginoul, *op. cit.*). Ce modèle a été utilisé avec les personnels du CRDA pour évaluer la pertinence d'une tarification de l'eau dans la zone en mesurant son impact sur le revenu des exploitations. Cette tarification se traduisait par une hausse de 50% du prix de l'eau dans notre modèle. L'impact – simulé sur modèle – de cette hausse sur la marge dégagée par les cultures irriguées était très variable (Figure 2-a). Les cultures les plus touchées étaient évidemment celles qui consommaient le plus d'eau par hectare et qui, comparées aux autres, ne dégagnaient pas de fortes marges par hectare (Figure 2-b). Ceci confirme que la tarification semble un bon levier pour décourager les activités à faible productivité de l'eau. Néanmoins, l'impact sur la marge dégagée par les exploitations agricoles était plus faible puisqu'il s'échelonnait entre 5% et 13% seulement (Figure 3-a). De plus, 13% des exploitations seulement, responsables de 17% du volume total d'eau prélevé pour l'irrigation, voyaient leur marge baisser de plus de 10% (Figure 3-b).

Cette représentation de la demande en eau qui met en avant l'échelle de l'exploitation apparaît une méthode efficace pour réfléchir à la gestion de cette demande. Cette modélisation des activités agricoles permet en effet de montrer l'impact variable d'une même mesure sur la population des usagers. Dans ces conditions, il devient raisonnable de penser que ces usagers auront toutes les chances de réagir de manière non uniforme, voire différente de celle attendue. Cette réflexion sur modèle est d'autant plus favorisée que le modèle est intelligible et simple à manipuler.

De cette expérience est née l'idée de concevoir un cadre de modélisation d'abord suffisamment générique pour représenter divers types d'activités anthropiques distribuées dans un espace géographique, et permettant ensuite de bâtir des modèles assez simples pour être mis en œuvre et aider les acteurs à réfléchir sur leurs activités et à leurs évolutions.

Figure 4 : Entité activité associée à un espace géographique



II-2 Définition d'un cadre de modélisation

Ce cadre de modélisation se veut à la fois simple et suffisamment générique pour représenter les activités anthropiques au sein d'un espace géographique. Il se fonde sur la définition d'un objet conceptuel représentant une *activité* de production qui peut être associée à un lieu dans un territoire.

II-2-1 Définition de l'entité « activité » associée à un lieu

L'entité « activité » est qualifiée par trois attributs (Figure 4) :

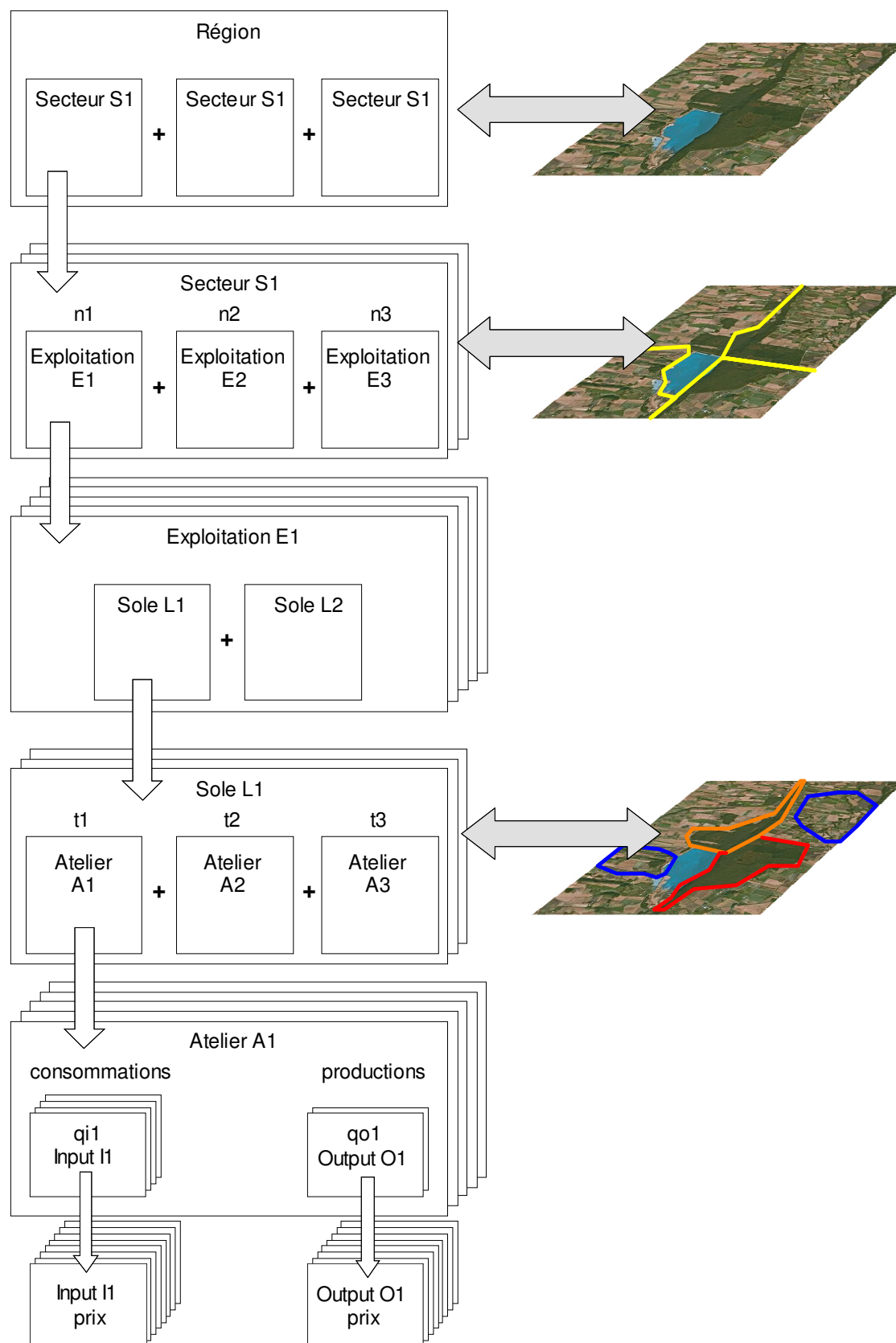
- 1) Une *localisation*, qui indique à quelle unité spatiale il est éventuellement associé. Cet attribut est facultatif.
- 2) Une *action de production*, qui est soit simple soit composite. Une action simple se traduit par la consommation d'*inputs* et la production d'*outputs*⁴⁹. Une action composite met en œuvre un ensemble d'entités « activité » (ces entités contenues sont les *activités-filles*, alors que l'entité les contenant est l'*activité-mère*).
- 3) Une *fonction de production*, qui permet de calculer les consommations et les productions. Pour une action simple, ces consommations et productions sont les quantités unitaires attribuées à chaque input et output. Pour une action composite, ces consommations et ces productions résultent de l'agrégation des activités-filles pondérées chacune par un poids qui représente l'importance de sa participation à l'activité-mère.

Pour conserver au cadre de modélisation sa simplicité, j'ai choisi de ne pas lui faire rendre compte des interdépendances entre entités ailleurs qu'à l'intérieur des entités composites. Dans ce dernier cas en effet, la fonction de production peut rendre compte des liens entre les activités-filles au travers leurs poids relatifs.

Les unités spatiales associées aux activités correspondent à plusieurs découpages d'un même espace géographique. Le découpage de l'espace associé à une entité-mère ne coïncide pas forcément avec celui associé à ses entités-filles. En revanche, les unités spatiales associées aux entités-filles appartiennent au même découpage.

⁴⁹ Input et output sont pris au sens classique de ce qui est consommé et de ce qui est produit par l'activité.

Figure 5 : Représentation de l'activité agricole d'une région



II-2-2 Application à la représentation de l'activité agricole à l'échelle régionale

Cette entité « activité » peut être utilisée pour représenter l'activité agricole associée à un territoire ou une région. Comme le représente schématiquement la figure 5, je propose d'envisager une *région* comme une entité composite associée à un espace géographique « R » et rassemblant un ensemble d'entités dénommées *secteurs*. Ces *secteurs* correspondent à une subdivision de la *région* et sont associés à un premier découpage de l'espace géographique « R ». Dans la fonction de production de la région, tous les *secteurs* ont le même poids (tous sont égaux à un). Chaque *secteur* est une entité composite rassemblant des *exploitations*-types, et le poids de chacune à l'intérieur du *secteur* est égal à son *effectif*. Une *exploitation*-type est également une entité composite qui rassemble diverses *soles* de poids identiques et égaux à un. Chaque *sole* est associée à un espace géographique correspondant à un second découpage de l'espace initial « R ». Une *sole* est une entité composite rassemblant plusieurs *ateliers* de production-type ; le poids de chacun correspond à sa *taille* dans la *sole*. Enfin, un *atelier* est une entité activité simple qui consomme des *inputs* et produit des *outputs* en certaines *quantités* unitaires. Ces *inputs* et *outputs* peuvent avoir des prix qui permettent de calculer un résultat économique pour chaque activité. Ce résultat économique, ainsi que les consommations et les productions, peuvent être agrégés grâce aux fonctions de production définies à l'échelle de chaque entité composite. Une *sole* est l'agrégation pondérée des *ateliers* qui la composent, une *exploitation* est l'agrégation de *soles*, un *secteur* est l'agrégation pondérée d'*exploitations*, et la *région* est l'agrégation des *secteurs*. Les découpages géographiques peuvent être utiles au calage du modèle : on peut en effet comparer les résultats agrégés associés à ces espaces avec des relevés et des enregistrements effectués dans ces mêmes espaces.

Après avoir construit un modèle décrivant les activités et le système de prix actuels, on peut imaginer des scénarios sur ces prix ou ces activités et simuler leurs conséquences sur les activités-mères. Ces scénarios portent sur les prix des *inputs* et *outputs*, ou sur les pondérations associées aux entités activités : les *quantités* dans un atelier, les *tailles* dans une *sole*, les *effectifs* dans un secteur. On mesure ensuite les conséquences de ce scénario (ou de cette combinaison de scénarios) sur l'agrégation des activités et sur leur résultat économique aux différents niveaux, notamment à celui des *soles*, des *exploitations*, des *secteurs* et de la région.

A partir de ce cadre, j'ai conçu, avec l'aide d'informaticiens, un environnement de modélisation, baptisé ZonAgri, dédié à la représentation de l'activité agricole d'une région au pas de temps annuel [C-24]. La conception de cet environnement, démarré en 2004, a connu plusieurs étapes marquées

par la réalisation de prototypes. Elle a abouti à la définition d'un cahier des charges de l'application qui a été finalisé en novembre 2007.

II-2-3 Cahier des charges d'un environnement de modélisation

L'environnement de modélisation ZonAgri permet : 1) la création d'une base d'objets qui servent à la construction du modèle, 2) la définition de scénarios qui portent sur les propriétés de ces objets et leur évolution pluriannuelle, 3) la simulation de ces scénarios et la constitution d'une base de données rassemblant les résultats, et 4) l'exploitation de ces résultats avec la construction de cartes. Le format des données en entrée comme en sortie offre la possibilité de les exploiter avec d'autres applications : tableur, gestionnaire de base de données, Système d'Information Géographique (SIG).

On distingue plusieurs familles d'objets utilisés pour la construction d'un modèle régional. Ces familles correspondent à la traduction informatique du cadre de représentation.

- Les inputs et outputs : chacun est associé à un prix moyen annuel avec, éventuellement, une distribution inégale au cours de l'année. Ce prix peut être défini à l'aide d'une formule de calcul faisant intervenir d'autres prix.
- Les ateliers : chacun consomme annuellement des inputs et produit des outputs en certaines quantités. Ces consommations et ces productions peuvent être distribuées à certaines périodes dans l'année. Chaque quantité annuelle peut être calculée à l'aide d'une formule où interviennent les quantités d'autres inputs et outputs de l'atelier.
- Les exploitations : chacune comporte une liste d'ateliers dont chacun est associé à une taille et éventuellement à un lieu de production. La taille d'un atelier peut être calculée à l'aide d'une formule dans laquelle intervient par exemple la taille de l'exploitation ou celle d'autres ateliers. Chaque lieu de production correspond à un espace géographique matérialisé sur la carte par un ensemble de polygones (dans le cadre de représentation, ces lieux étaient associés aux entités-soles).
- Les secteurs qui composent la région : chacun correspond à un espace géographique et contient des exploitations. L'effectif de chaque exploitation-type peut être calculé par une formule dans laquelle intervient par exemple l'effectif total d'exploitations dans le secteur ou celui d'autres exploitations-types.

- Les indicateurs : chacun d'eux est associé à une valeur annuelle. Cette valeur peut être calculée à l'aide d'une formule dans laquelle interviennent d'autres indicateurs. Ces indicateurs peuvent être utilisés dans toutes les formules de calcul, notamment dans l'expression des conditions⁵⁰.

Ces familles d'objets sont hiérarchisées : inputs et outputs sont utilisés dans les ateliers, qui sont eux-mêmes utilisés dans des lieux et des exploitations, lesquelles sont utilisées dans les secteurs, et les indicateurs sont accessibles par tous. Les secteurs et les lieux sont associés à des espaces géographiques définis dans les couches d'un SIG et repérés par leur nom. La distribution intra-annuelle de certaines valeurs (prix et quantités d'inputs ou outputs) s'effectue sur la base d'une subdivision de l'année en douze périodes, et cette subdivision, qui est choisie par l'utilisateur, est commune à l'ensemble des objets du modèle. La distribution intra-annuelle d'une valeur, qui est traduite en proportions, reste invariante d'une année à l'autre.

A partir du modèle construit sur une région, on crée des *simulations* qui sont composées de *scénarios*. Un scénario permet d'abord de modifier une valeur définie initialement pour un objet (la valeur annuelle et son éventuelle distribution) et ensuite de faire évoluer cette valeur de façon pluriannuelle. Un scénario peut être « universel » : toutes les activités qui utilisent l'objet sur lequel porte le scénario sont concernées par cette modification et par cette évolution. Ou bien ce scénario est restreint à certaines activités seulement situées plus haut dans la hiérarchie. Pour retenir ce scénario, on lui associe une *portée* qui précise les secteurs, les exploitations, les lieux, ou les ateliers qui sont concernés. Ceci offre la possibilité de modifier différemment la propriété d'un objet, un prix par exemple, selon celui qui le manipule, un lieu ou un secteur par exemple. Les scénarios peuvent également porter sur la valeur d'un indicateur, ce qui permet de faire évoluer de concert toutes les valeurs qui emploient cet indicateur dans leur formule de calcul.

Les résultats d'une simulation pluriannuelle constituent une base de données qui peut être exportée pour être exploitée par un tableur. Dans ZonAgri, l'exploitation des résultats s'effectue par des requêtes sur cette base de données. Le résultat d'une requête est distribué sur l'une ou l'autre des deux familles d'espaces géographiques (les secteurs et les lieux) pour produire une carte : le résultat associé à chaque espace est représenté par une couleur qui traduit sa valeur. La série de cartes (une par année de simulation ; et éventuellement par période au sein de chaque année simulée) peut être exportée pour être exploitée dans un SIG.

⁵⁰ Les formules peuvent contenir des instructions du type « si condition alors formule 1 sinon formule 2 ».

Ce cahier des charges a été remis à la fin de l'année 2007 à la société 3Liz, spécialisée dans le traitement d'images et les SIG. La première version du logiciel est attendue pour le début du second trimestre 2008.

Tableau 2 : Répartition des exploitations de la plaine de Kairouan selon leur type dans les sept secteurs.

	Abida	Chebika	El Karma	Hammad	Houfia	Ouled Khalfallah	Sidi ali ben Salem	Plaine aval	
Exploitations-types	Ia	4	0	2	74	25	57	8	170
	Ib	33	36	37	15	3	4	32	160
	IIa	2	0	1	29	39	2	8	81
	IIb	3	0	21	15	7	0	2	48
	IIIa	1	0	5	60	24	21	13	124
	IIIb	0	0	3	10	67	6	11	97
	IV	31	20	31	26	3	2	36	149
	Va	7	58	22	37	1	67	27	219
	Vb	29	8	9	6	3	3	24	82
	Vc	0	0	1	0	1	0	3	5
	VIa	11	128	27	84	1	95	20	366
	VIb	77	26	45	14	7	12	31	212
	VIc	1	2	3	1	1	0	2	10
	VIIa	20	102	28	39	1	108	16	314
	VIIb	50	16	9	10	5	3	20	113
	IXa	4	2	15	4	1	0	9	35
	IXb	22	0	3	3	0	3	8	39
	IXc	1	2	0	0	1	0	2	6
Total	296	400	262	427	190	383	272	2230	

Tableau 3 : Consommations et production d'un atelier de pastèque sous tunnel.

	quantité totale	unité	janv.	févr.	mars	avr.	mai	juin	juil.	août
inputs	semence pastèque hybride	5 500	plants							
	pépinière	5 500	plants							
	plastique et arceaux	600	kg							
	travail du sol motorisé	10	heures							
	binage culture attelée	2	jours							
	fumier	4	t							
	super 45% P	300	kg							
	ammonitrate	600	kg							
	nitrate de potasse	300	kg							
	nitrate de magnésium	200	kg							
	nitrate de calcium	100	kg							
	acide humique	40	l							
	acide phosphorique	20	kg							
	traitements phytosanitaires	250	Dinars							
	travail manuel	126	jours		20	22	4	32	48	
	eau d'irrigation	4 250	m ³		500	750	1000	1500	500	
outputs	pastèque type 1	15	t						15	
	pastèque type 2	15	t						15	
	pastèque type 3	10	t							10

II-3 Champ d'application du cadre de modélisation

L'environnement de modélisation que je propose semble offrir de vastes possibilités d'application. Néanmoins, il présente aussi certaines limites, et la démarche qu'il supporte se heurte à diverses contraintes. Avant de les aborder, je propose de mettre en œuvre « virtuellement » ce cadre sur le cas que j'ai traité en Tunisie (Cf. II-1-4) afin de concrétiser son contenu et ses fonctionnalités.

II-3-1 Des exemples sur la plaine de Kairouan

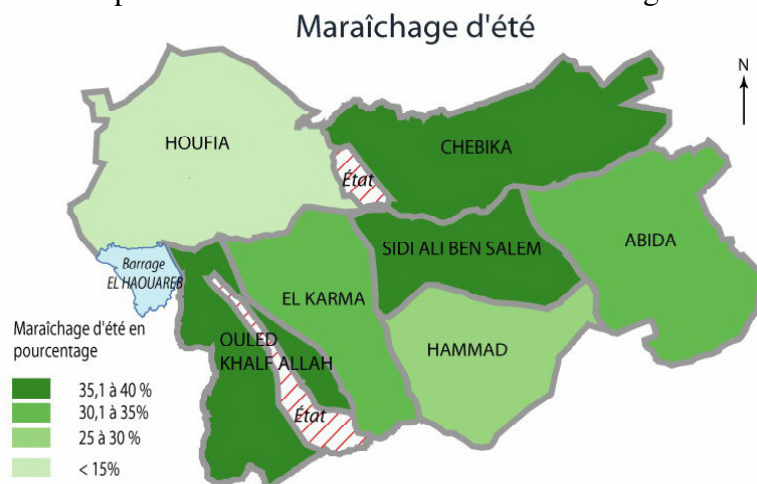
La zone étudiée dans la plaine de Kairouan couvre sept *imadas*, qui correspondent à nos cantons et qui, pour le CRDA de Kairouan, coïncident avec sept « secteurs ». L'ensemble de la zone étudiée pourrait donc être subdivisé selon ce premier découpage. Les exploitations inventoriées seraient alors regroupées par type et selon la localisation de leur siège. Chaque « secteur » dans le modèle correspondrait à une agrégation d'exploitations-types, pondérée par les effectifs indiqués dans le tableau 2.

Un second découpage spatial pourrait distinguer trois types de lieu de production : les PPI avec un réseau d'irrigation collectif, les zones irrigables depuis un puits ou un forage privé, et enfin les zones non irrigables. On pourrait ainsi confronter les résultats agrégés pour les PPI aux enregistrements effectués par l'administration. Mais cette distinction de lieux nécessiterait éventuellement de subdiviser les dix-huit types actuels d'exploitations selon la distribution de leurs ateliers de production dans ces divers lieux.

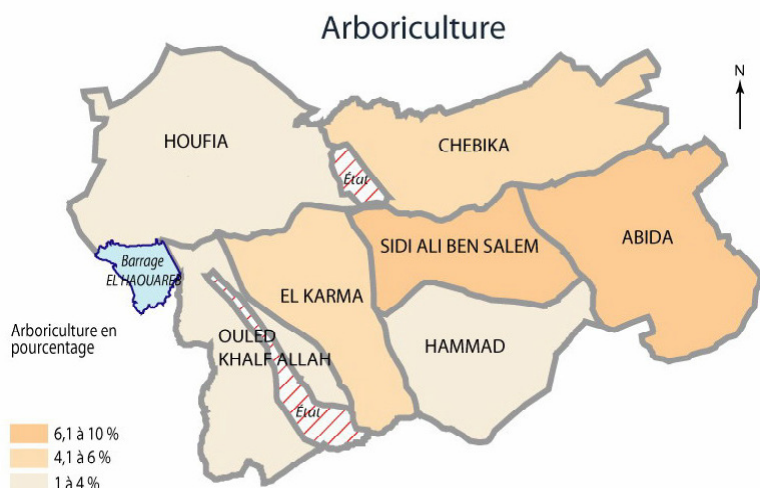
Les ateliers de productions-types seraient conservés sans modification. Néanmoins, l'environnement de modélisation permettrait de répartir dans l'année la consommation de certains inputs (notamment l'eau et le travail manuel), ou la production de certains outputs (les récoltes). Cette répartition intra-annuelle permettrait de faire apparaître des périodes de pointes de consommation ou de production. J'ai choisi de représenter ici (Tableau 3) un atelier de pastèques sous tunnel avec ses consommations d'eau pour l'irrigation et de travail manuel, ainsi que sa production de pastèques distribuée sur les douze mois de l'année. En output, plusieurs « pastèques » apparaissent : la première est récoltée début juin, la seconde mi-juin et la troisième début juillet. Chacune d'elles a un prix, le plus élevé correspond aux pastèques produites début juin et le plus faible à celles produites en juillet.

Figure 6 : Place du maraîchage d'été et de l'arboriculture dans l'assolement de chacun des secteurs en 2005 (les proportions sont exprimées en pourcentages de la surface irriguée) et répartition des puits, des forages et des périmètres publics irrigués.

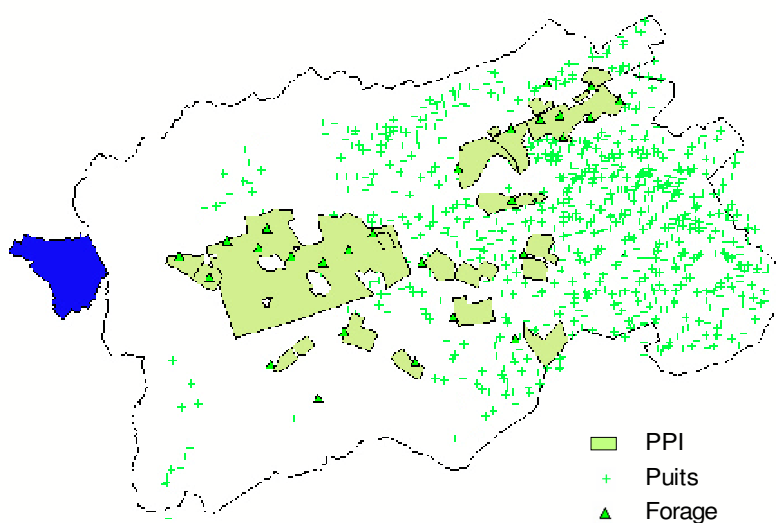
a - Proportion de surface consacrée au maraîchage d'été



b - Proportion de surface consacrée à l'arboriculture fruitière



c - Répartition des puits, des forages et des périmètres irrigués publics dans la plaine de Kairouan (source : programme MERGUSIE).



L'eau d'irrigation ferait partie des inputs. Plusieurs solutions de modélisation s'offrent car le prix de cette eau n'est pas homogène : elle est subventionnée pour la production de céréales irriguée dans les PPI, et son prix peut varier selon que la pompe est électrique ou entraînée par un moteur thermique... On pourrait par exemple définir deux inputs, l'un qui correspondrait à « l'eau normale » dont le prix est 0,070 Dinars/m³, et l'autre qui rendrait compte de « l'eau subventionnée » pour les céréales avec un prix égal à la moitié de celui de « l'eau normale ». Ce prix est donc calculé à l'aide d'une formule. On pourrait aussi ne créer qu'un seul input « eau » avec un prix fixé à 0,070 Dinars/m³, puis définir un scénario sur cet indicateur « prix de l'eau » restreint aux seuls ateliers de céréales irriguées (et éventuellement aux seuls lieux PPI), qui fixerait une nouvelle valeur égale à 0,035 Dinars/m³. On pourrait imaginer encore d'autres définitions qui permettent par exemple de faire évoluer simultanément des prix de l'eau différents en fonction des lieux de production...

Les inputs et outputs n'auraient pas forcément de prix. Ce serait par exemple le cas des résidus de certaines cultures (chaumes de céréales, résidus de culture de fèves...) qui sont utilisés sur place par le troupeau ovin. Néanmoins, dans les exploitations sans troupeau, les agriculteurs pourraient louer aux éleveurs leurs parcelles de fèves récoltées jusqu'à 100 Dinars/ha.

Ce dernier exemple montre un certain type d'interrelation entre deux ateliers : l'un des deux produit un output (les fanes et éteules de fève, les chaumes de blé, ou les déjections des troupeaux) qui peut être utilisé par un autre. Si ces deux ateliers appartiennent à la même exploitation, on peut traduire (en partie) cette interrelation en définissant la taille de l'un en fonction de la taille de l'autre. Mais si les ateliers appartiennent à deux exploitations différentes, l'environnement de modélisation ne permet pas de lier l'un à l'autre. Ces échanges entre « activités » sont souvent très complexes (c'est le cas, par exemple, pour l'échange entre exploitations de différents secteurs) et surtout, ils sont susceptibles d'évoluer. L'environnement proposé permet néanmoins d'utiliser un même nom pour un input et un output, à charge pour le modélisateur de faire des bilans entre les quantités de cet output produites et les quantités de cet input consommées au sein de chaque espace géographique par exemple.

Toujours grâce à cet environnement de modélisation, les résultats de l'agrégation des tailles d'ateliers au niveau des secteurs pourraient être cartographiés. Ici, j'ai utilisé la distribution des exploitations dans les sept secteurs pour calculer l'assolement dans chacun d'eux, et j'ai introduit ces résultats comme une nouvelle couche dans un SIG, en l'occurrence celui construit par le programme MERGUSIE. Les figures 6-a et 6-b indiquent la proportion du maraîchage d'été et de l'arboriculture dans l'assolement irrigué de chaque secteur. Ces proportions sont fortement

corrélées aux prélèvements d'eau puisque ces cultures sont celles qui en consomment le plus⁵¹ (voir Figure 2-b). Dans le SIG du programme MERGUSIE, on peut superposer ces cartes illustrant la répartition des usages de l'eau à celle indiquant la position des puits, des forages et des PPI dans la zone (Figure 6-c). On vérifie alors que les secteurs dans lesquels le maraîchage d'été et/ou l'arboriculture ont une place importante coïncident avec des espaces où la densité de puits, de forages ou de PPI est forte.

II-3-2 Les contraintes de la démarche et les limites du cadre proposé

La modélisation repose sur un recensement complet des exploitations situées dans la zone d'étude et la construction de typologies. Les services de statistiques agricoles peuvent mettre à disposition un inventaire ainsi que les caractéristiques structurelles des exploitations. Ces données servent alors à construire une classification sur des bases statistiques et à définir un échantillon raisonné sur lequel sera bâtie la typologie des exploitations. La typologie des ateliers part également de ces données. Elle utilise aussi des informations fournies par les services agricoles et les enquêtes dans les exploitations permettent de la préciser⁵². Les performances de ces ateliers (consommations et production) ne sont pas constantes, elles varient selon les conditions pédo-climatiques. L'usage de modèles biophysiques adaptés permet de rendre compte de ces variations.

L'existence de « statistiques agricoles » récentes constitue une première contrainte. On peut lever celle-ci en réalisant un inventaire avec l'aide de personnes-ressources⁵³. La seconde difficulté tient à la qualité de la coïncidence entre les découpages administratifs, qui déterminent l'inventaire, et la zone étudiée. L'absence de coïncidence entre un découpage administratif ou structurel de la zone et certains secteurs ou lieux dans le modèle réduit les possibilités de son calage. Enfin, le modèle construit sur la base de cet inventaire et de ces typologies constitue une photographie datée de la zone. Ceci limite donc la durée de sa validité, à moins que ne soit mis en place un dispositif de suivi qui permette de l'actualiser. Néanmoins, l'existence de données de base actualisées peut s'avérer une contrainte qui entrave la mise en œuvre de la démarche.

Le cadre de modélisation présente également de nombreuses limites. La première, qui est un choix méthodologique, tient au fait que ne sont pas prises en compte les interrelations entre activités. Chercher à représenter ces interrelations conduirait inévitablement à concevoir un modèle complexe, nécessitant beaucoup plus d'informations (celle-ci sont notamment l'objet des recherches en géoagronomie). Dès lors, ce modèle serait difficilement utilisable et difficilement modifiable par

⁵¹ On aurait tout aussi bien pu cartographier la quantité d'input « eau » consommée annuellement dans chaque secteur, au total ou par certains ateliers seulement.

⁵² Les méthodes utilisées pour construire ces deux typologies sont décrites en détail dans [R-12] annexé à ce document.

⁵³ Ces personnes (maires, conseillers agricoles...) connaissent les agriculteurs et leurs activités dans leur zone d'action.

les acteurs soucieux d'explorer le devenir de leur territoire. Car il s'agit en effet d'utiliser ce modèle pour explorer des possibilités au sein desquelles ces interrelations ont toutes les chances de changer. Il est donc nécessaire de les externaliser, tout en modélisant les éléments utiles pour dresser des bilans (comme dans le cas de l'usage des résidus de culture et de transfert de fertilité – Cf. II-3-1). La construction d'un modèle strictement déterministe constitue à mes yeux la seconde « simplification ». On peut envisager d'introduire des distributions pour les productions d'outputs grâce aux formules de calcul⁵⁴, et il suffirait alors de répéter les simulations plusieurs fois pour construire une distribution des résultats. Mais comment pourrait-on caler et valider le modèle, ou exploiter ses résultats ? Actuellement, seule me semble acceptable la solution qui consiste à effectuer des simulations déterministes pour différents types d'années climatiques (une année sèche, une année humide et une année moyenne par exemple).

En dehors de ces deux premières « simplifications », il existe à mes yeux deux principales limites qu'il s'agira de lever dans l'avenir. Tout d'abord, le couplage⁵⁵ des modèles d'activités avec des modèles biophysiques, qui rendent compte de l'état de la ressource et de son évolution, apparaît difficile. Si l'on peut l'envisager pour des activités simples, il en va autrement pour celles qui sont composites ou pour des entités « indépendantes ». Cette limite interdit donc le couplage (et non la liaison⁵⁶) entre un modèle d'activité avec un modèle d'évolution de la ressource. Ensuite, la dimension temporelle est actuellement prise en compte de manière extrêmement sommaire ou de façon totalement implicite. En effet, l'entité-activité proposée n'indique aucune « durée » de l'action de production, et le cadre de représentation se limite à une vision annuelle de la production agricole. De même, le découpage possible de l'année en sous-périodes est commun à tous les objets et la distribution de l'activité au cours de l'année est fixe⁵⁷. Or plusieurs activités peuvent fonctionner au sein de l'année sur des pas-de-temps différents, et, en agriculture irriguée, le maraîchage sous-serre peut voisiner avec des cultures annuelles et des plantations pérennes. Enfin, la succession d'activité au cours du temps (la succession de cultures sur une parcelle par exemple) ne peut pas être représentée aisément. Ainsi, notre modèle kairouannais ne rendait pas compte de la succession pluriannuelle des cultures.

⁵⁴ Il suffirait que le calcul fasse par exemple appel à une loi normale de moyenne et d'écart-type donnés.

⁵⁵ Il ne s'agit pas seulement d'utiliser les résultats de l'un pour faire fonctionner l'autre ; il s'agit de faire interagir les modèles comme dans les modèles biodécisionnels (Cf. Préambule).

⁵⁶ A la différence du couplage, la liaison entre deux modèles signifie l'utilisation des résultats de l'un en données d'entrée pour l'autre.

⁵⁷ On peut néanmoins trouver une solution de modélisation pour lever cette dernière contrainte : passer d'une activité distribuée d'une certaine manière à une autre, distribuée différemment, en utilisant des pondérations qui évoluent.

II-3-3 Applications envisagées

Depuis le début de l'année 2007, je participe à un programme de recherche financé par l'Agence Nationale de la Recherche (ANR) et intitulé « Quels agro-systèmes et quelles politiques publiques pour une gestion durable des ressources en eau ? » (APPEAU). J'ai élaboré avec Philippe Le Grusse le contenu du troisième volet (ou « *work package* ») de ce programme [S-05]. Ce troisième volet propose de construire avec les acteurs locaux une représentation du système dans lequel ils agissent, et d'utiliser cette représentation au sein d'un jeu de simulation (Piveteau, 1996 ; Gaudé, 2003) pour faciliter l'émergence de règles d'accès aux ressources en eau pour les différents usagers (Le Bars *et al.*, 2004 ; Le Grusse *et al.* 2006). Cette démarche sera mise en œuvre sur deux sites⁵⁸ où la problématique de la gestion de l'eau se pose différemment.

Dans la vallée de la Drôme, il s'agit du renouvellement du Schéma d'Aménagement et de Gestion des Eaux (SAGE). Les usages agricoles de l'eau se situent principalement en aval avec des prélèvements dans la rivière. L'agriculture est le moteur du développement économique : les productions agricoles, qui sont transformées sur place, facilitent l'installation d'ateliers d'élevage avicoles, et l'ensemble génère des emplois dans l'agro-industrie. En amont, les usages de l'eau à des fins touristiques prédominent. L'activité touristique, qui venait compléter les revenus agricoles, est devenue principale. Ces deux usages sont évidemment plus importants en été, époque où le débit est le plus faible. La construction d'un modèle régional de l'irrigation avec les représentants de la profession permettra de rendre compte de la demande agricole en eau, et surtout de l'impact économique de restrictions éventuelles. Les discussions avec les autres représentants des usagers pourront s'appuyer sur ce modèle.

Dans le Tarn et Garonne, nous travaillons avec la Communauté de Communes de Lomagne Tarn et Garonnaise (CCLTG). La mise en place des nouvelles règles de la Politique Agricole Commune (PAC) en 2004 a engendré de profonds changements d'orientation dans les exploitations, avec notamment un abandon de l'irrigation dans certaines d'entre elles⁵⁹. Aujourd'hui, de nouvelles questions se posent. Comment vont réagir les agriculteurs à l'envolée des prix des céréales et à la suppression du gel de terre obligatoire ? Comment exploiter au mieux les ressources en eaux distribuées dans les retenues ou par la Compagnie d'Aménagement des Coteaux de Gascogne ? Il faut aussi préparer la mise en place de la Directive Cadre Européenne sur l'Eau. Comment appliquer au mieux les mesures agri-environnementales visant à protéger la qualité des eaux, et quelles conséquences auront-elles sur le revenu des exploitations ?

⁵⁸ Les travaux, qui ont démarré depuis une année ont permis de rassembler les données nécessaires aux typologies, mais les modèles régionaux ne sont pas encore construits.

⁵⁹ Près d'un lac collinaire sur quatre n'est plus exploité.

Dans les deux cas, il s'agit de construire, avec les acteurs locaux, un modèle de l'activité agricole distribuée dans l'espace. Mais construire un modèle régional pour représenter la situation actuelle ne suffit pas, il faut l'utiliser pour « jouer au stratège en chambre ». Pour cela, il faut imaginer et tester des scénarios avec les acteurs ; la collaboration avec des spécialistes des jeux de simulation est alors nécessaire. Associé à des modèles biophysiques des processus agronomiques et hydrologiques, le modèle régional pourra servir de plateforme de jeu aux agriculteurs représentant les diverses exploitations-types. Ce jeu consistera à mettre ces acteurs en situation de décision face aux changements envisagés. Après agrégation des choix individuels, les conséquences de ces choix individuels seront évaluées à l'échelle régionale au plan des résultats économiques, comme au plan de l'exploitation et de l'évolution des ressources. Ces conséquences « globalisées » serviront alors à critiquer les choix individuels.

Pour la Lomagne, on peut se contenter d'un « jeu » avec les agriculteurs seuls. Mais le SAGE de la Drôme concerne d'autres catégories d'acteurs. Il faudra donc aller plus loin. Tout d'abord, il sera nécessaire d'élaborer un modèle des activités pour chaque catégorie d'usage. Puis un autre, constitué de l'activité agrégée de chacune de ces catégories et destiné à confronter les usages. Le jeu avec les différents types d'usagers pourra alors permettre à chacun d'eux de prendre connaissance des points de vue des autres.

Si le cadre proposé s'avère pertinent dans la Drôme pour rendre compte d'usages multiples, il peut alors être utilisé à l'échelle d'un plus grand bassin. Pourquoi pas celui du fleuve Niger, par exemple, qui a été choisi comme « bassin de référence » pour le Challenge Programme Eau et Alimentation⁶⁰ (CPWF) ? Il s'agirait d'utiliser le principe d'emboîtement des activités que propose mon cadre de modélisation pour représenter les résultats de travaux menés à différentes échelles et pour tester la cohérence de l'ensemble.

⁶⁰ Le CPWF, initié par le Groupe Consultatif pour la Recherche Agricole Internationale (CGIAR), est un programme de recherche international et multi-institutionnel dont le but est d'accroître la productivité de l'eau utilisée en agriculture et de réduire sa consommation, de manière à couvrir les autres usages, notamment environnementaux. Les travaux sont réalisés sur neuf bassins versants jugés caractéristiques, auxquels le bassin du Niger a été ajouté sur initiative française (la France, qui dispose d'une longue expérience sur le bassin du Niger, finance des travaux sur ce dixième bassin).

Conclusion

Benoît *et al.* (*op. cit.*), qui ont développé l'approche « géoagronomique », concentrent l'analyse et la modélisation sur les interrelations dans la trilogie « acteurs – activités – territoires ». Ces méthodes sont tout à fait pertinentes pour la compréhension de ces interrelations. L'approche que je propose est complémentaire de la leur et davantage orientée vers l'action. Elle focalise l'analyse et la modélisation sur les activités et rend compte de leur répartition spatiale, sans intégrer les interactions dans le modèle. Cette externalisation des interactions donne de la simplicité au modèle, ce qui favorise son appropriation par les acteurs et son utilisation pour la gestion (Axelrod, 1997; Conte, 1997). La spatialisation des résultats des activités et leur superposition avec d'autres cartes constituent ensuite des bases efficaces de réflexion sur les interrelations, notamment entre usages et ressources, et sur leurs évolutions possibles. Car c'est l'évolution de ces interrelations qui est au cœur de l'anthropisation des milieux, de sa maîtrise et de son caractère durable.

L'objectif de la présentation de ce mémoire est de pouvoir diriger des travaux de recherche, notamment des thèses. J'envisage dès à présent deux sujets qui s'inscrivent dans ce projet.

Le premier sujet concernerait l'évaluation de l'anthropisation d'un grand bassin à l'aide d'une représentation définie sur la base d'entités-activités comme celles que je propose. Il s'agirait tout d'abord de montrer comment les diverses ressources - l'eau, mais aussi la force de travail ou l'espace, comme dans la vallée et le delta du fleuve Sénégal par exemple - sont partagées entre plusieurs activités. Il faudrait ensuite vérifier si cette représentation permet aux acteurs – et aux chercheurs – d'émettre leur diagnostic sur le partage actuel des ressources, puis il importerait de réfléchir à de nouveaux partages en fonction des évolutions prévisibles des activités. Un objectif commun pourrait alors s'imposer aux acteurs : maîtriser l'efficacité économique et la durabilité sociale et environnementale de leurs activités.

Un second sujet s'attacherait à la prise en compte explicite du temps dans l'entité-activité et dans les représentations qui les utilisent. L'ajout de la dimension temporelle permettrait dans une première étape de représenter un processus de production simple (consommation – production) ou de coupler une activité simple avec un modèle biophysique de même nature (un modèle biophysique qui représente le processus sur lequel est fondé l'activité). La seconde étape concernerait la représentation d'une succession d'activités dans le temps. Pour ces deux étapes, une analyse bibliographique devrait indiquer des voies susceptibles de combiner des processus et des

successions qui fonctionnent à des rythmes différents. La dernière étape enfin exigerait d'envisager le couplage entre un modèle d'activité – comme celui que j'ai proposé pour une petite région agricole par exemple – et un modèle biophysique d'évolution d'une ressource – l'eau par exemple. A chaque étape, il faudrait également mesurer le coût du nouveau principe de modélisation, et chercher à résoudre la difficulté de construire des modèles compatibles avec des acteurs capables de les mettre en oeuvre.

Ces travaux s'efforceront avant tout d'effectuer une revue bibliographique sur les modes de représentation des environnements anthropiques. Cette revue aura pour but d'analyser l'originalité du cadre de modélisation proposé en le resituant par rapport à d'autres travaux fondés sur l'usage combiné de SIG et relatifs à une anthropisation du milieu, notamment dans le champ de l'aménagement des territoires.

3^{ème} Partie

CURRICULUM VITAE

ET

LISTE DES PUBLICATIONS

III-1 Curriculum Vitae

III-1-1 Diplômes et cursus à l'IRD

III-1-1-1 Diplômes

- ❑ Ingénieur agronome INA-PG, spécialisation « productions végétales », 1981.
- ❑ Diplôme ORSTOM, 1983.
- ❑ DEA « méthodes scientifiques de gestion », université Paris-Dauphine, 1991.

III-1-1-2 Cursus à l'IRD

J'ai commencé ma carrière à l'ORSTOM en octobre 1981, juste après l'obtention de mon diplôme d'ingénieur agronome.

- ❑ **1981-1982 : Accueil au laboratoire INRA-ESR de Grignon (direction J.M. Attonaty)**

Activités de recherche :

Conception et réalisation d'un « agenda agricole informatisé » pour le suivi des parcelles dans les exploitations agricoles (histoire culturelle, histoire des matériels, calculs technico-économiques).

- ❑ **1982-1985 : ORSTOM Bouaké (Côte d'Ivoire)**

Activités de recherche :

Diagnostic sur la gestion technique des unités de production utilisant la motorisation intermédiaire en moyenne Côte d'Ivoire (projet de développement de la Compagnie Ivoirienne de Développement des Textiles).

Partenariat :

Institut des Savanes (IDESSA, institut de recherche agronomique ivoirien).

- ❑ **1985-1986 : Accueil au laboratoire de biométrie et dynamiques des populations de l'Université Claude Bernard – Lyon I (direction J.M. Legay)**

Activités de recherche :

Valorisation des travaux menés en Côte d'Ivoire et analyses de données uni- et multivariées.

- ❑ **1986-1992 : Accueil au laboratoire INRA-ESR de Grignon (direction J.M. Attonaty)**

Activités de recherche :

Participation au programme de recherche conjoint INRA-SAD – INRA-ESR sur la réduction des charges de structures dans les exploitations agricoles de grandes cultures.

Conception de Systèmes Interactifs d'Aide à la Décision (SIAD) utilisant des techniques d'Intelligence Artificielle (systèmes experts, langages orientés objets, traitement du langage naturel) et des Systèmes de Gestion de Bases de Données.

Formation :

Sessions de formation aux systèmes experts et à la programmation « orientée objet » (ENSAA Dijon, CIRAD, ORSTOM, Assemblée Permanente des Chambres d'Agriculture).

Valorisation :

3 articles de vulgarisation dans la revue professionnelle « Perspective Agricole ».

2 logiciels informatiques (OTELO et DéciBlé)

1 bibliothèque de génie logiciel (bibliothèque C Grignon)

□ 1992-1999 : Centre IRD-Dakar (Sénégal)

Activités de recherche :

Responsable du volet agronomique du programme de recherche développement ORSTOM-ISRA sur le développement de l'agriculture irriguée en moyenne vallée du Sénégal en partenariat avec l'ADRAO.

Participation aux travaux de la composante « intensification rizicole » du Pôle régional CORAF de recherche sur les Systèmes Irrigués sahéliens (PSI-CORAF, financement FAC).

Partenariat :

Institut Sénégalais de Recherche Agronomique (ISRA),

Association pour le développement de la Riziculture en Afrique de l'Ouest (ADRAO).

Centre International de Recherche Agronomique pour le Développement (CIRAD).

Centre National de Recherche Agronomique pour le Développement Agricole (CNRADA, Mauritanie).

Institut d'Economie Rurale (IER, Mali).

Société d'Aménagement et d'Exploitation des terres du Delta et de la vallée du Sénégal (SAED, Sénégal).

Animation de la recherche :

Co-direction du programme franco-sénégalais ORSTOM-ISRA.

Rédaction du projet scientifique du PSI-CORAF.

Appui aux coordonnateurs régionaux des composantes « intensification » et « diversification » pour la synthèse des travaux du PSI-CORAF.

Révision des communications dans les composantes « intensification », « diversification » et « gestion technique et organisation sociale et foncière de l'irrigation » pour la publication des actes du séminaire de restitution des travaux du PSI-CORAF.

Formation :

Encadrement d'un DEA, de 2 DESS et de 8 mémoires d'ingénieur.

Valorisation :

Auteur scientifique du documentaire « Paysan du Fleuve », collection vidéo ORSTOM, financement ORSTOM-FED-SAED.

Contribution au reportage sur l'agriculture durable au Sénégal réalisé par les « Jeunes Reporters pour l'Environnement » (Office Français de la Fondation pour l'Education à l'Environnement en Europe).

Réalisation du logiciel RIDEV (simulation du développement du riz irrigué au Sahel) en collaboration avec l'ADRAO, et du logiciel CalCul (construction d'un calendrier cultural prévisionnel pour la conduite du riz irrigué à l'échelle d'un aménagement).

□ **1999-2004 : Centre IRD – Montpellier.**

Activités de recherche :

Valorisation des travaux menés au Sénégal, en Mauritanie et au Mali.

Intégration dans l'US 048 « Dynamique, Impact et Valorisation des Hydro-Aménagements » avec participation aux chantiers MERGUSIE (évaluation de la demande agricole en eau et de sa valorisation en Tunisie) et Domaine du Merle (gestion du tour d'eau et croissance du foin de Crau).

Animation de la recherche :

Participation à la rédaction du projet scientifique de l'UR 067 Ariane (Interactions entre constituants et transferts dans les sols tropicaux à fortes contraintes).

Direction de l'UR Ariane (juillet-décembre 2001).

Participation au comité de pilotage du Programme Commun sur les Systèmes Irrigués (PCSI) associant Cemagref, Cirad et IRD

Montage du programme SIRMA (économies d'eau en Systèmes Irrigués au Maghreb) financé sur Fonds de Solidarité Prioritaire du MAE.

Formation :

Encadrement de la thèse de M. Dicko (direction : J. Wéry, ENSAM), d'un Master of Science (CIHEAM-IAMM) et d'un mémoire d'ingénieur. Participation à l'enseignement (niveau Master) à l'Institut Agronomique Méditerranéen de Montpellier et à l'Institut National Agronomique de Tunisie.

Valorisation :

Conception et réalisation du site web du PCSI.

□ **2004-2006 : Mission IRD – Tunis.**

Activités de recherche :

Evaluation et répartition de la demande agricole en eau et de sa valorisation dans le bassin du Merguellil (Programme franco-tunisien MERGUSIE).

Animation de la recherche :

Représentant institutionnel et membre des comités scientifiques des programmes « Water Demand knowledge base in the Mediterranean » (WADEMED, financement UE INCO-MED) et « économies d'eau en Systèmes Irrigués au Maghreb » (SIRMA, financement MAE-FSP).

Animation du programme APPIA (« Amélioration des Performances sur les Périmètres Irrigués en Afrique », MAE-FSP).

Montage du programme « Quels agro-systèmes et quelles politiques publiques pour un gestion durable des ressources en eaux » (APPEAU) financé par l'Agence nationale de la Recherche (programme stratégique Agriculture et développement Durable).

Membre élu de la Commission Générale de la Recherche et de ses Application n°1 à l'IRD

Formation :

Encadrement de 3 thèses (G. Lacombe, A. Imache et R. Mahjoubi), 3 DESS en informatique (Université Montpellier 2), 1 DEA « développement agricole » (INA-PG).

□ **Depuis septembre 2006 : IRD – Montpellier, UMR G-eau, Institut Agronomique Méditerranéen/Maison des Sciences de l'Eau.**

Activités de recherche :

Modélisation des activités agricoles à l'échelle régionale, évaluation de la demande en eau d'irrigation et de sa valorisation (programmes SIRMA et ADD-APPEAU).

Animation de la recherche :

Représentant institutionnel et membre des comités scientifiques des programmes WADEMED et SIRMA.

Co-responsable scientifique du volet n°3 du programme ADD-APPEAU.

Membre élu de la Commission de Gestion de la Recherche et de ses Applications n° 1 (CGRA1) « Ingénierie et Expertise » de l'IRD.

Formation :

Encadrement de 4 thèses (G. Lacombe, A. Imache, R. Mahjoubi et S. Omari) et 2 masters.

Participation à l'enseignement de master à l'Institut Agronomique Méditerranéen de Montpellier.

Valorisation :

Finalisation du logiciel ZonAgri (représentation des activités agricoles à l'échelle régionale et scénarios d'évolution).

III-1-2 Enseignement, encadrement et diffusion des connaissances

III-1-2-1 Enseignement et encadrement

Enseignement

- 1988 - 1992 : *Formation aux systèmes experts et à la programmation orientée objet* (session de 4 à 5 jours). Formations professionnelles au CIRAD à Montpellier à destination des chercheurs et ingénieurs, et à l'Assemblée Permanente des Chambres d'Agriculture à destination des conseillers agricoles. Formation aux étudiants de 3^{ème} année de l'Ecole Nationale Supérieure des Sciences Agronomiques Appliquées de Dijon.
- 2003 – 2005 : *Conférences sur les modèles agronomiques dans les outils de gestion* aux étudiants de seconde année de Master à l'Institut Agronomique Méditerranéen de Montpellier (IAMM) et à l'Institut National Agronomique de Tunis (INAT).
- 2006 - : *Participation à l'enseignement du master IAMM « Développement rural », option « Gestion agricole et environnement »* (typologie, modélisation, statistiques).

Jury de thèse

- 2006 : *Jihène ABID KARAY*, étudiante tunisienne. Directeurs de thèse : J.P. Lhomme et N. Ben Mechlia. Ecole Nationale Supérieure d'Agronomie de Montpellier – Université Montpellier II,

sciences du sol. Bilan hydrique d'un système de cultures intercalaires (olivier - culture maraîchère) en Tunisie centrale : approche expérimentale et essai de modélisation.

Encadrement de thèses

Je participe actuellement à 4 comités de pilotage de thèses et j'ai encadré 1 thèse auparavant. Quatre de ces thèses sont ou ont été réalisées par des étudiants des pays partenaires.

- ❑ 2001 - 2004 : *M. Dicko*, ingénieur de recherche malien travaillant à l'Institut d'Economie Rural du Mali. Directeur de thèse : J. Wery. Thèse en agronomie (Ecole Nationale Supérieure d'Agronomie de Montpellier). Fonctionnement d'une parcelle rizicole à l'Office du Niger (Mali), effet de l'alcalinisation des sols sur l'efficacité des apports d'azote.
- ❑ 2005 – 2007 : *G. Lacombe*, étudiant français. Directeurs de thèse : E. Servat et P. Le Goulven. Thèse en hydrologie (Université Montpellier II). Modélisation des retenues collinaires considérées comme des ensembles Ressources-Usages. Application en Tunisie centrale.
- ❑ 2005 – 2007 : *R. Mahjoubi*, étudiant tunisien. Directeur de thèse : G. Flichmann. Thèse en économie (Ecole Nationale du Génie Rural et des Eaux et Forêts de Montpellier, Institut Agronomique Méditerranéen de Montpellier). Modélisation multicritère et gestion collective de l'exploitation d'une ressource en eau en accès libre.
- ❑ 2006 - : *A. Imache*, étudiant algérien. Directeur de thèse : P. Le Goulven. Thèse en hydrologie (Ecole Nationale du Génie Rural et des Eaux et Forêts de Montpellier, Université Montpellier II). Gestion des eaux de surfaces et usages des eaux souterraines dans le périmètre de la Mitidja Ouest.
- ❑ 2006 - : *S. Omari*, étudiante marocaine. Directeur de thèse : J.P. Bord. Thèse en géographie (Université Montpellier III). Modèles agro-économiques et système d'information géographique pour l'aménagement du territoire et la gestion de l'eau – Application au périmètre du Gharb (Maroc).

Encadrement de mémoires d'étudiants

J'encadre actuellement 2 travaux de Master of Science, et j'ai encadré par le passé 15 travaux d'étudiants. Au total, 2 mémoires de DEA, 5 mémoires de DESS, 9 mémoires d'ingénieur, et 3 mémoires de Master. Tous ces travaux se sont déroulés sur une période supérieure à 3 mois, la grande majorité ayant duré 5 à 6 mois ; les travaux des étudiants de l'IFAID ont duré deux ans. Cinq de ces étudiants sont issus des pays partenaires.

- ❑ *L. Derouard*, DESS « Gestion des systèmes agro-sylvo-pastoraux en zone tropicale », Université Paris XII-Créteil (1993). Gestion technique des systèmes rizicoles irrigués dans la vallée du Sénégal.

- *E.D. Bigueme Bassanena III*, Diplôme d'Agronomie Tropicale (niveau DESS), Centre National d'Etudes Agronomiques des Régions Chaudes, Montpellier (1993). Systèmes de culture maraîchère et dynamique de population de nématodes dans les niayes de la presqu'île de Dakar.
- *O. Barretteau*, DEA, Ecole Nationale du Génie Rural et des eaux et Forêts (1994). Gestion de l'irrigation dans les périmètres irrigués de la vallée du Sénégal.
- *J.L. Maeght*, ingénieur, IFAID Aquitaine, Bordeaux (1994-1996). Impact des pratiques culturales sur la croissance et le rendement du riz, et effets sur l'évolution de la salinité.
- *E. Auroux et C. Chombart*, ingénieurs agricoles, Institut Supérieur d'Agriculture de Lille (1995). Elaboration du rendement du riz dans les parcelles irriguées de la vallée du Sénégal.
- *S. Hanouët*, ingénieur, Ecole d'Ingénieurs Agro-Développement International (ex ISTOM), Le Havre (1996). Diagnostic agronomique en parcelles paysannes dans la vallée du Sénégal.
- *V. Rousselin*, élève de 2^{ème} année, Institut National Agronomique Paris-Grignon (1996). Dynamique de levée du riz irrigué et des adventices au Sénégal, influence de l'épaisseur de la lame d'eau.
- *T. Neuts*, ingénieur, IFAID région Aquitaine, Bordeaux (1996-1997). Interactions entre apport d'azote et infestation de nématodes sur la croissance du riz irrigué au Sénégal.
- *M.L. Marcel*, ingénieur agronome, Institut National Agronomique Paris-Grignon (1997). Influence du micro-relief et de la lame d'eau sur la dynamique de levée du riz irrigué, cas des rizières de la vallée du Sénégal.
- *A. S. Sall*, ingénieur, Institut de Formation et d'Appui aux Initiatives de Développement (IFAID), région Rhône-Alpes, Lyon (1998-1999). Gestion des calendriers culturels dans les exploitations agricoles à l'Office du Niger (Mali).
- *J. Champion*, ingénieur agricole, Institut Supérieur d'Agriculture de Purpan (2002). Typologie des itinéraires techniques pour les cultures de pastèque et melon dans la plaine de Kairouan.
- *F. Djouabi*, Master of Science « Sociétés rurales, territoires et gestion des ressources naturelles », Institut Agronomique Méditerranéen de Montpellier (2003). Gestion de l'eau dans les exploitations de foin de Crau.
- *B. Pettinotti*, DESS informatique, Université Montpellier 2 (2004). Représentation technico-économique des activités agricoles à l'échelle régionale. Conception d'un logiciel dans l'environnement OdéfiX.

- *A. Ben Mihoub*, DEA sciences économiques et sociales, mention « développement agricole », Institut National Agronomique Paris-Grignon (2005). Typologie des exploitations agricoles et de ateliers de production dans la plaine de Kairouan.
- *D. Quaranta*, DESS informatique, Université Montpellier 2 (2005). Réalisation de l'environnement de modélisation ZonAgri voué à la représentation technico-économique des activités agricoles à l'échelle régionale.
- *J.P. Adamiste*, DESS informatique, Université Montpellier 2 (2006). Réalisation de la version 1 du logiciel ZonAgri, environnement de modélisation.
- *Laurent Brunel*, Master of Science « Développement Rural », Institut Agronomique Méditerranéen de Montpellier (2006-2007). Modèle régional de la demande agricole en eau en Val de Drôme.
- *Farida Hassani*, Master of Science « Sciences du Sol », Institut National Agronomique d'Alger (2006-2007). Pratiques agricoles et salinisation des sols dans le périmètre du Bas Chélif.

III-1-2-2 Valorisation et diffusion des connaissances

Articles de vulgarisation

Les travaux menés à l'INRA ont fait l'objet de 3 articles dans la revue professionnelle « Perspective Agricole » [V-02, V-03, V-04]. Ceux réalisés au Sénégal ont fait l'objet d'un « Dossier » dans la revue ORSTOM Actualités [V-05] et d'un article dans « Les Dossiers de Sciences au Sud » [V-06], la nouvelle revue de l'IRD. Les programmes FSP-SIRMA et INCO-WADEMED ont également fait l'objet d'un article dans la revue Sciences au Sud [V-07].

Document vidéo, presse écrite et audiovisuelle

Pour diffuser les résultats de nos travaux menés au Sénégal et transmettre notre compréhension du développement de l'irrigation, Pascal Boivin et moi avons réalisé, sur financement du Fonds Européen de Développement, un documentaire vidéo intitulé « Paysan du Fleuve » [D-01]. Ce documentaire, d'une durée de 26 minutes, a été diffusé plusieurs fois sur la chaîne de la Radio Télévision Sénégalaise.

A l'occasion de sa « sortie » en 1997, deux séances en « avant-première » ont été organisées aux Centres Culturels Français de St-Louis du Sénégal, et de Dakar avec une présentation à la presse écrite et radio-diffusée. Ce même documentaire a fait l'objet d'une projection-débat l'année suivante aux élèves des lycées lors de la Fête de la Science au centre Culturel Français de St-Louis.

Reportage

Un reportage intitulé « Agriculture irriguée durable dans la vallée du Sénégal » a été effectué en 1997 par 15 « Jeunes Reporters Pour l'Environnement », issus de 5 pays européens, sous l'égide de la Fondation pour l'Education à l'Environnement. Cette fondation permet à de jeunes lycéens européens de s'initier aux problèmes environnementaux. A la demande des organisateurs de la fondation, j'ai guidé les « jeunes reporters » sur le terrain, afin qu'ils prennent connaissance de la situation de l'agriculture irriguée et qu'ils rencontrent mes partenaires scientifiques de l'ISRA et de l'ADRAO, mes partenaires de la SAED à la Direction Générale à St-Louis et dans la délégation de Podor, ainsi que les paysans avec lesquels j'ai longuement travaillé.

Relecture pour revues scientifiques

Après avoir effectué plusieurs relectures d'articles pour une revue ivoirienne d'agronomie, l'éditeur de la nouvelle revue « African Journal of Agricultural Research » m'a demandé de faire partie des membres du comité éditorial. Je suis également sollicité de manière régulière par les revues « CAB Reviews: Perspectives in Agriculture, Veterinary Science, Nutrition and Natural Resources », « Agronomy for Sustainable Development » et « Sécheresse » pour la relecture d'articles.

III-1-3 Partenariat et développement

III-1-3-1 Partenariats scientifiques

Lors de mon accueil au laboratoire INRA d'Economie et Sociologie Rurales de Grignon, les travaux de l'équipe dirigée par J.M. Attonaty et auxquels j'ai participé, étaient menés avec l'équipe Systèmes Agraire et Développement présente également sur le site de Grignon : l'équipe SAD apportait la dimension agronomique et l'équipe ESR apportait les dimensions gestion et modélisation. Cette collaboration a d'abord concerné la modélisation de l'organisation du travail dans les exploitations de grandes cultures [C-03, C-05 à C-07, V-02, V-03] puis celle de la conduite du blé d'hiver [C-04, C-08, L-02, R-08]. L'expérience de l'équipe ESR dans les domaines de l'aide à la décision et de l'intelligence artificielle [G-07, S-03] a abouti à proposer un nouveau type d'instrument d'aide à la décision fondé sur la représentation du mode de gestion du décideur et sa simulation face aux aléas climatiques. Cette proposition venait appuyer les travaux de l'équipe SAD sur les modèles d'action des agriculteurs⁶¹.

⁶¹ M. Sebillote, L.G. Soler, 1989. *Les processus de décision des agriculteurs. Acquis et questions vives*. In J. Brossier, B. Vissac et J.L. Lemoigne (Eds) « Modélisation systémique et système agraire », Actes du séminaire du département Systèmes Agraires et Développement, St-Maximin, 2-3 mars 1988. INRA, Paris, pp. 93-101.

Mes travaux au Sénégal ont été conduits en partenariat tout d'abord avec l'Institut Sénégalais de Recherche Agricole avec lequel nous avons organisé en 1994 un séminaire pluridisciplinaire à St Louis et l'édition d'un ouvrage [O-03] couvrant les différentes facettes des recherches menées sur le développement de l'irrigation dans la vallée du Sénégal. Mes travaux étant focalisés sur la riziculture irriguée, j'ai été conduit à travailler avec l'Association pour le Développement de la Riziculture en Afrique de l'Ouest (ADRAO). Ces travaux ont abouti à la production du logiciel RIDEV [L-03, G-11] et à des publications communes [R-06, R-07, O-05, O-07]. Dans le cadre du Pôle de recherche CORAF sur Systèmes Irrigués sahéliens (PSI-CORAF), ce partenariat s'est élargi aux Centres Nationaux de Recherche Agronomique de Mauritanie et du Mali. Il a abouti à de nombreuses co-publications : 5 communications au séminaire de restitution du PSI-CORAF [C-12 à C-16] et 2 articles dans des revues internationales [R-10, R11]. Ce partenariat s'est également traduit quelques années plus tard par l'encadrement de la thèse de Mohamed Dicko, ma participation aux « Journées de l'Irrigation en Afrique de l'Ouest et du Centre » en 2001 [C-18] et ma participation depuis 2005 au programme FSP Amélioration des Performances sur les Périmètres Irrigués en Afrique. Ce programme intéresse en effet le Sénégal, la Mauritanie, le Mali et le Burkina Faso. Il s'agit de constituer une « boîte à outils » logicielle pour la gestion des systèmes irrigués. Cette boîte à outil proposera différents logiciels d'aide à la décision, notamment RIDEV et CalCul, ainsi qu'une base de données pour rassembler les références nationales sur les activités agricoles des exploitations agricoles irriguées.

Au Maghreb, mes travaux ont été conduits dans le cadre de programmes binationaux (programme MERGUSIE) et internationaux (programmes FSP-SIRMA et INCO-WADEMED) où interviennent l'Institut National Agronomique de Tunisie et l'Institut de Recherche en Génie Rural et des Eaux et Forêts pour la Tunisie, l'Institut National Agronomique d'Alger pour l'Algérie, l'Institut Agronomique et Vétérinaire Hassan II et l'Ecole Nationale d'Agriculture de Meknès pour le Maroc. Ce partenariat dépasse le seul aspect institutionnel puisque nous contribuons ensemble au programme WADEMED et que nous collaborons dans des actions de recherche communes : programme MERGUSIE en Tunisie, actions structurantes SIRMA sur la salinité (AS1-SIRMA) dans une oasis tunisienne et dans le périmètre du bas Chélif en Algérie, et sur les performances de l'irrigation (AS2-SIRMA) dans les périmètres de la Medjerdah en Tunisie, de la Mitidja ouest en Algérie, et du Gharb au Maroc.

En France, j'ai participé en 2006 au montage du programme « Quels agro-systèmes et quelles politiques publiques pour une gestion durable des ressources en eau ? » (APPEAU), qui associe 7 unités mixtes de recherche, dont G-eau. Ce programme, qui est financé par l'Agence Nationale de la

Recherche dans le cadre du programme stratégique « Agriculture et Développement Durable » (ADD), a démarré début 2007. Les travaux du troisième volet dont je suis responsable avec P. Le Grusse concernent deux chantiers français et utilisent une démarche identique à celle mise en œuvre sur les sites maghrébins de SIRMA.

III-1-3-2 Relations avec le développement

La plupart de mes travaux de recherche ont concernés directement le développement.

En Côte d'Ivoire, mes travaux concernaient un projet de développement de la motorisation mené par la Compagnie Ivoirienne de Développement des Textiles. Nous avons proposé d'améliorer les indicateurs de suivi des exploitations ayant adhéré au projet, notamment ceux concernant la mise en place de plusieurs cycles culturels [G-02].

Lors de mon accueil à l'INRA, j'ai mené mes travaux avec les Centres de Gestion de la région Picardie et l'Assemblée Permanente des Chambres d'Agriculture. Le logiciel OTELO [L-01, G-05] a été diffusé auprès des conseillers agricoles et des agriculteurs par la structure « Agro-Transfert », chargée de diffuser les produits de la recherche, et créée à l'initiative du Conseil Régional de Picardie et de l'INRA.

Au Sénégal, j'ai proposé, avec mon collègue pédologue P. Boivin, à la SAED (société d'Etat chargée des aménagements et du développement de l'irrigation dans la vallée du Sénégal) un programme de recherche-développement pour l'amélioration de la production rizicole et la préservation de la ressource en sols dans la moyenne vallée du Sénégal. Le financement de cette opération a été assuré par le Fonds Européen de Développement. Cette opération, comportant un volet pédologique, mené par P. Boivin, et un volet agronomique, dont j'étais responsable, a duré 4 ans, pour un financement total de l'ordre de 150 000 €. Nous avons fournis des rapports annuels [G-08, G-09, G-10] ainsi qu'un rapport final [G-12].

La dernière année, la SAED et les représentants locaux de l'Union Européenne et du FED nous ont demandé d'organiser une réunion d'information et de restitution auprès des bailleurs de fonds et des institutions de recherche ou développement intervenant dans la vallée. Cette réunion a eu lieu à St-Louis du Sénégal en avril 1997 en présence de représentants de la SAED, du FED, du FAC, de l'AFD, de la coopération allemande (Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit, GTZ), de l'ISRA et de l'ADRAO.

Les relations avec la SAED ont continué dans le cadre du Pôle de recherche CORAF sur les Systèmes Irrigués sahéliens (PSI-CORAF), et j'ai été amené à présenter aux ingénieurs délégués et

aux conseillers agricoles le résultat de mon analyse de la base de données de la Direction de Promotion et du Développement Rural chargée du suivi des périmètres irrigués [G-15].

En Tunisie, le programme MERGUSIE est conduit en partenariat avec les Directions Générales du Génie Rural (DGGR) d'une part, et des Ressources en Eaux (DGRE) d'autre part. Ces deux directions sont également nos partenaires du développement dans les programmes internationaux SIRMA et WADEMED. Au niveau local, nous travaillons directement avec le Commissariat Régional au Développement Agricole du gouvernorat de Kairouan. La démarche d'évaluation de la demande en eau et l'outil de simulation de scénarios d'évolution ont été transférés aux personnels du CRDA à la fin de l'année 2006 [C-25]. Par ailleurs, je suis intervenu en appui au département « investissements agricoles », qui distribue les subventions de l'Etat, pour concevoir et réaliser un Système de Gestion de Base de Données sur ces investissements.

Le programme SIRMA se fixe pour objectif la construction avec les partenaires acteurs de la gestion de l'eau, des outils et méthodes pour aider cette gestion. Pour s'assurer de liens directs entre les travaux proposés par les équipes de recherche et réalités du terrain, le Comité de Pilotage du programme est composé de personnalités issues des directions techniques des ministères de l'agriculture et de l'hydraulique des pays partenaires. Par ailleurs, des conventions sont établies avec les acteurs locaux : Offices de périmètres Irrigués en Algérie, Offices Régionaux de Mise en Valeur Agricole au Maroc, Commissariats Régionaux au Développement Agricoles en Tunisie.

En France, le troisième volet du programme ADD-APPEAU [S-05] a pour ambition la construction participative de modèles régionaux avec les acteurs locaux, notamment les Chambres d'Agriculture, les agriculteurs et les Directions Départementales de l'Agriculture sur chaque site, en Lomagne et dans la Drôme. Le programme prévoit un séminaire de restitution des travaux réalisés auprès des autres équipes de recherches et partenaires. Ce séminaire sera préparé sur chacun des deux sites avec les partenaires locaux qui ont participé à la construction du modèle et aux jeux de simulation pour le test de scénarios prospectifs et l'élaboration de règles collectives de gestion.

III-1-4 Gestion de la recherche

Mes activités de gestion de la recherche concernent l'administration de la recherche et l'animation scientifique.

III-1-4-1 Administration de la recherche

□ *Intérim du représentant de l'IRD au Sénégal et de l'administrateur du centre IRD (1993).* Le centre IRD de Dakar est la 3^{ème} implantation de l'IRD en importance après celles de Montpellier et Nouméa. Cet intérim m'a permis de découvrir d'une part les aspects institutionnels des relations avec nos partenaires du monde scientifique et du monde du développement, et d'autre part le fonctionnement au quotidien d'un important centre de recherche. Cet intérim m'a également été utile plus tard dans mes relations avec ces partenaires ainsi que pour financer un Volontaire du Service National par le biais du Fonds d'Aide et de Coopération (FAC).

□ *Intérim de la direction de l'unité de recherche IRD Ariane (2001).* P. Boivin, directeur de l'Unité de Recherche « Ariane » à laquelle j'appartenais, a démissionné en mai 2001. Patrice Cayré, directeur du Département ressources vivantes, m'a demandé d'assurer la direction provisoire de l'Unité, voire d'en prendre réellement la direction définitive après modification du projet scientifique. J'ai accepté d'assurer l'intérim de la direction jusqu'à la fin de l'année civile, mais il m'a semblé plus judicieux que Roland Poss reprenne la direction de cette unité composée en majorité de pédologues. J'ai pris en charge la rédaction du premier rapport d'activité de l'unité, et la préparation du budget pour l'année 2002.

□ *Membre élu du collège 2 à la Commission de Gestion de la Recherche et de ses Applications n°1 (2003-2007).* Après mon adhésion à l'Unité de Service DIVHA, j'ai demandé de relever pour mon évaluation de la CGRA1 « ingénierie et expertise ». Ce changement s'explique non seulement par mon adhésion à une « unité de service » de l'IRD, mais aussi parce qu'il me semble que mes activités sont assez peu « mono-disciplinaires » et font fréquemment appel à l'ingénierie. Je suis membre élu de cette commission depuis la fin de l'année 2003. L'essentiel des travaux dans cette commission concerne l'évaluation des travaux des unités de services de l'IRD, du Département Information et Communication et de la Mission Informatique de l'institut, ainsi que l'évaluation individuelle des personnels, chercheurs, ingénieurs et techniciens qui relèvent de la CGRA1. Cette activité est à la fois « administrative » et « scientifique », notamment lorsqu'il s'agit de recruter des personnels. J'ai ainsi participé à 4 jurys de recrutement de chargés de recherche. Pour tenter de faciliter le dialogue et le travail des membres de la commission, ainsi qu'informer les ressortissants des travaux de cette commission, j'ai proposé, conçu et mis en place un site internet pour la CGRA1 (http://www.mayeticvillage.fr/QuickPlace/cgra1_ird) qui utilise un outil de travail collaboratif dénommé « QuickPlace ».

III-1-4-2 Animation scientifique

- ❑ *Représentation IRD aux réunions de concertation entre CIRAD-INRA-ORSTOM et ADRAO à Bouaké (1995).* A cette occasion, j'ai rappelé que la signature d'une convention n'était pas synonyme de collaboration scientifique réelle. En effet, les chercheurs du centre ORSTOM de Dakar collaboraient avec le centre ADRAO de St-Louis en l'absence de toute « convention » inter-institutionnelle. Néanmoins cette collaboration se concrétisait par des productions et publications scientifiques communes [L-03, G-11, R-06, R-07, O-05, O-07].
- ❑ *Appui scientifique aux coordonnateurs des composantes du PSI-CORAF (1998-1999).* Après avoir participé au montage et aux actions de recherche de ce programme, j'ai apporté mon appui scientifique aux coordonnateurs des composantes « diversification des systèmes de cultures irrigués » et « intensification de la riziculture irriguée » pour la synthèse des travaux. Cette synthèse des travaux du PSI a été présentée lors d'un séminaire de restitution à Dakar en décembre 1999. Pour l'édition des actes de ce séminaire, j'ai participé à la révision des communications écrites présentées dans les composantes « intensification », « diversification » et « gestion technique et organisation foncière de l'irrigation ».
- ❑ *Participation au comité de pilotage du PCSI (2001).* Durant mon affectation à Montpellier, j'ai remplacé de nombreuses fois Pascal Boivin pour représenter l'IRD aux réunions du comité de pilotage du Programme Commun sur les Systèmes Irrigués associant Cemagref, CIRAD et IRD. Je suis à l'origine de la conception, de la réalisation et de la maintenance du site internet du PCSI (<http://www.pcsi.ird.fr>). L'appel à communication aux 4 séminaires annuels organisés par le PCSI et les actes de ces séminaires ont été mis en ligne sur ce site.
- ❑ *Animation scientifique du programme INCO-WADEMED (2003-2006).* J'étais représentant institutionnel et membre du comité scientifique du programme européen INCO-MED « Water Demand knowledge base in the Mediterranean » (WADEMED, <http://www.wademed.net>). Ce programme, dont le budget total s'élevait à 1 000 000 € et qui s'est achevé fin 2006, avait pour objectif la constitution d'une base de connaissance faisant la synthèse des expériences de gestion de la demande en eau agricole dans les pays du Maghreb. Ce programme associait 12 instituts d'enseignement-recherche, dont 6 maghrébins et 3 européens autres Cemagref, CIRAD et IRD. Il se fonde sur l'organisation de trois ateliers régionaux focalisés sur trois leviers influençant la demande agricole en eau : les techniques d'irrigation, les instruments économiques et les institutions de l'eau. Chaque atelier est précédé d'un séminaire de préparation pour la définition des travaux qui seront présentés, et suivi d'un séminaire pour réaliser une synthèse des présentations et rédiger des recommandations à l'intention des politiques. J'ai participé chaque année à chacun de ces séminaires. Le premier atelier a eu lieu à Rabat en avril 2004 ; j'y ai animé le thème « contraintes et

stratégies de modernisation de l'irrigation dans les petites exploitations familiale » (exposé introductif, sélection des résumés, revue des communications écrites). Le second atelier a eu lieu à Sousse, en Tunisie, en 2005 ; j'ai participé à la conception et la réalisation de l'étude de cas qui a conduit à la réalisation d'un jeu de simulation pour gestion collective d'une nappe en accès libre ; j'ai également été sollicité pour la relecture des communications présentés lors du séminaire. Le troisième atelier a eu lieu à Cahors en 2005. Le travail engagé en 2005 avec l'étude de cas en Tunisie, et qui appartenait également aux thématiques de cet atelier, n'a malheureusement pas pu être poursuivi malgré un financement acquis auprès du programme européen AquaStress. La synthèse du troisième atelier et de l'ensemble du programme WADEMED a eu lieu en décembre 2006 à Brême, en Allemagne.

□ *Animation scientifique du programme FSP-SIRMA (2005–2008).* Le démarrage de ce programme a été retardé d'une année ; il devait être mené de concert avec le programme WADEMED. Je également représentant institutionnel et membre du comité scientifique de ce programme qui a démarré à la fin de l'année 2004 (<http://www.eau-sirma.net/>). Ce comité évalue les projets et les activités des actions de recherche, des thèses et masters proposés, et rédige un appel d'offre annuel pour mener des actions de recherches conjointes dans le domaine de la gestion intégrée de l'eau. Cinq actions de recherche, dites structurantes car c'est autour d'elles que s'articulent les travaux de thèses et de masters, ont été retenues. J'ai participé au montage de deux de ces actions ; l'une concerne la gestion de la salinité en périmètre irrigué, l'autre la conception d'indicateurs de performances des périmètres irrigués. Le projet finance également des formations mixtes entre institutions d'enseignement agronomiques françaises et maghrébines. J'ai ainsi participé à l'animation d'un stage d'étudiants issus des trois pays partenaires en Tunisie fin mars 2006.

□ *Animation scientifique dans l'axe 3 de l'UMR G-eau, création de l'équipe « Modèles et Instruments de Gestion » (2005-).* Depuis 2005, l'unité Divha a intégré l'UMR Gestion de l'Eau, Acteurs et Usages. Dans l'axe 3 de cette UMR focalisé sur les usages agricoles de l'eau, j'anime avec P Le Grusse (IRD-IAMM) et P. Ruelle (Cemagref) un groupe de réflexion sur les méthodes et outils de gestion. Nous avons recensé les divers outils et modèles mis en œuvre par les équipes et avons organisé une réunion de formation des chercheurs à un outil de représentation économique des activités agricoles. Sur la base de ces premiers travaux, nous avons créé l'équipe de recherche « Modèles et Instruments de Gestion » au sein de cet axe 3 et avons soumis deux actions de recherche à l'appel d'offre interne annuel de l'UMR : réunissant des chercheurs issus du Cemagref, du CIRAD et de l'IRD, elles permettront de développer un logiciel et de l'appliquer sur les divers chantiers de l'UMR. Ces deux actions ont été retenues et financées.

III-1-4-3 Montage de projets de recherche

- *Montage du projet scientifique du PSI-CORAF (1996).* Ce programme de recherche-développement, financé par le FAC, a été initié par Jean-Pierre Gay, chercheur INRA en accueil au CIRAD, et Jean-Pierre N'Diaye, directeur du centre ISRA de St-Louis. Nous avons conçu et précisé ensemble son projet scientifique. C'est Jean-Claude Legoupil, du CIRAD, qui s'est ensuite chargé du montage institutionnel avec les 4 instituts partenaires africains : l'ISRA au Sénégal, le CNRADA en Mauritanie, l'IER au Mali et l'INRAN au Niger.
- *Montage du programme FSP-SIRMA (2003).* Le programme « économies d'eau en Systèmes Irrigués au Maghreb » est un programme financé à hauteur de 2 000 000 € par le Fonds de Solidarité Prioritaire du Ministère des Affaires Etrangères Français. Le but de ce programme est la création d'un réseau régional franco-maghrébin réunissant des acteurs de la gestion de l'eau (usagers, gestionnaires de périmètres irrigués et décideurs publics) et des chercheurs, pour conceptualiser et expérimenter des méthodes et des outils de gestion qui contribuent à « économiser » l'eau et à améliorer la valorisation agricole. Dans le cadre du PCSI, j'ai participé au montage scientifique et institutionnel de ce programme, avec S. Bouarfa (Cemagref) et M. Kuper (CIRAD). Les partenaires recherche de ce programme sont, l'INA d'Alger pour l'Algérie, l'IAV Hassan II et l'ENA Meknès pour le Maroc, l'INAT et l'INRGREF pour la Tunisie et le PCSI (CIRAD, Cemagref, IRD) pour la France.
- *Responsabilité du WP3 du projet ADD-APPEAU (2006-2009).* Le programme « Quelles politiques publiques et quels agro-systèmes pour une gestion durable des ressources en eau » s'inscrit dans le cadre du programme stratégique Agriculture et Développement Durable de l'Agence Nationale de la Recherche. Ce programme, démarré début 2007 et dont le budget total s'élève à 300 000€, se compose de 4 volets ou « Work Packages » (WP). Je suis auteur et responsable scientifique avec P. Le Grusse du troisième WP intitulé « Modélisation participative pour l'élaboration de règles collectives de gestion des ressources » [S-05] dont le budget s'élève à 92 000 €. Les travaux du WP3 s'effectuent en partenariat avec les acteurs locaux sur deux principaux terrains : en Lomagne et dans le Val de Drôme. La démarche est similaire à celle engagée sur les sites des projets SIRMA (AS2) et WADEMED : construction participative d'un modèle régional fondé sur une typologie des exploitations et des activités de production, puis réalisation de jeux de simulation. Il constitue le lieu principal de réalisation de mon projet de recherche.

III-2 Liste des Publications

III-2-1 Articles dans revues à comité de lecture [R]

- R-01 Poussin J.C., 1987. Notions de système et de modèle. In "Systèmes de Production en Afrique", ORSTOM, *Cahiers de Sciences Humaines*, 23 (3-4): 439-441.
- R-02 Germain N., Poussin J.C., 1987. Les exploitations de moyenne Côte d'Ivoire utilisant la motorisation intermédiaire : point de vue d'agronomes. In "Systèmes de Production en Afrique", ORSTOM, *Cahiers de Sciences Humaines*, 23 (3-4): 555-566.
- R-03 Chatelin M.H., Poussin J.C., 1991. Diagnostic d'exploitation agricole : apport de la simulation. *Economie Rurale*, 206: 77-81.
- R-04 Chatelin M.H., Aubry C., Leroy P., Papy F., Poussin J.C., 1993. Pilotage de la production et aide à la décision stratégique. Le cas des exploitations de grande culture. *Cahiers d'Economie et Sociologie Rurales*, 28: 120-138.
- R-05 Poussin J.C., Boivin P., 2002. Performances des systèmes rizicoles irrigués sahéliens. *Cahiers Agricultures*, 11: 65-73.
- R-06 Boivin P., Favre F. Hammecker C., Maeght J.L., Delarivière J., Poussin J.C., Wopereis M. C. S., 2002. Processes driving soil solution chemistry in a flooded rice-cropped vertisol: analysis of long-time monitoring data. *Geoderma*, 110 (1-2): 87-107.
- R-07 Poussin J.C., Wopereis M.C.S., Debouzie D., Maeght J.L., 2003. Determinants of irrigated rice yield in the Senegal River valley. *European Journal of Agronomy*, 19: 341-356.
- R-08 Chatelin M.H., Aubry C., Poussin J.C., Meynard J.M., Massé J., Verjux N., Gate P., Le Bris X., 2005. DéciBlé, a software package for wheat crop management simulation. *Agricultural Systems*, 83: 77-99.
- R-09 Poussin J.C., Neuts T., Mateille T., 2005. Interactions between irrigated rice (*Oryza sativa*) growth, nitrogen amendments and infection by *Hirschmanniella oryzae* (Nematoda, Tylenchida). *Applied Soil Ecology*, 29: 27-37.
- R-10 Poussin J.C., Diallo Y, Legoupil JC, Sow A, 2005. Increase in rice productivity in the Senegal River valley due to improved collective management of irrigation scheme. *Agronomy for Sustainable Development*, 25: 225-236.
- R-11 Poussin J.C., Diallo Y., Legoupil J.C., 2006. Improved collective decision-making in action for irrigated rice farmers in the Senegal River Valley. *Agricultural Systems*, 89 (2-3): 299-323.
- R-12 Poussin J.C., Imache A., Béji R., Benmihoub A., Le Grusse P., 2008. Exploring regional irrigation water demand using typologies of farms and production units: an example from Tunisia. *Agricultural Water Management*, en révision.

III-2-2 Articles de vulgarisation [V]

- V-01 Attonaty J.M., Chartier R., Chatelin M.H., Hémidy L., Leroy P., Poussin J.C., Schock D., 1988. Systèmes experts, micro-informatique et gestion des exploitations. *Recherches en économie et sociologie rurales*, INRA Sciences Sociales, 4 p.
- V-02 J.M. Attonaty, M.H. Chatelin, J.C. Poussin, L.G. Soler, 1990. Modélisation et simulation de l'organisation du travail en agriculture. *Perspectives Agricoles*, mai 1990.

- V-03 Papy F., Briet J.C., Cornichon C., Poussin J.C., Rieu C., Strasman A., Velon J., 1991. Travail du sol et gestion de l'exploitation : un cas dans le Chatillonnais. *Perspectives Agricoles*, nov. 1991.
- V-04 Poussin J.C., 1991. OTELO : un simulateur pour raisonner l'organisation du travail et l'équipement dans l'exploitation agricole. *Perspectives Agricoles*, nov. 1991.
- V-05 Boivin P., Dia I., Lericollais A., Poussin J.C., Santoir C., Seck S.M., 1995. Agriculture irriguée dans la vallée du fleuve Sénégal : une approche pluridisciplinaire. *ORSTOM Actualités*, n° 45, p. 8-12; p. 21-23.
- V-06 Boivin P., Poussin J.C., 2003. Des systèmes de productions en cause. *Les dossiers de Sciences au Sud*, IRD, janvier 2003.
- V-07 Poussin J.C., 2004. Irrigation et eau agricole. Un réseau franco-maghrébin. *Sciences au Sud*, IRD, n° 27, nov-déc 2004, p 4.

III-2-3 Communications à congrès et séminaires [C]

- C-01 Poussin J.C., 1988. La motorisation intermédiaire en moyenne Côte d'Ivoire. Diversité de mise en oeuvre. In "*Economie de la mécanisation en région chaude*", CIRAD - Mission Economie et Sociologie Rurales, actes du IXe Séminaire d'Economie Rurale, Montpellier, 14-16 septembre 1988, pp. 255-260.
- C-02 Attonaty J.M., Chatelin M.H., Poussin J.C., 1990. L'évolution des méthodes et langages de simulation. In J. Brossier, B. Vissac and J.L. Lemoigne (Eds.) "*Modélisation Systémique et Système Agraire*", Actes du séminaire du département de recherches sur les systèmes agraires et le développement (INRA-SAD). St. Maximin, 2-3 mars 1988. INRA, Paris, pp. 119-133.
- C-03 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. In G.I.S. (Ed.) "*Représentation, Modélisation, Développement*", Actes de l'atelier "Recherche Opérationnelle et Développement", Montpellier, 16-19 janv. 1990, pp. 301-314.
- C-04 Aubry C., Meynard J.M., Attonaty J.M., Chatelin M.H., Poussin J.C., Masse J., 1990. SIMULBLE : a simulation software of the effects of management techniques on winter wheat yield. Poster. *First Congress of the European Society of Agronomy*, Paris 5-7 déc. 1990.
- C-05 Attonaty J.M., Chatelin M.H., Poussin J.C., Soler L.G., 1990. Simulation à base de connaissance pour l'aide à la décision en agriculture. In J.L. Lemoigne & P. Bourguine (Ed.) "*CECOIA II*", Actes de la deuxième Conférence Internationale "l'Economie et l'Intelligence Artificielle", Paris 2-6 juillet 1990.
- C-06 Attonaty J.M., Chatelin M.H., Poussin J.C., Soler L.G., 1991. Advice and decision support systems in agriculture: new issues. *International Federation of Operational Research Societies, Special Conference on Decision Support Systems* (IFORS - SPC 1), Bruges, march 26-29, 1991, IFORS.
- C-07 Attonaty J.M., Chatelin M.H., Poussin J.C., Soler L.G., 1991. Advice and decision support systems in agriculture. The example of work organization. *XXVIe EAAE Seminar*. Grignon, sept. 10-12, 1991, EAAE.
- C-08 Aubry C., Chatelin M.H., Poussin J.C., 1992. DECIBLE, a decision support system for winter wheat crop management. *IVe Congrès International d'Informatique Agricole*, Versailles, juin 1992, Société des Agriculteurs de France.
- C-09 Chatelin M.H., Attonaty J.M., Poussin J.C., 1992. Raisonner l'organisation du travail en agriculture. Chronique d'une démarche interactive de conception d'un SIAD. *IVe Congrès*

International d'Informatique Agricole, Versailles, juin 1992, Société des Agriculteurs de France.

- C-10 Poussin J.C., Maeght J.L. et Boivin P., 1998 - « Nos rendements chutent! » Fatigue des sols ou fatigue des hommes? Evolution d'un sol irrigué et élaboration des rendements. Poster, *16ème Congrès AISS*, Montpellier, actes sur CD-ROM (Editions Cirad).
- C-11 Poussin J.C., 1999. Effet du système de culture sur la variabilité des rendements dans les sols irrigués sahéliens en voie de salinisation. In Boivin P, Jaillard B, Poss R (Eds), *Actes du 11ème atelier GRESSAP*, IRD Montpellier, pp 9-17.
- C-12 Dancette C. Ducrot R., Sourisseau J.M., Bélières J.F., Touré A., David-Benz H., Legoupil J.C., Poussin J.C., Sow A., Kane I., Ngam A.O., Tandia M., Maubuisson J., Ndiaye K., Guindo D., Sido A., Poisson C., Clément P., Touré A., 2000. Les principaux systèmes de riziculture irriguée de la zone d'intervention du PSI. Activités de recherche conduites et résultats. In JC Legoupil, C Dancette, P Godon, IM Maïga et KM Ndiaye (Eds), « *Pour un développement durable de l'agriculture irriguée dans la zone soudano-sahélienne* », Synthèse des résultats du Pôle Régional de Recherche sur les Systèmes Irrigués, Dakar 30 nov. – 3 déc. 1999, PSI/WECARD CORAF, pp 34-46.
- C-13 Diallo Y, Legoupil JC, Wade M, Ngaïdé H, Poussin JC, Lidon B, 2000. Amélioration des performances des petits périmètres irrigués villageois par la mise en place d'un système d'information et de suivi des pratiques agricoles. In JC Legoupil, C Dancette, P Godon, IM Maïga et KM Ndiaye (Eds), « *Pour un développement durable de l'agriculture irriguée dans la zone soudano-sahélienne* », Synthèse des résultats du Pôle Régional de Recherche sur les Systèmes Irrigués, Dakar 30 nov. – 3 déc. 1999, PSI/WECARD CORAF, pp 304-322.
- C-14 Legoupil JC, Lidon B, Wade M, Poussin JC, Tangara B, Maïga IM, 2000. Le PSI : une recherche en accompagnement à la professionnalisation de la gestion paysanne des aménagements hydro-agricoles. In JC Legoupil, C Dancette, P Godon, IM Maïga et KM Ndiaye (Eds), « *Pour un développement durable de l'agriculture irriguée dans la zone soudano-sahélienne* », Synthèse des résultats du Pôle Régional de Recherche sur les Systèmes Irrigués, Dakar 30 nov. – 3 déc. 1999, PSI/WECARD CORAF, pp 233-254.
- C-15 Poussin J.C., 2000. CalCul : Un outil pour construire un calendrier cultural prévisionnel du riz irrigué au Sahel. In JC Legoupil, C Dancette, P Godon, IM Maïga et KM Ndiaye (Eds), « *Pour un développement durable de l'agriculture irriguée dans la zone soudano-sahélienne* », Synthèse des résultats du Pôle Régional de Recherche sur les Systèmes Irrigués, Dakar 30 nov. – 3 déc. 1999, PSI/WECARD CORAF, pp 87-99.
- C-16 Wade M, Legoupil JC, Poussin JC, 2000. Les outils d'aide à la discussion, à la négociation et à la décision pour une gestion performante des aménagements hydro-agricole. In JC Legoupil, C Dancette, P Godon, IM Maïga et KM Ndiaye (Eds), « *Pour un développement durable de l'agriculture irriguée dans la zone soudano-sahélienne* », Synthèse des résultats du Pôle Régional de Recherche sur les Systèmes Irrigués, Dakar 30 nov. – 3 déc. 1999, PSI/WECARD CORAF, pp 323-345.
- C-17 Poussin JC, 2001. Performances des systèmes de culture : une expérience menée sur les systèmes irrigués de la vallée du Sénégal. Communication au forum « *Recherches scientifiques en relation avec la mise en valeur et la sécurité alimentaire des pays tropicaux* » 20 dec. 2001, COPED-CDI, Académie des Sciences, 10 p.
- C-18 Poussin J.C., Boivin P., 2001. Performances des systèmes rizicoles irrigués sahéliens : constats, idées reçues, idées nouvelles. Communication invitée aux « *Journées de l'Irrigation en Afrique de l'Ouest et du Centre* », IER / IPTRID / ARID, Ougadougou (Burkina Faso), 23-26/04/2001, actes sur CD-ROM.

- C-19 Poussin J.C., Boivin P., Hammecker C., Maeght J.L., 2002. Riziculture irriguée et évolution des sols dans la vallée du Sénégal. Séminaire PCSI "*Vers une maîtrise des impacts environnementaux de l'irrigation*", Montpellier, 28-29/05/2002, actes sur CD-ROM, Cirad – ISBN 2-87614-544-8.
- C-20 Pouget J.C., Cudennec C., Leduc C., Le Goulven P., Le Grusse P., Poussin J.C., 2003. Co-construction d'un outil de gestion intégrée sur le bassin du Merguellil (Tunisie) - Articulation et cohérence de modèles. Séminaire PCSI "*Gestion intégrée de l'eau au sein d'un bassin versant*", Montpellier, France, déc. 2003, actes sur CD-ROM, Cirad, ISBN 2-87614-591-X.
- C-21 Poussin J.C., 2004. Note introductive, "Contraintes et stratégies de modernisation de l'irrigation dans les petites exploitations agricoles familiales". In Hamani A., Kuper M. et Debbarh A. (Ed.) « *La modernisation de l'agriculture irriguée* », actes séminaire Euro-Méditerranéen WADEMED, 19-23/04/2004, Rabat (Maroc) ISBN 9954-447-05-9, pp 2-3.
- C-22 Poussin J.C., 2005. Gestion collective et productivité des périmètres irrigués villageois. Séminaire WP2 WADEMED « *instruments économiques et modernisation de l'irrigation* », Sousse (Tunisie), 21-22/11/2005, http://www.wademed.net/articles_2005.htm.
- C-23 Poussin J.C., Pouget J.C., Pettinoti B., Quaranta D., 2005. Représentation technico-économique des activités agricoles à l'échelle régionale : d'Olympe à ZonAgri. Colloque « *Olympe : un outil de modélisation multifonctionnelle* », LECOR-ESITPA, Rouen 8-9/12/2005, actes sur CD-ROM.
- C-24 Pouget J.C., Poussin J.C., Pettinoti B., Quaranta D., Rolland D., 2006. Regional and prospective analysis of agricultural activities and water demands: the ZonAgri modelling environment within the OdefiX generic Java framework. *7th International Conference on Hydroinformatics*, HIC 2006, Nice, France.
- C-25 Poussin J.C., Benmihoub A., Béji R., 2007. Usages agricoles de l'eau et valorisation dans le plaine de Kairouan (Tunisie centrale). *3^{ème} atelier régional scientifique et technique du projet SIRMA*, 4-8 juin 2007, Nabeul (Tunisie), actes à paraître sur CD-ROM.
- C-26 Poussin J.C., Benmihoub A., Beji R., Le Grusse P., 2007. Evolution de l'irrigation dans la plaine de Kairouan entre 1999 et 2005. *Séminaire de restitution du programme MERGUSIE II*, 18-19 juin 2007, IRD/INAT, Kairouan (Tunisie).

III-2-4 Ouvrage et chapitres d'ouvrages [O]

- O-01 Germain N, Poussin J.C., 1989. Décisions d'assolement et incertitudes : une problématique pour l'agronome. In "*Le risque en agriculture*", ORSTOM, collection "à travers champs", pp.463-474.
- O-02 Attonaty J.M., Chatelin M.H., Poussin J.C., Soler L.G., 1993. Advice and decision support systems in agriculture: new issues. In: Huirne R., Harsh S., Dijkhuizen A. (Eds.) "*Farm Level Information Systems*". Wageningen Agricultural University, Netherlands, 89-101.
- O-03 Boivin P., Dia I., Lericollais A, Poussin J.C., Santoir C., Seck S.M. (Eds), 1995. "*Nianga, laboratoire de l'agriculture irriguée en moyenne vallée du fleuve Sénégal*", ORSTOM, coll. Colloques et Séminaires.
- O-04 Poussin J.C., 1995. Gestion technique de la riziculture irriguée. In P. Boivin, I. Dia, A. Lericollais, J.C. Poussin, C. Santoir et S.M. Seck (Eds) "*Nianga, laboratoire de l'agriculture irriguée en moyenne vallée du fleuve Sénégal*", ORSTOM, coll. Colloques et Séminaires, Dakar, pp 153-170.
- O-05 Dingkuhn M., Le Gal P.Y., Poussin J.C., 1995. RIDEV : un modèle de développement du riz irrigué pour le choix des variétés et des calendriers culturaux. In P. Boivin, I. Dia, A.

- Lericollais, J.C. Poussin, C. Santoir et S.M. Seck (Eds) "*Nianga, laboratoire de l'agriculture irriguée en moyenne vallée du fleuve Sénégal*", ORSTOM, coll. Colloques et Séminaires, Dakar, pp 205-222.
- O-06 Poussin J.C., Milleville P., 1995. Maîtrise et choix technique – introduction. In P. Boivin, I. Dia, A. Lericollais, J.C. Poussin, C. Santoir et Seck (Eds) "*Nianga, laboratoire de l'agriculture irriguée en moyenne vallée du fleuve Sénégal*", ORSTOM, coll. Colloques et Séminaires, Dakar, pp 135-138.
- O-07 Poussin J.C., 1997, Direct seeding or transplanting ? The example of the Senegal middle valley. In "*Irrigated rice in the Sahel : prospects for sustainable development*", ADRAO/WARDA, Dakar, pp. 191-200.
- O-08 Poussin J.C., 1998, Diagnostic sur les systèmes de riziculture irriguée dans la moyenne vallée aval du fleuve Sénégal. In A. Biarnes (Ed.) « *La conduite du champ cultivé. Points de vue d'agronomes* », coll. « Colloques et séminaires », ORSTOM, pp 133-161.
- O-09 Legoupil J.C., Wade M., Poussin J.C., Tangara B., Maïga I.M.. 2002. Vers la professionnalisation de la gestion paysanne des périmètres irrigués en Afrique de l'Ouest. In : *Mémento de l'agronome*, CIRAD, Montpellier, CD-ROM.

III-2-5 Autres publications scientifiques [S]

- S-01 Poussin J.C., 1981. *Modèle de simulation d'une exploitation agricole dans le marais Poitevin*. Mémoire de fin d'études d'ingénieur INA-PG, mention « Productions végétales ». INA-PG, INRA-ESR Grignon, INRA-SAD St Laurent de la Prée, multig. 127 p. + annexes.
- S-02 Poussin J.C., 1983. *Gestion technique de la motorisation intermédiaire dans les exploitations agricoles de la région Centre de la Côte d'Ivoire*. Rapport d'élève ORSTOM, ORSTOM Bouaké, multig. 61 p. + annexes.
- S-03 Poussin J.C., 1990. *Système à base de connaissance - Problèmes d'acquisition de la connaissance*. Mémoire de pré-inscription au D.E.A. "Méthodes Scientifiques de Gestion", Université Paris-Dauphine, 7 p.
- S-04 Poussin J.C., 1991. *DéciBlé : un outil d'aide à la décision pour la conduite du blé d'hiver*. Mémoire de D.E.A. "Méthodes Scientifiques de Gestion", Université Paris-Dauphine, 40 p + annexes.
- S-05 Le Bars M., Le Grusse P., Poussin J.C., Ruelle P., 2006. *Modélisation participative pour l'élaboration de règles collectives de gestion des ressources*, 3^{ème} volet du projet ANR-ADD « Quels agro-systèmes et quelles politiques publiques pour une gestion durable des ressources en eau ? (APPEAU) », 10 p. + annexes.

III-2-6 Documents vidéo [D]

- D-01 Boivin P. et Poussin J.C., 1997. *Paysan du Fleuve*, documentaire de 26 mn, réalisé par J.M. Destang, co-production SAED, ORSTOM, ADRAO, ISRA, (version française et version anglaise).

III-2-7 Logiciels [L]

- L-01 OTELO, Organisation du Travail et Langage à Objets (1989-1992) : logiciel développé en langage C avec J.M. Attonaty et M.H. Chatelin. Ce logiciel permet de modéliser les règles

d'organisation du travail à l'échelle d'une exploitation (ou d'un regroupement d'exploitation) durant une période critique de la campagne, d'en simuler le fonctionnement face à différents scénarios climatiques, et d'analyser les résultats des simulations en produisant les tableaux et graphiques désirés. La version 3.00, accompagnée d'une documentation, a été diffusée auprès des utilisateurs (Agro-Transfert Picardie), au mois de mai 1992.

- L-02 Déciblé (1991-1992) : logiciel développé en langage C, en collaboration avec C. Aubry et M.H. Chatelin. Ce logiciel permet de modéliser les règles de conduite d'une culture de blé d'hiver à l'échelle de la parcelle, simuler les décisions techniques et l'élaboration du rendement face à différents scénarios climatiques, et fournir des résultats technico-économique (niveau et variabilité), ainsi que les éléments nécessaires au diagnostic agronomique pour un scénario donné. La première version a été réalisée en septembre 1991. Le logiciel a été utilisé pour évaluer des scénarios de conduite du blé suite au changement de la PAC (arrêt des subventions aux céréales).
- L-03 RIDEV, Développement du riz irrigué au Sahel (1994-1995) : logiciel développé en langage C avec M. Dingkuhn (ADRAO) et P.Y. Le Gal (CIRAD). Ce logiciel permet de simuler le développement du riz irrigué au Sahel face à différents scénarios climatiques, en fonction de la date et du mode de semis (semis direct ou repiquage), de la variété choisie et du site. Ce logiciel a été diffusé par l'ADRAO auprès des Centres Nationaux de Recherche Agronomiques en Afrique de l'Ouest.
- L-04 CalCul, Calendrier Cultural du riz irrigué au Sahel (1999-2000) : logiciel développé en langage C sur la base du modèle de développement RIDEV. Ce logiciel permet de construire un calendrier prévisionnel du riz irrigué au Sahel à l'échelle d'un périmètre irrigué ou d'un secteur de périmètre. Ce logiciel a été diffusé par le PSI-CORAF auprès de la SAED (Sénégal), de la SONADER (Mauritanie) et de l'Office du Niger (Mali).
- L-05 ZonAgri (2004-2008) : logiciel dont le prototype a été développé en Java sur la plateforme de modélisation Od fiX avec J.C. Pouget, B. Pettinotti, D. Quaranta et J.P. Adamiste. Ce logiciel permet de représenter et cartographier, sur la base de typologies, les activités agricoles (leurs consommations et productions mensuelles) dans une région découpée en zones géographiques, et de construire des scénarios d'évolution pluriannuelle. Le codage de la version 1 a été confiée à une société informatique.

III-2-8 Rapports multigraphi s [G]

- G-01 Fillonneau C., Germain N., Poussin J.C., Serpantié G., 1983 *Recherches en agronomie générale en rapport avec la mise en oeuvre des nouvelles technologies par le développement : cheminement et expériences du laboratoire d'agronomie ORSTOM de Bouaké.* ORSTOM - IDESSA, Bouaké, multig. 26 p.
- G-02 Germain N., Fillonneau C., Poussin J.C., Serpantié G., 1985. *Manuel d'observations agronomiques des systèmes cultureux mécanisés en région Centre Côte d'Ivoire.* ORSTOM - IDESSA, Bouaké, multig. 38 p.
- G-03 Poussin J.C., 1988. *Contribution au dépouillement informatisé de suivis d'activités agricoles.* ORSTOM - INRA-ESR Grignon, multig. 16 p.
- G-04 Poussin J.C., 1988. *Environnement d'interface utilisateur pour la conception de logiciels d'aide à la décision en agriculture.* ORSTOM - INRA-ESR Grignon, multig 210 p.
- G-05 Poussin J.C., 1992. *OTELO (Organisation du Travail Et Langage   Objets) : manuel de référence.* INRA-ESR Grignon, multig. 213 p.
- G-06 Poussin J.C., 1992. *DéciBlé : SIAD pour la conduite du blé d'hiver : manuel de référence.* INRA-ESR Grignon, multig. 86 p.

- G-07 Attonaty J.M., Chatelin M.H., de Jaégère A., Hémidy L., Leroy P., Poussin J.C., Soler L.G., Tanguy H., 1992. *Gestion de l'entreprise et instrumentation. Rapport d'activité scientifique de l'équipe de recherche, période 1988-1991*, INRA-ESR Grignon, multig. 40 p.
- G-08 Poussin J.C., 1994, Rapport de campagne de contre saison chaude 1994 et présentation du dispositif mis en place en hivernage. ORSTOM-SAED-FED, multig. 18 p.
- G-09 Poussin J.C., 1994, *Performances des Systèmes de Culture Irriguée en Moyenne Vallée du Sénégal (Zone de Nianga - Podor) - Volet Agronomique. Rapport 1994*. ORSTOM-SAED-FED, multig. 20 p.
- G-10 Poussin J.C., Auroux E., & Chombart, C., 1995, *Opération de recherche - développement pour l'amélioration de la production rizicole et la préservation de la ressource en sols. Volet 2 : Diagnostic et amélioration des systèmes de riziculture irriguée. Rapport d'étape*. ORSTOM-SAED-FED, multig. 13 p.
- G-11 Poussin J.C., 1995. *RIVEV - Manuel d'utilisation*. ADRAO St Louis, multig. 78 p. + annexes.
- G-12 Poussin J.C., & Neuts T., 1996, *Opération de recherche - développement pour l'amélioration de la production rizicole et la préservation de la ressource en sols. Volet 2 : Diagnostic et amélioration des systèmes de riziculture irriguée. Rapport final*. ORSTOM-ISRA-SAED-FED, multig. 20 p.
- G-13 Poussin J.C., 1997, *Réflexions sur le thème "Intensification" et proposition d'actions de recherche en 1997*, PSI-CORAF Dakar multig. 4 p.
- G-14 Poussin J.C. et Marcel M.L., 1997, *Etude des conditions de levée du riz irrigué dans la moyenne vallée du fleuve Sénégal*. ORSTOM Dakar, multig. 35 p. + annexes.
- G-15 Poussin J.C., 1998. Enquêtes SAED-DPDR. *Délégation de Dagana, Podor, Matam et Bakel. Saisons chaudes et hivernages 94, 95 et 96. Points de vue agronomique. Premières analyses. Document de travail*. PSI-CORAF, Dakar. 11 p.
- G-16 Poussin J.C., 1999. *CalCul : un outil pour construire un calendrier cultural prévisionnel du riz irrigué au Sahel. Manuel de référence*. PSI-CORAF, multig. 41 p.
- G-17 Poussin J.C., 2002. *Représentation des données dans le modèle Olympe (cas d'une petite région agricole)*. multig. 28 p.

Références bibliographiques

- Agricultural Research Council. (ARC), Agricultural and Food Research Council (AFRC), Cooke G.W. (Ed.), 1981. *Agricultural research 1931-1981: a history of the Agricultural Research Council and a review of developments in agricultural science during the last fifty years*. ARC, London, 367p.
- Albouchi L., 2006. *Gestion de l'eau en Tunisie : d'une politique de mobilisation à une politique de réallocation de la ressource selon sa valorisation économique*. Thesis, Montpellier I University.
- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., Smith, M., 1998. FAO 56: *Crop Evapotranspiration – Guidelines for Computing Crop Water Requirements*. FAO of UN, Rome, Italy.
- Antoni J.P., Klein O., Moisy S., 2004. Cartographie interactive et multimédia : vers une aide à la réflexion géographique. *Cybergeo*, article 288, <http://www.cybergeo.eu/index2621.html>.
- Attonaty J.M., 1990. Simulblé : un simulateur de blé, différentes applications. *Défi blé 90*, Céréaliéristes de France, Paris, pp 24-25
- Attonaty J.M., Delpech P., 1987. *PORFAL : un programme de formules d'aliment au moindre coût*. INA-PG, Chaire de Zootechnie, multig., 8p.
- Attonaty J.M., Chatelin M.H., Garcia F., 1999. Interactive simulation modelling in farm decision-making. *Computers and Electronics in Agriculture*, 22: 157-170.
- Attonaty J.M., Chatelin M.H., Mousset J., 1993. A Decision Support System based on farmer's knowledge to assist him in decision making about work organization and long term evolution. *Proc. of the International Seminar of CIGR Models Computer Programs and Expert Systems for Agricultural Mechanization*. Florenza, Italy, 1-2/10. pp. 8-22.
- Attonaty J.M., Chatelin M.H., Shock D., 1987. *MIMI : moteur d'inférence pour micro-ordinateur*. Institut National de Gestion et d'Economie Rurale, INRA, Paris, multig. 122p.
- 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*. Thèse INA-PG, Paris, 271 pp. + annexes.
- Aubry C., Loyce C., Meynard J.M., Chatelin M.H., Rellier J.P., Verjux N., 1997. Outils et méthodes pour la conception et l'évaluation d'itinéraires techniques. In : *Aide à la décision et choix de stratégies dans les entreprises agricoles*, INRA-ESR Grignon, pp 111-126.
- Axelrod, R., 1997. Advancing the Art of Simulation in the Social Sciences. In: Hegselmann, R., Terna, P. (Eds.), *"Simulating Social Phenomena"*. Springer, Berlin, pp. 21-40.
- Bader J.C., Lamagat J.P., Guigen N., 2003. Gestion du barrage de Manantali sur le fleuve Sénégal: analyse quantitative d'un conflit d'objectifs. *Journal des Sciences Hydrologiques*, 48(4) : 525-538.
- Barreteau O., 1994. *Des pratiques de gestion à la consommation d'eau d'un périmètre irrigué, le cas du périmètre de Nianga au Sénégal*. Mémoire de DEA d'hydrologie, ENGREF, Montpellier.
- Bartolini F., Bazzani G.M., Gallerani V., Raggi M., Viaggi D., 2007. The impact of water and agriculture policy scenarios on irrigated farming systems in Italy: An analysis based on farm level multi-attribute linear programming models. *Agricultural Systems*, 93 (1-3): 90-114.
- Bélières J.F., Touré H.A., 1999. *Impact de l'ajustement structurel sur l'agriculture irriguée du delta du Sénégal*. Thèse de doctorat, Ecole Nationale des Sciences Agronomiques de Montpellier.
- Benoît M., Deffontaines J.P., Lardon S., 2006. *Acteurs et territoires locaux. Vers une géoagronomie de l'aménagement*. INRA, Quae, Paris, ISBN : 2-7380-1225-6.

- Benoît M., Le Ber F., Mari, J.F., 2001. Recherche des successions de cultures et de leurs évolutions: analyse des données Ter-Uti en Lorraine. *Agreste vision - La statistique agricole*, 31: 23-30.
- 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. *Journal of Ecological Modelling*, 137: 43-60.
- Bergez J.E., Leenhardt D., Maton L., Garcia F., Salles D., Amigues JP., 2005. Comment modéliser les pratiques des agriculteurs pour estimer la demande régionale en eau d'irrigation ? Communication pour le Symposium international "Territoires et enjeux du développement régional" ; Lyon, 9-11 mars 2005.
- Berkoff, J., 1994. *A strategy for Managing Water in the Middle East and North Africa*. The World Bank, Washington, D.C.
- Bertin J., 1967. *Diagrammes, réseaux, cartographie. Sémiologie graphique*. Gauthier-Villars, Paris.
- Boivin P, 1997. Soil degradation in irrigation schemes in the Senegal River middle valley: Mechanisms, characterization methods and actual situation. Miézan *et al.* (Eds), "Irrigated rice in the Sahel: Prospects for sustainable development". WARDA, Dakar (Senegal), pp 37-30.
- Boivin P., Brunet D., Gascuel C., Zante P., Ndiaye J.P., 1995. Les sols argileux de la région de Nianga-Podor : répartition, caractérisation, aptitudes et risques de dégradation sous irrigation. In P. Boivin, I. Dia, A. Lericollais, J.C. Poussin, C. Santoir et S.M. Seck (Eds.) "Nianga, laboratoire de l'agriculture irriguée en moyenne vallée du fleuve Sénégal", ORSTOM, coll. Colloques et Séminaires, Dakar, pp 67-82.
- Bonnefond P, Caneill J, Auriol O, Ndiaye M, Minvielle J, Clément A, 1980. *Etude des unités de production de paysans pratiquant la culture irriguée dans le cadre de la SAED*. ISRA, IRAT, ORSTOM, INA-PG, multigraphié, 62 p. + annexes.
- Bourgine P., Lemoigne J.L., 1990. Les bonnes décisions sont-elles optimales ou adéquates ? *XII Congrès Européen de Recherche Opérationnelle*, Athènes, Grèce., 1990.
- Boutillier J.L., Cantrelle P., Causse J., Laurent C., N'Doye T., 1962. *La moyenne vallée du Sénégal*. Presses Universitaires de France, Paris.
- Brooks D.B., 2006. An operational definition of water demand management, *International Journal of Water Resources Development*, 22 (4): 521-528.
- Brossier J., Hubert B., 2001. Intégrer les sciences biotechniques, économiques et sociales. Recherches sur les systèmes techniques en agriculture, dans le développement rural et dans la gestion des ressources naturelles au Département INRA-SAD. *Agricultures, Cahiers d'Etudes et de Recherches Francophones*, 10 : 25-39.
- Cantin, B., Shrubsole, D., Aït-Ouyahia, M., 2005. Using Economic Instruments for Water Demand Management: Introduction. *Canadian Water Resources Association*, 30: 1-10.
- Cerf M., Papy F., Angevin F., 1998. Are farmers expert at identifying workable days for tillage? *Agronomie*, 18 (1): 45-59.
- Chatelin M.H., Mousset J., 1997. Decision support for work organization and choice of equipment. In Ten Berge H.F.M., Stein A. (Eds), "Model-based decision support in agriculture", *Proc. of the INRA-KCW Workshop on Decision Support Systems*. Laon, 22-23 October 1997, pp. 59-64.
- Conte R., 1997. The necessity of intelligent agents in social simulation. In Ballot G. and Weisbuch G. (Eds.), "Applications of Simulation to Social Sciences", Hermès, Paris (France): pp. 19-38.

- Courbon J.C., 1993. Systèmes Interactifs d'Aide à la Décision. In Sfez L. (Ed.), « *Dictionnaire Critique de la Communication* », PUF, Paris.
- Crousse B., Mathieu P., Seck S.M., 1991. Introduction. In Crousse B., Mathieu P., Seck S.M. (Eds) « *La vallée du fleuve Sénégal. Evaluations et perspectives d'une décennie d'aménagements* », Kartala, Paris, pp 9-13.
- Dingkuhn M., 1995. Climatic determinants of irrigated rice performance in the Sahel — III. Characterizing environments by simulating crop phenology. *Agricultural Systems*, 48 (4): 435-456.
- Dingkuhn M., 1997. Characterizing irrigated rice environments using the rice phenology model RIDEV. In "Irrigated rice in the Sahel : prospects for sustainable development", ADRAO/WARDA, Dakar, pp. 343-360.
- Dingkuhn M., Miézan K.M., 1995. Climatic determinants of irrigated rice performance in the Sahel — II. Validation of photothermal constants and characterization of genotypes *Agricultural Systems*, 48 (4): 411-433.
- Dingkuhn M., Sow A., 1997. Potentials yields of irrigated rice in the Sahel. In "Irrigated rice in the Sahel : prospects for sustainable development", ADRAO/WARDA, Dakar, pp. 361-380.
- Dounias I., 1998. *Modèles d'action et organisation du travail pour la culture cotonnière: cas des exploitations agricoles du bassin de la Bénoué au Nord Cameroun*. Thèse INA-PG, Paris, pp. 208+annexes.
- Duru M., Papy F., Soler L.G., 1988. Le concept de modèle général et l'analyse du fonctionnement de l'exploitation agricole. *C.R. Acad. Agric. Fr.*, 74, 81-91.
- Duvail S., Mietton M., Gourbesville P., 2001. Gestion de l'eau et interactions société-nature le cas du delta du Sénégal en rive mauritanienne. *Nature Sciences Sociétés*, 9 (2) : 5-16.
- Foster, S., Chilton, J., Moench, M., Cardy, F., Schiffler, M., 2000. Groundwater in rural development: facing the challenges of supply and resource sustainability. *World Bank Technical Paper* n°463.
- Froukh L.J., 2007. Water demand management of the west bank. *Third regional workshop on water and sustainable development in the Mediterranean*, CIHEAM-IAMZ, Zaragoza (Spain), march 19-21 2007.
- Gaudé P., 2003. *Système Multi-Agents et Jeux: Domaines d'application et bénéfices mutuels*. Observatoire Français des Techniques Avancées, Paris.
- Gomez-Limon J.A, Riesgo L., 2004. Irrigation water pricing : differential impacts on irrigated farms. *Agricultural Economics*, 31 (1): 47-66.
- Grijol K., Decoudras P.M., 1996. Les marchés hebdomadaires : un facteur essentiel du développement économique et social au Sénégal. L'exemple du marché de Ndoum. *Les Cahiers d'Outre-Mer*, 1996, 49 (195) : 297-316.
- Hatchuel A., Molet H., 1986. Rational modelling in understanding aid aiding human decision making, *European Journal of Operational Research*, 24: 179-186.
- 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 (3): 177-196.
- Hémidy L., 1985. *Gestion de la trésorerie : application de la théorie des flots et optimisation*. INRA-ESR, Grignon, multig., 57 p.

Hémidy L., 1986. Organisation du travail en salle de traite : une approche par simulation. *Bulletin Technique d'Information*, 412-413 ("Organisation du travail et systèmes de production en agriculture") : 61-67.

Hémidy L., 1992. *La gestion, l'informatique et les champs : construction d'usages et transformation des pratiques autour d'instruments de gestion agricole informatisés*. Thèse de doctorat en gestion, Ecole Polytechnique, Centre de Recherche en Gestion, Paris, INRA-ESR, Grignon, 225 p.

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.

IPTRID (Programme International pour la Recherche et la Technologie en Irrigation et Drainage), 2004. *Identification et diffusion de bonnes pratiques sur les périmètres irrigués en Afrique de l'Ouest*. Projet GCP/RAF/355/FRA. Rapport technique final. IPTRID, FAO, Rome.

Jamin J.Y., 1986. La double-culture du riz dans la Vallée du Fleuve Sénégal : Mythe ou Réalité ? *les Cahiers de la Recherche Développement*, 12 : 64-55.

Jamin J.Y., Caneill J., 1983. *Diagnostic sur les systèmes de culture pratiqués dans le cadre de la SAED sur la rive gauche du fleuve Sénégal. T.3 : Etude des systèmes de culture irriguée*. St Louis, ISRA-CIRAD-INA-PG, 285 p. + annexes.

Jelassi M.T., Beauclair R.A., 1987. An integrated framework for group decision system design. *Information and Management*, 13: 143-153.

Keating, B.A., Carberry, P.S., Hammer, G.L., Probert, M.E., Robertson, M.J., Holzworth, D., Huth, N.I., Hargreaves, J.N.G., Meinke, H., Hochman, Z., McLean, G., Verbug, K., Snow, V., Dimes, J.P., Silburn, M., Wang, E., Brown, S., Bristow, K.L., Asseng, S., Chapman, S., McCown, R.L., Freebairn, D.M., Smith, J.C., 2003. An overview of APSIM, a model designed for farming system simulation. *Agricultural Systems* 18, 267-288.

Keating, B.A., McCown, R.L., 2001. Advances in farming systems analysis and intervention. *Agricultural Systems* 70, 555-579.

Le Bars M., Le Grusse P., 2008. Use of a decision support system and a simulation game to help collective decision-making in water management. *Computers and Electronics in Agriculture*, in press.

Leenhardt D., Cernesson F., Mary J. F., Mesmin D., 2005. Anticiper l'assolement pour mieux gérer les ressources en eau : comment valoriser les données d'occupation du sol ? *Ingénieries*, 42: 13-22.

Le Gal P.Y., Dia I., 1991. Le désengagement de l'Etat et ses conséquences dans le delta du fleuve Sénégal. In Crousse B., Mathieu P., Seck S.M. (Eds), « *La vallée du fleuve Sénégal - Evaluations et perspective d'une décennie d'aménagement* », KARTHALA, Paris, pp 161-174

Le Gal P.Y., Papy F., 1998. Co-ordination processes in a collectively managed cropping system: double cropping of irrigated rice in Senegal. *Agricultural Systems*, 57 (2) : 135-159.

Le Grusse P., 2001. Du local au global les dynamiques agro-alimentaires territoriales face au marché mondial. Quels instruments d'aide à la décision pour l'élaboration de Stratégies Territoriales ? *CIHEAM, Options méditerranéennes Série B Etudes et recherche*, 32: 239-258.

Leroy P., 1986. *Programmation linéaire mixte et alimentation hivernale d'un troupeau laitier*. Mémoire de DEA : Science des organisations - Université Paris 9, Paris, 104 p.

Leroy P., 1989. LACC : un logiciel d'aide au choix des cultures. *Cultivar*, 249 : 77-79.

Leroy P., Jacquin C., Deumier, J.M., 1993. LORA et la gestion de l'eau dans l'exploitation agricole. *Perspectives Agricoles*, 184: 73-82.

- Leroy P., Deumier J.M., Jacquin C., 1997. IRMA : un simulateur de l'organisation des chantiers d'irrigation. *Perspectives Agricoles*, 228: 76-83.
- Lericollais A., Sarr A., 1995. Histoires de périmètres. In P. Boivin, I. Dia, A. Lericollais, J.C. Poussin, C. Santoir et S.M. Seck (Eds) "*Nianga, laboratoire de l'agriculture irriguée en moyenne vallée du fleuve Sénégal*", ORSTOM, coll. Colloques et Séminaires, Dakar, pp 5-36.
- Lévine P., Pomerol J.C., 1989, *Systèmes interactifs d'aide à la décision et systèmes experts*, Hermès, Paris.
- Loyce C, Rellier JP, Meynard JM, 2002. Management planning for winter wheat with multiple objectives (1): The BETHA system. *Agricultural Systems*, 72: 9-31.
- 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 P., 1991. Irrigation, transformation économique et enjeux foncier. In Crousse B., Mathieu P., Seck S.M. (Eds), « *La vallée du fleuve Sénégal - Evaluations et perspective d'une décennie d'aménagement* », KARTHALA, Paris, pp 198-214.
- Mérot A., 2007. *Analyse et modélisation du fonctionnement biophysique et décisionnel d'un système prairial irrigué - Application aux prairies plurispécifiques de Crau en vue de l'élaboration d'un Outil d'Aide à la Décision*. Thèse, SupAgro – Université de Montpellier II.
- Meynard J.M., 1985. *Construction d'itinéraires techniques pour la conduite du blé d'hiver*. Thèse doct. ing. INA-PG, Paris, 258 pp. + annexes.
- Meynard J.M., 1997. Which crop models for decision support in crop management ? Example of the DECIBLE system. *Proceeding of the INRA-KCW workshop on DSS*, Laon.
- Milleville P., 1987. Recherches sur les pratiques des agriculteurs. *Cahiers de la Recherche-Développement*, 16: 3-7
- Milleville P., 1991. Du souhaitable agronomique au possible agricole : à propos du modèle technique et des vicissitudes de son transfert. In Chauveau J.P., Finot N., Gondard P., Maizi, P., Mersadier G., Milleville P. (Eds.) « *L'innovation en milieu agraire : recueil de textes pour la table-ronde du laboratoire d'études agraires : 17-18 octobre 1991* », multig., pp 1-4.
- Milleville P., Serpantié G., 1992. Regards sur l'élaboration de la production agricole en agriculture paysanne tropicale : problèmes de méthodes. In ORSTOM (Ed.) « *Séminfor 5 : Cinquième Séminaire Informatique de l'ORSTOM* », 2-4 septembre 1991, Montpellier, pp. 107-123.
- Montginoul M., 1997. *Une approche économique de la gestion de l'eau d'irrigation: des instruments, de l'information et des acteurs*. Thesis, « Economie du développement agricole agro-alimentaire et rural », University of Montpellier I, Montpellier.
- Niasse M., 2007. *Analyse Diagnostique Environnementale Transfrontalière du Bassin du Fleuve Sénégal*. Office de Mise en Valeur du fleuve Sénégal – Projet GEF- Bassin du fleuve Sénégal. Dakar (Sénégal).
- Nuttall C., 1991. Quels types d'aménagement du territoire ? In Crousse B., Mathieu P., Seck S.M. (Eds), « *La vallée du fleuve Sénégal - Evaluations et perspective d'une décennie d'aménagement* », KARTHALA, Paris, pp 83-96.
- Papy F., Attonaty J.M., Laporte C., Soler L.G., 1988. Work organization simulation as a basis for farm management advice. *Agricultural Systems*, 27: 295-314.
- Philippe C., Kane A., Handschumacher P., Mietton M., 1997. Aménagements hydrauliques et gestion de l'environnement dans le delta du fleuve Sénégal (Axe Gorom-Lampsar - Sénégal). In :

Pratiques de gestion de l'environnement dans les pays tropicaux. Journées de Géographie Tropicale du Comité National de Géographie, 6-8 sept. 1995, Talence (France), pp. 389-401.

Piveteau V., 1996. *Prospective et territoire : apports d'une réflexion sur le jeu*, Cemagref-Editions, Antony (France), 298 pp.

SAED, 1997. *Recueil des statistiques de la vallée du fleuve Sénégal. Annuaire 1995/1996. Version détaillée*. République du Sénégal, Ministère de l'Agriculture, SAED, 142 pp.

Santoir, 1994. Des pasteurs sur les périmètres. In P. Boivin, I. Dia, A. Lericollais, J.C. Poussin, C. Santoir et S.M. Seck (Eds) "*Nianga, laboratoire de l'agriculture irriguée en moyenne vallée du fleuve Sénégal*", ORSTOM, coll. Colloques et Séminaires, Dakar, pp 375-406

Scheierling M., Loomis J.B., Young A., 2006. Irrigation water demand: A meta-analysis of price elasticities. *Water Resources Research*, 42, W01411, doi:10.1029/2005WR004009.

Sébillotte M., 1974. Agronomie et agriculture. Essai d'analyse des tâches de l'agronome. *Cahier ORSTOM, série Biologie*, 24 (1): 3-25.

Sébillotte M., 1978. Itinéraires techniques et évolution de la pensée agronomique. *C.R. Acad. Agric. Fr.*, 64 (11): 906-914.

Sebillotte M., Soler L.G., 1988. Le concept de modèle général et la compréhension du comportement de l'agriculteur. *C.R. Acad. Agric. Fr.*, 74, 59-70.

Sebillotte M., Soler L.G., 1990. Les processus de décision des agriculteurs: I. Acquis et questions vives. In J. Brossier, B. Vissac, J.L. Le Moigne (Eds): *Modélisation systémique et système agraire*, INRA, Paris, pp. 93-116.

Sébillotte M., 1990a. Système de culture, un concept opératoire pour les agronomes. In Combes L, et Picard D. (Eds), « *Les systèmes de culture* », INRA, Paris, ISBN 2-7380-0256-0, pp. 165-196.

Sebillotte M., 1990b. Les processus de décision des agriculteurs. II. Conséquences sur les démarches d'aide à la décision. In J. Brossier, B. Vissac, J.L. Le Moigne (Eds): *Modélisation systémique et système agraire*, INRA, Paris, pp. 103-117.

Seck S.M., 1991. Sur la dynamique de l'irrigation dans la vallée du fleuve. In Crousse B., Mathieu P., Seck S.M. (Eds), « *La vallée du fleuve Sénégal - Evaluations et perspective d'une décennie d'aménagement* », KARTHALA, Paris, pp 17-43.

Simon H.A., 1960. *The New Science of Management Decision*, Harper and Row, New York.

Simon H.A., 1983. Administration et processus de décision, *Economica*, Paris.

Steinberg J. 2000. L'apport de la sémiologie graphique de Jacques Bertin à la cartographie pour l'aménagement et l'urbanisme. *Cybergeog*, Colloque « 30 ans de sémiologie graphique », article 146, <http://www.cybergeog.eu/index6470.html>.

Tarrière C., 1993. La dynamique sociale des GIE, village de Donaye. In Boivin P, Dia I, Lericollais A, Poussin JC, Santoir C et Seck SM (Eds) « *Nianga, Laboratoire de l'agriculture irriguée en moyenne vallée du Sénégal* », ORSTOM Editions (Paris), pp 339-374.

Victoria, F.B., Viegas Filho J.S., Pereira L.S., Teixeira, J.L., Lanna A.E., 2005. "Multi-scale modeling for water resources planning and management in rural basins." *Agricultural Water Management*, 77 (1-3): 4-20.

Wakerman JB, 1994. Le financement de la riziculture irriguée au Sénégal : l'exemple de la région du fleuve. In P. Boivin, I. Dia, A. Lericollais, J.C. Poussin, C. Santoir et S.M. Seck, (Eds) "*Nianga*,

laboratoire de l'agriculture irriguée en moyenne vallée du fleuve Sénégal", ORSTOM, coll. Colloques et Séminaires, Dakar, pp 457-486

WARDA, SAED, 2001. *Manuel pratique pour la riziculture irriguée dans la vallée du fleuve Sénégal*. ADRAO, BP 96, St.Louis, Sénégal, 121 pp. + annexes

Wichelns, D., 2003. Enhancing water policy discussions by including analysis of non-water inputs and farm-level constraints. *Agricultural Water Management*, 62 (2): 93-103.

Wopereis M.C.S., Haefele S.M., Kebbeh M., Miezani K.M., Diack B.S., 2001. Improving the productivity and profitability of irrigated rice production in Sahelian West Africa. In: *Proceedings of the Expert Consultation Meeting on Yield Gap and Productivity Decline in Rice Production at FAO*, Rome, Italy, 5-7 September 2000, pp. 117-142.

Yoshida, Y. 1981. *Fundamentals of Rice Crop Science*. IRRI, Los Baños, Philippines.