HAL
open science

Processus de sélection des technologies d'irrigation par les agriculteurs : entre interactions sociales et choix rationnels

Lionel Richefort

To cite this version:

Lionel Richefort. Processus de sélection des technologies d'irrigation par les agriculteurs : entre interactions sociales et choix rationnels. Economies et finances. Université de la Réunion, 2008. Français. NNT : . tel-00409012

HAL Id: tel-00409012

https://theses.hal.science/tel-00409012

Submitted on 4 Aug 2009

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Université de La Réunion - CIRAD

Processus de sélection des technologies d'irrigation par les agriculteurs : entre interactions sociales et choix rationnels

Thèse

Pour le Doctorat en Sciences Economiques

Sous la direction de
Marie-Estelle Binet et Jean-Louis Fusillier

Présentée et soutenue le 1er décembre 2008

par

Lionel Richefort

Membres du Jury

Marc Baudry. Professeur à l'Université de Nantes, *Rapporteur*

Marie-Estelle Binet. Maître de conférences HDR à l'Université de Rennes 1

Fabrizio Carlevaro. Professeur à l'Université de Genève, *Rapporteur*

Jean-Louis Fusillier. Ingénieur de recherche, CIRAD

Dominique Lepelley. Professeur à l'Université de La Réunion

L'Université de La Réunion n'entend donner aucune approbation ou improbation aux opinions émises dans les thèses. Ces opinions doivent être considérées comme propres à leurs auteurs.

“Toutes les similitudes d’origine sociale, qui se remarquent dans le monde social, sont le fruit direct ou indirect de l’imitation sous toutes ses formes, imitation-coutume ou imitation-mode, imitation-sympathie ou imitation-obéissance, imitation-instruction ou imitation-éducation, imitation naïve ou imitation réfléchie, etc.”

Gabriel Tarde, *Les lois de l’imitation*, 1890.

Remerciements

Je tiens à remercier Marie-Estelle Binet pour son précieux encadrement au cours de cette thèse. Son aide scientifique, sa disponibilité et son écoute à mes interrogations m'ont permis de persévérer dans mon travail. Je souhaite lui exprimer ma profonde gratitude.

Pour les nombreuses recommandations qui m'ont permis de mener à bien cette thèse, j'adresse ma plus vive reconnaissance à Jean-Louis Fusillier. J'ai pu, grâce à son appui constant et à sa confiance en mes travaux, réaliser au mieux cette recherche.

Je remercie chaleureusement Stéfano Farolfi pour son aide, ses commentaires sur le fond et la forme ainsi que pour sa disponibilité au cours de ce travail.

Je remercie également Fabrizio Carlevaro, Michel Paul et Thierry Rieu pour leurs nombreux conseils.

Je remercie Marc Baudry et Fabrizio Carlevaro pour l'intérêt qu'ils ont bien voulu porter à ma thèse en acceptant d'en être les rapporteurs. Dominique Lepelley fait l'honneur de présider mon jury ; je lui en suis reconnaissant.

J'associe à ces remerciements l'ensemble du personnel de la station CIRAD de La Réunion pour leur soutien amical, leur diponibilité ainsi que pour les conditions matérielles d'encadrement. Je remercie aussi les membres de l'UMR G-EAU et du CERESUR.

Enfin, merci à ma famille et à mes amis.

Et surtout merci à Sophie, en témoignage de mon amour profond, pour son aide de tous les instants. Je dédie cette thèse à notre fille Lila.

Résumé

Cette thèse est consacrée à l'analyse économique du processus de changement technique des agriculteurs dans le domaine de l'irrigation sous l'effet d'incitations publiques, d'entraînement collectif et de logiques individuelles de profitabilité. Le premier chapitre analyse le déroulement et les déterminants de la diffusion des technologies d'irrigation améliorées à l'île de la Réunion. Une enquête auprès des irrigants combinée à une revue de la littérature empirique nous permet de regrouper ces facteurs-clés en trois axes : les caractéristiques des irrigants, les caractéristiques du contexte d'adoption des irrigants et les caractéristiques des technologies d'irrigation. Deux cadres théoriques complémentaires permettant de conceptualiser ces déterminants sont ensuite discutés : l'approche néoclassique et l'approche évolutionniste. Dans le second chapitre, une approche de diffusion globale est mise en œuvre pour évaluer l'impact des incitations publiques sur l'adoption d'une nouvelle technologie d'irrigation par une population d'agriculteurs. Une méthodologie d'estimation des paramètres de diffusion est développée et appliquée à la diffusion de l'aspersion en couverture intégrale à La Réunion de 1990 à 2006. Elle montre un effet positif significatif des subventions à cet équipement. Dans le troisième chapitre, un cadre conceptuel probabiliste est testé pour évaluer les déterminants du processus de sélection des nouvelles technologies d'irrigation à l'échelle de l'exploitation. Finalement, la thèse soutient l'idée d'une différenciation des processus, et donc des modèles explicatifs pertinents, selon la complexité de l'équipement innovant en diffusion.

Abstract

This thesis is devoted to the economic analysis of the process of irrigation technologies selection by farmers under the effect of public incentives, imitation and private rationality. The aim of the first chapter is to analyse the factors affecting the diffusion of irrigation technologies in La Reunion Island (France). A survey on irrigated farms combined with a review of the empirical literature allow us to cluster these key factors within three axes : farmers' characteristics, farmers' adoption context characteristics and irrigation technology characteristics. Two theoretical frameworks conceptualizing these key factors are then discussed : the neoclassical approach and the evolutionary approach. In the second chapter, a conceptual framework is designed to assess the impact of public incentives on the selection process of a new irrigation technology by a population of farmers. A methodology, allowing to estimate the parameters of diffusion, is developped and applied to the diffusion of the sprinkler integral cover system in La Reunion Island over period 1990-2006. Results show that the characteristic diffusion path is not perfectly symmetric and is significantly affected by equipment subsidies. In the third chapter, a probabilistic framework is tested for evaluating the role played by the determinants of the selection process of new irrigation technologies at the farm-level. Finally, this thesis defends the idea of a differentiation of the diffusion processes, and so of the relevant explicative models, according to the complexity of the innovative equipment.

Table des matières

Introduction **23**

1 La diffusion des technologies d'irrigation à l'île de la Réunion **39**

1.1 Introduction 39

1.2 Problématique 44

1.2.1 Présentation des périmètres irrigués 44

1.2.2 Les enjeux du changement de technologies d'irrigation 47

1.2.3 L'enquête auprès des irrigants 50

1.3 Les facteurs empiriques de sélection des technologies d'irrigation 55

1.3.1 Les caractéristiques des irrigants et de leurs exploitations 55

1.3.2 Les caractéristiques du contexte d'adoption des irrigants 61

1.3.3 Les caractéristiques des technologies d'irrigation 67

1.4 Les approches théoriques du changement de technologies d'irrigation . . 71

1.4.1 Les modèles de sélection des technologies d'irrigation par les agriculteurs 72

1.4.1.1 La sélection par une population d'agriculteurs 72

1.4.1.2 La sélection par un agriculteur représentatif 77

1.4.2 L'approche évolutionniste du changement technologique 82

1.4.3 Le choix des modèles de sélection des technologies d'irrigation par les agriculteurs de La Réunion 91

1.5 Conclusion 95

2 La sélection collective des technologies d'irrigation 99

2.1 Introduction 99

2.2 Cadre conceptuel 102

2.2.1 Le sentier de diffusion 103

2.2.2 La fonction de diffusion technologique 104

2.3 Stratégie d'estimation 107

2.3.1 Les variables utilisées 108

2.3.2 La procédure d'estimation 111

2.3.2.1 L'estimation de la proportion d'adoptions cumulées dans le temps 111

2.3.2.2 L'estimation de la proportion d'adoptions dans chaque intervalle de temps 113

2.4 Résultats d'estimation 120

2.4.1 Les caractéristiques du sentier de diffusion 120

2.4.2 Le rôle des incitations publiques 122

2.4.2.1 Les subventions à l'équipement 122

2.4.2.2 Le conseil à l'irrigation 128

2.5 Conclusion 134

3 La sélection individuelle des technologies d'irrigation 137

3.1 Introduction 137

3.2 Cadre conceptuel 141

3.2.1 Le modèle dans un cadre déterministe 141

3.2.2 Le modèle dans un cadre incertain 144

3.3 Stratégie d'estimation 147

3.3.1 Les variables utilisées 147

3.3.2 La procédure d'estimation 154

3.3.2.1 La spécification du modèle 155

3.3.2.2 L'estimation des déterminants du choix individuel d'adoption technologique 157

3.3.2.3 Le calcul des élasticités et des probabilités d'adoption agrégée 159

3.4 Résultats d'estimation 160

3.4.1 Les caractéristiques du seuil d'adoption 161

3.4.2 Le rôle des principaux facteurs d'adoption 165

3.4.2.1 Les facteurs économiques 168

3.4.2.2 Les facteurs liés au risque 172

3.4.2.3 Le réseau social des irrigants 177

3.5 Conclusion 180

Conclusion **185**

A Technique d'enquête **197**

A.1 Objectifs de l'enquête 197

A.1.1 Axes de recherche 200

A.1.2 Population étudiée et taille d'échantillon 201

A.2 Stratégie d'échantillonnage 207

A.3 Recueil des données 213

A.3.1 Questionnaire 213

A.3.2 Mise en œuvre 215

A.3.3 Variables récoltées 216

Bibliographie **223**

Liste des tableaux

1.1 Consommation en eau unitaire selon le matériel d'irrigation par grande zone pédo-climatique à La Réunion 49

1.2 Technologies d'irrigation présentes sur les périmètres irrigués du sud de La Réunion en 2006 54

1.3 Avantages et inconvénients de l'irrigation de la canne à sucre par aspersion 68

1.4 Avantages et inconvénients de l'irrigation de la canne à sucre localisée au goutte-à-goutte 69

1.5 Modèles appropriés pour analyser la sélection des technologies d'irrigation améliorées par les irrigants de La Réunion 94

2.1 Proportion d'adoptions et taux de subvention de l'aspersion en couverture intégrale à La Réunion, 1990-2006 110

2.2 Résultats d'estimation du modèle logistique avec paramètres de diffusion constants, 1990-2006 121

2.3 Résultats d'estimation du modèle logistique avec paramètres de diffusion endogènes, 1990-2006 124

2.4 Résultats d'estimation du modèle de Gompertz avec paramètres de diffusion endogènes, 1990-2006 127

2.5 Résultats d'estimation du modèle de Bass avec paramètres de diffusion endogènes, 1990-2006 130

3.1 Caractéristiques des technologies d'irrigation 149

3.2 Caractéristiques des irrigants 151

3.3 Caractéristiques du contexte d'adoption des irrigants 152

3.4 Résultats du modèle logit multinomial pour le choix d'une nouvelle technologie d'irrigation 162

3.5 Elasticités, effets marginaux et probabilités agrégées 166

A.1 Moyenne des consommations en eau et des besoins en eau par micro-zone sur les périmètres du sud de La Réunion 205

A.2 Aperçu de la variabilité des consommations d'eau inter-exploitations sur les périmètres du sud de La Réunion 206

A.3 Répartition des exploitations cannières irriguées par zone sur les périmètres du sud de la Réunion 209

A.4 Répartition des exploitations cannières enquêtées par zone sur les périmètres du sud de la Réunion 211

A.5 Aperçu des variables individuelles récoltées 217

Table des figures

1.1 La distribution des exploitations irriguées selon la SAU sur les périmètres du sud de La Réunion 46

1.2 La trajectoire des technologies d'irrigation sur les périmètres irrigués du sud de La Réunion, 1970-2006 53

1.3 L'adoption des technologies d'irrigation selon la surface par actif à l'île de la Réunion 56

1.4 L'évolution du prix courant de l'eau d'irrigation à La Réunion, 1990-2006 (périmètres SAPHIR) 62

1.5 Le coût subventionné et non subventionné des technologies d'irrigation améliorées à l'île de la Réunion, 2000-2006 64

1.6 Les tours d'eau pratiqués selon le type de technologie d'irrigation sur les périmètres irrigués du sud de La Réunion 70

1.7 La courbe de diffusion d'une nouvelle technologie 73

1.8 La distribution des adopteurs potentiels 78

1.9 Le référentiel évolutionniste du changement technologique 84

1.10 Le contexte institutionnel du changement technologique dans le secteur de l'irrigation à La Réunion 90

2.1 L'effet théorique d'une hausse des subventions à l'équipement sur le sentier de diffusion d'une nouvelle technologie d'irrigation 104

2.2 La diffusion des nouvelles technologies d'irrigation à l'île de la Réunion, 1990-2006 109

2.3 Les résultats d'estimation pour $\frac{n_t}{N}$ du modèle logistique avec β_t et N_t constants 123

2.4 Les résultats d'estimation pour ΔX_t du modèle logistique avec β_t constant et $N_t = N\left(1 - \gamma\left(1 - S_t\right)\right)$ 125

2.5 Les résultats d'estimation pour ΔX_t du modèle de Gompertz avec $\beta_t = \beta + \eta S_t$ et N_t constant 129

2.6 Les résultats d'estimation pour ΔX_t du modèle de Bass avec $\beta_t = \beta + \eta S_t$ et N_t constant 132

3.1 Les probabilités d'adoption agrégée en fonction du rapport surface par actif 169

3.2 Les probabilités d'adoption agrégée en fonction de l'objectif de productivité en canne à sucre 171

3.3 Les probabilités d'adoption agrégée en fonction du besoin en eau 173

3.4 Les probabilités d'adoption agrégée en fonction de l'intensité de la diversification 174

3.5 Les probabilités d'adoption agrégée en fonction du bénéfice d'un revenu extérieur à l'agriculture 176

3.6 Les probabilités d'adoption agrégée en fonction de l'appartenance à une association d'irrigants 178

A.1 Les périmètres irrigués de l'île de la Réunion 199

A.2 La localisation des micro-zones sur les périmètres irrigués du Bras de Cilaos et du Bras de la Plaine 202

A.3 La fréquence des exploitations cannières irriguées en sous-consommation et sur-consommation d'eau 210

A.4 La fréquence des exploitations cannières enquêtées en sous-consommation et sur-consommation d'eau 212

A.5 Les taux d'adoption des technologies d'irrigation sur les périmètres irrigués du sud, 1990-2006 216

A.6 Guide d'entretien, partie 1 219

A.7 Guide d'entretien, partie 2 220

A.8 Guide d'entretien, partie 3 221

Introduction

"In the long run, the development and wide-spread application of new technologies can greatly ameliorate what, in the short run, sometimes appears to be overwhelming conflicts between economic well-being and environmental quality" (Adam Jaffe et Robert Stavins, 1990, p. 1)

La question des moyens à mobiliser afin de mieux répartir et mieux valoriser l'eau est un des défis majeurs du XXI ème siècle. Ressource naturelle aux usages multiples (urbain, agricole, industriel, environnemental, etc.), l'eau est à la fois un support de vie, un facteur de production essentiel et un vecteur d'externalités. Alors que la maîtrise de la demande en eau, tant pour les usages urbains qu'agricoles et industriels, apparaît aujourd'hui une priorité pour la gestion durable d'une ressource rare et fragile, le caractère de bien commun non réductible à la seule dimension marchande de l'eau rend particulièrement difficile la mise en oeuvre d'outils de régulation des usages tels qu'une tarification incitative ou des marchés de l'eau. Un intérêt croissant est désormais porté sur les incitations à l'adoption d'équipements et de technologies plus économes en eau, considérées comme une des solutions permettant d'économiser la

ressource à moindres coûts pour la société.

La recherche du *juste prix* de l'eau pour répondre à différents objectifs a fait l'objet ces dernières années de nombreux travaux, tant pour l'eau agricole (Caswell et al. 1990 ; Moore et al. 1994 ; Montginoul, 1997 ; Couture, 2000 ; Schoengold et al., 2005 ; Amigues et al., 2006) que pour l'eau à usage domestique (Hewitt et Hanemann, 1995 ; Nauges, 1999 ; Nauges et Reynaud, 2001 ; Binet et al., 2006 ; García-Valiñas et Muñiz, 2007). Il en ressort plusieurs controverses sur l'intérêt de mécanismes de marché pour allouer la ressource et sur l'élasticité de la demande en eau par rapport au prix. Dans le domaine agricole, s'il est généralement admis que le prix de l'eau ne peut être augmenté que dans de modestes proportions, la question du couplage d'incitations de type tarification de l'eau et incitations au changement technique (par l'aide aux investissements, le conseil et la formation à l'irrigation, etc.) pour maîtriser la demande en eau mérite d'être approfondie. En particulier, le rôle que peut jouer un système d'incitations à l'économie d'eau, dans l'effort d'investissement des irrigants apparaît comme une problématique originale.

Cette thèse permet d'alimenter le débat concernant cette problématique. Elle est consacrée à l'analyse économique du processus de sélection des technologies d'irrigation par les agriculteurs.

L'île de la Réunion présente un intérêt certain pour traiter cette problématique.

En premier lieu, malgré d'abondantes ressources globales en eau, la mauvaise répartition de cette ressource dans l'espace et dans le temps conduit à des pénuries et à des conflits d'usage sur une grande partie de la côte sous le vent. La forte croissance démographique et l'extension de l'irrigation entraînent une tension sur la ressource en eau, confrontée sur les nappes littorales au problème des intrusions salines. D'autre part, la gestion de la ressource a surtout porté jusqu'à présent sur la mobilisation de ressources nouvelles. Le projet du transfert des eaux de l'Est illustre bien cette orientation. Mais l'augmentation des disponibilités paraît compromise à l'avenir compte tenu de l'ampleur des coûts à supporter pour de futurs ouvrages de transfert ou stockage des eaux et des risques pour l'environnement. A son achèvement, le projet du transfert apportera une ressource tout juste suffisante pour couvrir les besoins de la côte Ouest et le SDAGE [1] prévoit un retour à des situations de déficit saisonnier en eau à l'horizon 2015.

La réorientation vers une gestion de la demande et plus seulement de l'offre, est donc aujourd'hui une préoccupation majeure qui s'inscrit bien dans la nouvelle politique de l'eau (Journée sur l'eau au Conseil Général de La Réunion, avril 2005 [2]). Les marges d'économies d'eau au niveau de la demande en eau agricole semblent importantes car on constate fréquemment des consommations excessives par rapport aux besoins des cultures. L'investissement dans du matériel d'irrigation performant, la

[1] Schéma Directeur d'Aménagement et de Gestion des Eaux.

[2] Atelier n°2, "Les leviers financiers de l'action : le prix de l'eau, les systèmes de financement (actuels et futurs), la tarification - Quelles incidences sur la gestion ?"

maîtrise technique et la disponibilité en main d'œuvre semblent en cause (Fusillier et Saqué, 2003). Une politique d'incitations à l'adoption de nouvelles technologies plus économes en eau a été mise en place, permettant aux agriculteurs de bénéficier d'une aide aux investissements en matériel d'irrigation censée " participer aux gains de productivité dans toute l'île [...] et ce avec des volontés d'économiser la ressource en eau " (DOCUP [3] 2000-2006 [4]).

Cette thése est appliquée au secteur agricole des périmètres du sud de l'île de la Réunion. Ce secteur se singularise par une très forte dominance de la culture de canne à sucre (plus de 80 % des surfaces agricoles). Cette culture est très gourmande en eau (85 % de la consommation annuelle moyenne d'eau agricole).

Afin d'obtenir des bénéfices sociaux et environnementaux importants à partir de l'utilisation de nouvelles technologies d'irrigation permettant une meilleure valorisation de l'eau agricole, trois étapes sont nécessaires. La première étape concerne l'invention des nouvelles technologies d'irrigation. Cette étape correspond au développement de nouvelles idées concernant les techniques et pratiques d'irrigation. La deuxième étape concerne l'innovation des nouvelles technologies d'irrigation. Cette étape correspond à l'incorporation, pour la première fois, des nouvelles idées développées à la première étape dans des équipements pour l'irrigation qui soient commercialisables.

[3] Document Unique de Programmation.

[4] Cadre d'intervention du Fonds Européen d'Orientation et de Garantie Agricole (FEOGA), volet K3 01 02.

La troisième étape concerne la diffusion des nouvelles technologies d'irrigation. Cette étape correspond au processus graduel de sélection des nouvelles technologies d'irrigation par les agriculteurs à un niveau local. On distingue alors la sélection collective des nouvelles technologies d'irrigation, par une population d'agriculteurs, de la sélection individuelle des nouvelles technologies d'irrigation, à l'échelle d'une exploitation agricole.

L'analyse du processus de sélection des innovations par un système social a été discutée en profondeur par Everett Rogers (1962). Selon cet auteur, les innovations seraient progressivement adoptées par la population, de telle sorte que la représentation de leur taux de diffusion en fonction du temps conduirait à une courbe en S. Cela implique une distribution en cloche de la fréquence du nombre d'adopteurs dans le temps, au sein de laquelle cinq types de comportement d'adoption ont été spécifiés. Les premiers adopteurs, peu nombreux, sont répartis en deux catégories successives : les "innovateurs" et les "adopteurs précoces". Les adopteurs suivants sont les plus nombreux et sont scindés en deux catégories successives de taille à peu près égale : la "majorité précoce" et la "majorité tardive". Enfin, les individus adoptant l'innovation à la fin du processus de diffusion sont les "retardataires" (Bass, 1969).

L'application de cette spécification au domaine de l'irrigation est la première étape permettant de mettre en évidence la complexité du comportement des agriculteurs face à l'apparition de nouvelles technologies d'irrigation. Le contexte du comportement

d'adoption agrégée se caractérise donc par deux processus principaux. D'une part, il existe un "processus d'adoption" (ou de sélection individuelle) des technologies d'irrigation. Ce processus est rattaché aux mécanismes d'optimisation de l'utilité privée en faisant l'hypothèse que les agriculteurs font des choix technologiques rationnels. Cela permet d'expliquer l'hétérogénéité du timing des adoptions individuelles par des sensibilités différentes à des changements exogènes de certains paramètres composant la fonction d'utilité des agriculteurs. D'autre part, il existe un "processus de diffusion" (ou de sélection collective) des technologies d'irrigation. Ce processus est défini comme le processus de dissémination d'une nouvelle technologie d'irrigation au sein d'un périmètre irrigué ou d'une région. Cela permet d'expliquer les caractéristiques dynamiques du sentier d'adoption agrégée par des interactions sociales générant de l'apprentissage (endogène) et de l'imitation par le bouche-à-oreille ou les effets d'entraînement collectif (Feder et al., 1985 ; Feder et Umali, 1993 ; Brock et Durlauf, 2001 ; Jaffe et al., 2003).

Dans cette thèse, on s'intéresse à la fois au processus de sélection collective des technologies d'irrigation par une population d'agriculteurs (la diffusion) et au processus de sélection individuelle des technologies d'irrigation par un agriculteur (l'adoption).

Une première étape importante de cette recherche a consisté à construire une base de données originale permettant d'analyser simultanément ces deux processus. La rareté des données est souvent un frein à l'application de méthodes statistiques en

agriculture. Une base de données agro-économiques a été construite. Un échantillon représentatif d'agriculteurs appartenant aux périmètres irrigués du Bras de Cilaos et du Bras de la Plaine, au sud de La Réunion, a été conçu de manière empirique. Un guide d'entretien permettant d'obtenir, d'une part, l'évolution des taux d'adoption agrégée de chaque technologie d'irrigation calculés à partir de l'agrégation des données individuelles et de renseigner, d'autre part, un ensemble de facteurs susceptibles d'influencer le timing des adoptions individuelles a été élaboré et 110 agriculteurs ont été interrogés au sein de leur exploitation.

Une autre étape importante de ce travail a consisté à confronter ces observations de terrain à une revue de la littérature sur la sélection des technologies d'irrigation par les agriculteurs. Deux approches complémentaires de l'économie du changement technique ont été mobilisées : l'approche néoclassique et l'approche évolutionniste développée par Richard Nelson et Sidney Winter (Nelson et Winter, 1974 ; 1982). Dans le domaine de l'irrigation, l'approche néoclassique a essentiellement été mobilisée ces dernières années pour analyser le processus de sélection individuelle des technologies d'irrigation en faisant l'hypothèse que les agriculteurs décident d'adopter une nouvelle technologie d'irrigation suite à un raisonnement complexe aboutissant finalement à une analyse coûts-bénéfices sous incertitude. Peu d'études analysent la dynamique du processus de sélection à un niveau collectif à cause du manque de données historiques concernant les équipements pour l'irrigation.

L'approche évolutionniste n'a jamais été appliquée, à notre connaissance, au problème spécifique de la sélection des technologies d'irrigation par les agriculteurs. Cette approche a été récemment développée pour analyser les processus de diffusion et d'adoption de nouvelles technologies bénéfiques pour l'environnement par des producteurs. L'usage de ce référentiel dans notre recherche, en complément de l'approche standard, possède trois vertus principales. Il permet d'analyser le rôle des institutions dans un système complexe où tous les acteurs du changement technologique interragissent socialement. Il permet de mettre en évidence d'autres facteurs explicatifs de la sélection des technologies d'irrigation par les agriculteurs que les modèles standards. Il indique les extensions pertinentes à envisager concernant les modèles standards de choix technologique par les agriculteurs.

Un modèle de diffusion agrégée dans un cadre évolutif est développé. Dans notre modèle, le sentier d'adoption agrégée est fonction d'une variable économique. Le rythme ainsi que le plafond de ce sentier peuvent évoluer suite à des changements du contexte d'adoption des agriculteurs. La vitesse de diffusion et le nombre d'agriculteurs susceptibles d'adopter une nouvelle technologie d'irrigation peuvent varier *simultanément*. Un tel modèle n'a, à notre connaissance, jamais été appliqué au domaine spécifique de la diffusion d'une nouvelle technologie d'irrigation au sein d'un périmètre irrigué. Les modèles logistique, de Gompertz et de Bass sont utilisés pour spécifier la courbe de diffusion technologique. Un modèle général de régression non linéaire est spécifié et estimé par la méthode des moindres carrés non linéaires. Au

total, douze modèles sont estimés et des critères de choix de la meilleure spécification sont discutés et analysés. Cela nous permet de proposer une première contribution empirique originale.

Un modèle d'adoption individuelle dans un cadre incertain est développé. Le modèle est estimé en tenant compte de la complexité du matériel. L'adoption d'une nouvelle technologie d'irrigation sans outils de pilotage automatique de l'irrigation est différenciée de l'adoption d'une nouvelle technologie d'irrigation avec outils de pilotage automatique. Une telle distinction a rarement été prise en compte par les études empiriques sur l'adoption des technologies d'irrigation alors qu'il s'agit d'une distinction importante notamment lorsque la main d'œuvre est limitante. Le modèle logit multinomial à modalités non ordonnées est utilisé pour l'estimation. Une fonction d'utilité linéaire est spécifiée pour chaque nouvelle technologie. On estime le modèle avec une variable dépendante discrète, le choix d'une nouvelle technologie d'irrigation donnée, deux variables indépendantes continues et quatre variables indépendantes discrètes caractérisant les agriculteurs, leurs exploitations et leur contexte d'adoption. Cela nous permet de proposer une deuxième contribution empirique originale.

Les deux matériels d'irrigation analysés dans cette thèse sont l'irrigation par aspersion et l'irrigation localisée au goutte-à-goutte. Trois catégories d'irrigation par aspersion sont différenciées : l'aspersion en couverture mobile, l'aspersion en couverture totale et l'aspersion en couverture intégrale. Ces trois systèmes d'aspersion se

caractérisent notamment par le degré d'effort en main d'œuvre que doit fournir l'agriculteur pour irriguer sa parcelle. L'aspersion en couverture mobile est très exigeante en main d'œuvre. Ce système consiste en quelques asperseurs disposés en ligne le long d'une rampe mobile que l'agriculteur démonte et déplace à la main, de poste en poste, pour irriguer l'ensemble de sa parcelle. Ce système a évolué vers la couverture totale qui consiste à disposer sur la parcelle à irriguer un réseau de rampes sur lesquelles l'agriculteur déplace manuellement les asperseurs. Ce système reste cependant très exigeant en main d'œuvre avec l'obligation de déplacer quotidiennement les asperseurs. On a enfin abouti à la couverture intégrale qui consiste à disposer les rampes sur la parcelle et à les équiper de l'ensemble des asperseurs. Une fois posé, le réseau ainsi conçu reste fixe. La couverture intégrale présente l'avantage de supprimer la main d'œuvre pour les changements de poste.

La mise en eau successive des postes d'arrosage, qui peuvent comprendre une ou plusieurs rampes en fonctionnement simultané, est réalisée par l'ouverture ou la fermeture de petites vannes. Ces vannes peuvent être commandées de manière manuelle, semi-automatique (vannes volumétriques) ou automatique (programmateur d'arrosage). La quantité de main d'œuvre économisée grâce à la couverture intégrale dépend de ces vannes. Elle est presque totale lorsque les manœuvres de vannes en tête de rampe sont manuelles et devient totale lorsque la commande de ces vannes est automatique. Dans cette thèse, on étudie l'adoption du système d'aspersion en couverture intégrale combiné au choix de vannes.

On étudie aussi le processus d'adoption de l'irrigation localisée au goutte-à-goutte. Le réseau d'irrigation d'un système en goutte-à-goutte est composé d'une station de tête [5] et d'un réseau de distribution. Cette technique, qui permet d'éviter la percolation sous la zone racinaire, est a priori économe en eau puisque seule la fraction du sol exploitée par les racines est continuellement humectée. Elle permet aussi de minimiser les pertes d'eau liées au vent. Ce matériel est cependant beaucoup plus sophistiqué que l'aspersion et nécessite un travail technique et régulier de surveillance et d'entretien de la station de filtration.

L'analyse du rôle des incitations publiques sur le processus de sélection des technologies d'irrigation par les agriculteurs constitue un élément essentiel de ce travail. On évalue notamment le rôle des subventions à l'équipement. L'évolution du taux de subvention aux équipements est intégré à l'analyse et l'impact d'un changement de taux est estimé. Cette incitation publique est analysée grâce au modèle de diffusion agrégée dans un cadre évolutif. On évalue aussi le rôle du conseil à l'irrigation sur les choix technologiques des agriculteurs. Cette incitation est analysée grâce au modèle de diffusion agrégée ainsi qu'à travers le modèle d'adoption individuelle par le biais de variables corrélées au conseil reçu. On discute finalement du rôle du prix de l'eau.

On notera que les modèles économétriques proposés dans cette thèse permettent

[5] La station de tête comprend les systèmes de filtration et d'injection ainsi que des accessoires relatifs à la régulation de pression et à la protection du système.

d'analyser l'influence du prix de l'eau voire d'autres facteurs (prix de l'output, etc.) sur la sélection des technologies d'irrigation par les agriculteurs. Si le facteur prix ne varie pas entre les agriculteurs mais varie d'années en années, sa prise en compte peut se faire au sein du modèle de diffusion agrégée dans un cadre évolutif. Si le facteur prix varie peu d'années en années mais varie entre les agriculteurs, sa prise en compte peut se faire au sein du modèle des choix rationnels d'adoption. Dans le contexte de l'île de la Réunion, le prix de l'eau varie peu d'années en années et entre agriculteurs. On se concentre donc sur l'analyse économétrique des subventions à l'équipements et du conseil à l'irrigation.

Cette thèse est composée de trois chapitres, d'une conclusion et d'une annexe. Le premier chapitre vise à l'analyse des déterminants de la diffusion des technologies d'irrigation à l'île de la Réunion.

La première section introduit le chapitre. Dans la deuxième section, nous détaillons la problématique de la modernisation de l'irrigation à l'île de la Réunion. Les principales caractéristiques des périmètres irrigués ayant servi de terrain d'étude à cette recherche sont présentées. Nous présentons ensuite les enjeux du changement de technologies d'irrigation sur ces périmètres et enfin, nous exposons l'enquête réalisée auprès des irrigants afin de mieux comprendre leurs freins et motivations à l'adoption de nouvelles techniques et pratiques d'irrigation. La troisième section de ce chapitre est consacrée à l'analyse des facteurs empriques de sélection des technologies d'irrigation.

Nous analysons d'abord les caractéristiques des irrigants et de leurs exploitations, puis les caractéristiques du contexte d'adoption des irrigants et enfin, les caractéristiques des technologies d'irrigation. Dans la quatrième section, nous présentons les approches théoriques du changement de technologies d'irrigation. Les modèles standards de sélection des technologies d'irrigation sont d'abord présentés, puis l'approche évolutionniste du changement technologique est discutée, et enfin nous proposons les modèles adaptés à l'analyse de la sélection des technologies d'irrigation à l'île de la Réunion. La cinquième section conclut brièvement ce chapitre.

Le second chapitre est consacré à l'évaluation de l'impact des incitations publiques sur le processus de sélection collective de l'aspersion en couverture intégrale sur les périmètres irrigués du sud de l'île de la Réunion de 1990 à 2006.

La première section introduit le chapitre. Dans la deuxième section, le cadre conceptuel utilisé est présenté. On modélise d'abord le sentier de diffusion, puis la fonction de diffusion technologique. Dans la troisième section, nous exposons la stratégie d'estimation. On présente d'abord les variables utilisées, puis on développe la procédure d'estimation. On distingue notamment l'estimation de la proportion d'adoptions cumulées dans le temps de l'estimation de la proportion d'adoptions dans chaque intervalle de temps. Les résultats d'estimation sont analysés à la quatrième section. On explique d'abord les caractéristiques du sentier de diffusion, puis le rôle des incitations publiques telles que les subventions à l'équipement et le conseil à l'irrigation.

On conclut à la cinquième section en dérivant quelques recommandations pour les décideurs.

Le troisième chapitre est consacré à l'évaluation du rôle des déterminants du processus de sélection individuelle des technologies d'irrigation par les agriculteurs des périmètres du sud de l'île de la Réunion.

La première section introduit le chapitre. Dans la deuxième section, on développe le modèle de sélection technologique par un irrigant représentatif. On développe d'abord le modèle dans un cadre déterministe (pour une distribution climatique donnée) puis dans un cadre incertain en présence d'un aléa climatique. La stratégie d'estimation est exposée à la troisième section. On présente d'abord les variables utilisées puis la procédure d'estimation. On spécifie d'abord le modèle, puis on détaille l'estimation des déterminants du choix individuel d'adoption technologique et le calcul des élasticités et des probabilités d'adoption agrégée. Les résultats d'estimation sont analysés à la quatrième section. On explique d'abord les caractéristiques du seuil d'adoption de chaque nouvelle technologie d'irrigation puis le rôle des principaux facteurs d'adoption, répartis en trois catégories : les facteurs économiques, les facteurs liés au risque et le réseau social des irrigants. On conclut à la cinquième section en dérivant quelques recommandations pour les décideurs.

Un dernier chapitre conclut cette thèse. Une synthèse est réalisée concernant le

rôle des incitations publiques sur le processus de sélection des technologies d'irrigation par les agriculteurs de l'île de la Réunion. Les meilleurs instruments pour favoriser l'adoption de nouvelles technologies d'irrigation plus économes en eau sont dérivés, compte tenu du contexte local de l'île de la Réunion. Finalement, une description détaillée de la technique utilisée pour réaliser l'enquête sur les freins et motivations des agriculteurs à l'adoption de nouvelles techniques et pratiques d'irrigation est présentée en annexe.

Chapitre 1

La diffusion des technologies d'irrigation à l'île de la Réunion

1.1 Introduction

Sur l'île de la Réunion, des conflits d'usage sur la ressource en eau risquent d'apparaître à court terme. D'ici 2010, on prévoit des besoins de pointe de 400000 m^3/jour pour l'irrigation et de 200000 m^3/jour pour l'eau domestique. Un risque important de manque d'eau se profile à l'horizon de 2015. L'offre en eau en période d'étiage, estimée à 540000 m^3/jour (dont 350000 m^3/jour d'eau de surface), ne suffira pas à satisfaire la demande malgré une augmentation de plus de 10 % des prélèvements d'eau souterraine. Pour faire face à ces pressions, les Pouvoirs Publics prévoient d'améliorer la valorisation de l'eau agricole et de réduire les consommations unitaires (SAGE Sud

2004, objectif 1.4 [1]).

Dans ce contexte, le changement technologique dans le secteur de l'agriculture irriguée présente deux enjeux majeurs sur les plans environnemental et économique, et bénéficie ainsi d'importants soutiens publics. Il doit en effet contribuer d'une part à économiser la ressource en eau et d'autre part, à accroître la productivité des exploitations. L'incitation publique vise à améliorer le rapport coûts-bénéfices de l'adoption de nouvelles techniques d'irrigation par les agriculteurs en subventionnant l'équipement des agriculteurs et en soutenant la formation et l'appui-conseil aux irrigants (Fusillier, 2006). Un effort particulier de la collectivité a été notamment consenti durant la période 2000-2006 au cours de laquelle les taux de subvention aux matériels ont été majorés, passant de 40 % à 65 % pour l'aspersion en couverture intégrale et de 60 % à 75 % pour le goutte-à-goutte.

En dépit de ce soutien important, le changement technique sur ces périmètres irrigués apparaît assez lent et reste inachevé. Les raisons qui ont motivé certains agriculteurs à améliorer leur système d'irrigation et d'autres à ne pas changer de matériel et de pratiques méritent d'être approfondies. On peut s'interroger sur l'impact des

[1] Le Schéma d'Aménagement et de Gestion des Eaux (SAGE) est une déclinaison plus précise et plus fonctionnelle du Schéma Directeur d'Aménagement et de Gestion des Eaux (SDAGE), établi en 2001 à la Réunion par le Comité de Bassin au terme de 6 ans de procédure. Ces outils, prévus par la loi française sur l'eau de 1992, proposent une gestion fondée sur une logique d'action collective et de négociation. Le SAGE Sud de la Réunion est constitué d'un plan d'actions et d'un ensemble d'orientations développés à l'initiative des communes situées dans les zones à problèmes (en terme de satisfaction intertemporelle des besoins en eau) identifiées au préalable par le SDAGE (Fusillier et Laffond, 2004).

soutiens publics puisqu'on constate qu'une partie non négligeable d'agriculteurs s'est équipée seule, sans avoir recours à la subvention. Le rôle des interventions en conseil et formation par les structures d'appui (Chambre d'Agriculture, SAPHIR [2]) dans la dynamique d'équipement des agriculteurs peut également être questionné. Pour les Pouvoirs Publics se pose finalement la question de la meilleure stratégie à adopter pour stimuler l'innovation technologique dans le secteur de l'irrigation.

Dans la littérature, ce problème a d'abord été discuté par des sociologues, qui dérivèrent quelques postulats généraux concernant les processus de diffusion et d'adoption des nouvelles technologies (Ryan et Gross, 1943 ; Rogers, 1962). Ces travaux pionniers offrirent une base à la théorie de la diffusion d'innovations, développée à travers l'usage d'outils conceptuels dérivés de l'économie néoclassique. Le premier modèle à émerger fut le modèle de diffusion épidémiologique, véhiculant l'idée que la diffusion d'une innovation peut être assimilée à la diffusion d'une épidémie (Griliches, 1957 ; Bass, 1969 ; Easingwood et al., 1983). Ce modèle analyse les paramètres principaux de la dynamique d'adoption agrégée d'une nouvelle technologie par la population des adopteurs potentiels. La diffusion est supposée être le fruit d'un processus endogène d'apprentissage généré par les interactions sociales entre les individus ayant déjà adopté et ceux considérés comme adopteurs potentiels. Néanmoins, le modèle de diffusion épidémiologique fait face à un certain nombre de critiques du fait d'opérer seulement sur le comportement agrégé des individus, ce qui entraîne une hypothèse de comportement

[2]Société d'Aménagement des Périmètres Hydro-agricoles de l'Ile de la Réunion.

mécanique (Davies, 1979), et de par son incapacité à expliquer pourquoi certains individus adoptent plus tôt que d'autres (Horsky, 1990).

Ces limites justifient le développement du modèle des choix rationnels d'adoption qui s'intéresse aux micro-paramètres de l'adoption technologique par des individus maximisateurs de leur utilité (Domencich et McFadden, 1975 ; Caswell et Zilberman, 1986 ; Chatterjee et Eliashberg, 1990 ; Jaffe et Stavins, 1991 ; Besley et Case, 1993). Théoriquement, l'individu représentatif adoptera une nouvelle technologie s'il est *rationnel* d'agir comme cela, ie. si son utilité espérée avec adoption est supérieure à son utilité espérée sans adoption. En d'autres termes, chaque technologie procure un niveau spécifique de satisfaction qui détermine les choix individuels. Le mécanisme de ce modèle tient dans une analyse coûts-bénéfices dynamique sous incertitude qui détermine le moment propice à l'adoption (Feder, 1980 ; Just et Zilberman, 1983 ; Tsur et al. 1990 ; Koundouri et al., 2006).

Dans le cadre de la théorie évolutionniste du changement technologique initiée par Nelson et Winter (1974 ; 1982), l'analyse de la sélection des nouvelles technologies par un système social prit une direction différente. L'économie évolutionniste propose un référentiel où les processus de diffusion et d'adoption des nouvelles technologies sont indissociables de leur génèse, i.e. de leur processus de création (Dosi, 1988). Elle s'inspire de l'idée schumpéterienne selon laquelle la structure d'un système économique se modifie de l'intérieur par des processus de mutation industrielle (apparition de nou-

velles méthodes de production, de nouveaux biens, de nouvelles formes d'organisation, de nouveaux marchés, etc., et disparition des "éléments périmés").

L'économie évolutionniste cherche donc à combiner, essentiellement de façon qualitative, les approches standards afin de tenir compte simultanément des interactions sociales, de la rationalité privée et de l'évolution des technologies. Le changement technologique est supposé être le fruit d'un processus de sélection en deux étapes : un premier niveau opéré par les institutions qui déterminent les objectifs du changement technologique et les moyens à utiliser pour atteindre ces objectifs et un second niveau opéré ex post par le marché représenté par les équipementiers et les agriculteurs.

Ce chapitre propose une analyse originale des déterminants de la diffusion des technologies d'irrigation à l'île de la Réunion [3]. Nous combinons les résultats d'une enquête auprès des irrigants à une revue de la littérature. Pour cela, nous complétons les enseignements des approches empiriques standards servant à analyser la sélection des technologies d'irrigation par les agriculteurs, par des enseignements et des éléments issus de l'économie évolutionniste du changement technologique. Ce référentiel n'a jamais, à notre connaissance, été appliqué au domaine spécifique de la sélection

[3] Ce chapitre est la synthèse d'un document de travail CIRAD ("Variabilité des consommations en eau d'irrigation en culture de canne à sucre dans les périmètres du sud de La Réunion (Bras de la Plaine, Bras de Cilaos). Rôles des facteurs pédo-climatiques et des modes d'irrigation ", avec J-L. Chopart, J-L. Fusillier, L. Le Mézo, M. Mézino et C. Cornu, 2006, 36 p), d'un article publié dans la Revue d'Economie Régionale et Urbaine ("La diffusion de technologies d'irrigation économes en eau à l'île de la Réunion", 2008, vol. 1, pp. 109-130) et d'un proceeding de la 12ème conférence internationale Sustainable Innovation 07 organisée par le Center for Sustainable Design à Farnham en Angleterre ("Diffusion of Modern Irrigation Technologies in Reunion Island : An Evolutionary Approach", avec S. Farolfi et J-L. Fusillier, 2007, In : Papers of Sustainable Innovation 07, pp. 164-174).

des technologies d'irrigation par les agriculteurs. Il a cependant été récemment développé pour expliquer la sélection de technologies bénéfiques pour l'environnement par des producteurs, et l'analyse de ces résultats permettra de mettre en évidence d'autres facteurs. On conceptualise ensuite ces déterminants et la lecture du contexte institutionnel du changement de technologies d'irrigation à La Réunion grâce au référentiel évolutionniste du changement technologique permettra d'illustrer le rôle joué par le contexte institutionnel local. On discute finalement de l'applicabilité des différents modèles aux technologies d'irrigation présentes à La Réunion et on détermine les modèles adaptés.

Ce chapitre est organisé ainsi. A la section 2, nous détaillons la problématique du changement technologique dans le secteur de l'agriculture irriguée à l'île de la Réunion. La section 3 identifie les déterminants empiriques de sélection des technologies d'irrigation par les irrigants. La section 4 conceptualise ces déterminants et discute des modèles théoriques adaptés pour expliquer le mécanisme de sélection des technologies d'irrigation par les irrigants à l'île de la Réunion. La section 5 conclut brièvement.

1.2 Problématique

1.2.1 Présentation des périmètres irrigués

Les périmètres irrigués du Bras de la Plaine et du Bras de Cilaos comptent en 2000, une surface de 7560 hectares souscrite à l'irrigation par 2430 abonnés, ayant

consommé au cours de la campagne 1999/2000 un volume de 56.8 Mm^3 d'eau. Une caractéristique de ces périmètres irrigués est la grande hétérogénéité des abonnés avec une forte proportion d'entre eux dotés de très petites surfaces et n'exerçant donc vraisemblablement pas, ou plus, d'activité agricole. Ainsi, la population d'irrigants agriculteurs peut être estimée à 1400 (Chopart et al., 2006).

Les structures de production sur ces périmètres irrigués sont marquées par l'ampleur de la restructuration foncière qui a accompagné les aménagements hydrauliques. Environ 3000 hectares, soit plus de 40 % de la surface des périmètres, ont été attribués depuis les années 1970 via la SAFER [4] à des petites exploitations familiales installées sur des lots de 5 à 7 hectares. La figure (1.1) montre qu'une faible proportion est parvenue à atteindre une dizaine d'hectares en cumulant un second lot.

La culture de canne à sucre est dominante sur les périmètres irrigués, elle occupe 4500 hectares, soit près des deux tiers de la surface irriguée. Le matériel d'irrigation le plus représenté est l'aspersion, qui concerne près de trois quart des exploitations cannières. Le goutte-à-goutte concerne un quart des exploitations cannières. Parmi les exploitations équipées en aspersion, un tiers utilise encore un système en couverture totale ou mobile [5], vingt-cinq ans après le début de la diffusion de la couverture intégrale.

La zone concernée par les deux périmètres se caractérise par un double gradient

[4] Société d'Aménagement Foncier et d'Etablissement Rural.
[5] Que l'on nommera par la suite "matériel obsolète".

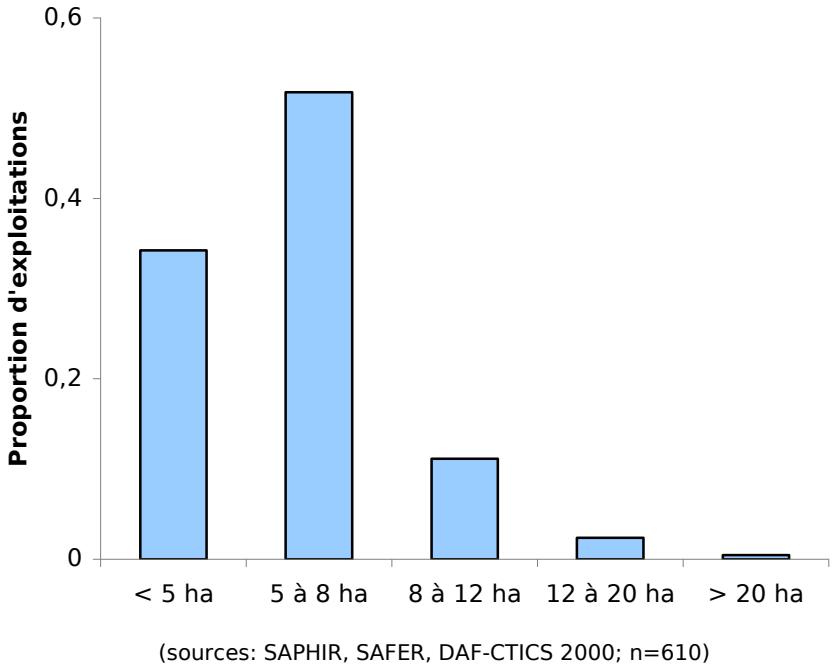


FIG. 1.1: La distribution des exploitations irriguées selon la SAU sur les périmètres du sud de La Réunion

pluviométrique, d'une part altitudinal, surtout sur le périmètre du Bras de Cilaos, et d'autre part Est-Ouest sur le périmètre du Bras de la Plaine. Le climat est caractérisé par trois éléments principaux : un gradient pluviométrique décroissant d'Est en Ouest (de 2000 mm/ha/an à 700 mm/ha/an), un gradient pluviométrique altitudinal plus marqué sur le Bras de Cilaos et un gradient altitudinal d'évapotranspiration potentielle.

La confrontation des variations spatiales du climat (pluie, ETP [6]) et du sol (RU [7]) dans les périmètres existants a permis de définir un certain nombre d'unités spatiales aux caractéristiques pédo-climatiques relativement homogènes. Une différenciation de 26 micro-zones, dont la surface varie de une à quelques centaines d'hectares, a pu être dérivée (voir Annexe A). Conformément aux surfaces respectives des périmètres irrigués, elles sont plus nombreuses dans le Bras de la Plaine (18) que dans le Bras de Cilaos (8). Suite à ce découpage, le besoin théorique en eau a pu être simulé par un modèle de bilan hydrique dans chacune des micro-zones (Chopart et al., 2006).

Les périmètres irrigués du sud de La Réunion se caractérisent donc par une hétérogénéité du milieu physique et des structures de production ainsi que par une relative homogénéité du système de culture.

1.2.2 Les enjeux du changement de technologies d'irrigation

Une analyse de la variabilité des consommations d'eau apparaît pertinente pour mettre en évidence le rôle des matériels d'irrigation sur la demande en eau, en tenant compte de la diversité des équipements entre les les exploitations.

Un première étape consiste à simplifier le zonage pédo-climatique. Un certain

[6] Evapotranspiration Potentielle. Elle est définie comme la somme de l'évaporation par la surface du sol et de la transpiration par le feuillage de la culture, lorsque le sol fournit toute l'eau demandée. C'est une valeur théorique, calculée par des formules à partir de mesures météorologiques.

[7] Réserve Utile du sol. Elle correspond à la capacité de rétention du sol, i.e. au volume d'eau que le sol est susceptible d'absorber. Elle s'exprime en mm.

nombre de micro-zones présentent des besoins théoriques en eau assez proches, ce qui nous autorise à les regrouper (voir Annexe A). Deux micro-zones présentent un contexte particulier et ne peuvent être agrégées au reste du périmètre : la zone hydromorphe du Gol dont les exploitations peuvent réduire leur consommation d'eau grâce à un effet de remontée de nappe et la zone humide de Petite Ile où les précipitations sont suffisamment abondantes pour permettre une irrigation d'appoint. Ces zones paraissent les moins concernées par la question des économies d'eau, vu leur niveau déjà faible de consommation.

A ces deux exceptions près, on peut ramener la diversité des périmètres irrigués à deux grandes zones aux besoins en eau relativement homogènes :

- la partie haute du Bras de Cilaos et la partie Est du Bras de la Plaine qui présentent un besoin moyen en eau de 8900 m^3/ha/an avec un écart type des besoins par micro-zone inférieur à 1000 m^3/ha/an ;
- la zone littorale, plus sèche, allant de Saint-Pierre à La Pointe au Sel où le besoin moyen est estimé à 11000 m^3/ha/an avec un faible écart-type des micro-zones (350 m^3/ha/an).

Dans la zone haute et orientale des périmètres, plus humide, parmi les quatre facteurs étudiés (matériel d'irrigation, conseil à l'irrigation, surface cultivée, intensification de la canne), seul le matériel d'irrigation présente une relation statistique significative avec la consommation d'eau d'après le test d'indépendance du Chi-deux (Chopart et al., 2006). Le tableau (1.1) montre que l'aspersion en couverture inté-

grale, qui domine largement sur cette zone, est associée à la consommation d'eau la plus élevée. Les exploitants avec du goutte-à-goutte ont en moyenne une consommation nettement inférieure. Le cas de la couverture totale doit être interprété avec prudence. La consommation moyenne très basse est paradoxale pour un matériel doté d'une faible efficience intrinsèque. Elle est loin de satisfaire le besoin théorique mais l'écart-type élevé suggère une grande hétérogénéité des comportements. La moyenne est vraisemblablement tirée à la baisse par certains irrigants qui ne valorisent pas leur moyen d'irrigation et ne semblent pas suivre une logique de productivité agricole.

Tab. 1.1: Consommation en eau unitaire selon le matériel d'irrigation par grande zone pédo-climatique à La Réunion

	Obsolète	Mixte Obs-Int.	Intégrale	Mixte Asp-GàG	GàG
Zone plus humide					
Conso moyenne[a]	6900	8781	9514	9421	8236
Ecart-type conso.	4647	3953	2826	2096	2718
Zone plus sèche					
Conso moyenne[a]	10425	12082	11025	9250	8718
Ecart-type conso.	4976	3277	4226	3624	2844

[a] en m^3/ha/an.
Source : Chopart et al., 2006 ; n=515.

Dans la zone littorale, plus sèche, une relation statistique significative entre la consommation d'eau et l'équipement d'irrigation a aussi été trouvée (Chopart et al., 2006). La plus basse consommation est associée, là aussi, à l'équipement en goutte-à-

goutte, avec un écart de plus de 2000 m^3/ha/an par rapport à l'aspersion en couverture intégrale.

1.2.3 L'enquête auprès des irrigants

Afin de mieux comprendre les freins et motivations des irrigants spécialisés dans la culture de canne à sucre à l'adoption des nouvelles technologies d'irrigation économes en eau, une enquête a été mise en place fin 2006 sur les périmètres du Bras de la Plaine et du Bras de Cilaos (voir Annexe A).

La base de sondage utilisée, un échantillon exhaustif construit par le CIRAD [8], comprenait 610 irrigants ayant un statut d'exploitant agricole, occupant une surface de 3868 hectares et structurés en 740 "exploitations" définies au sens de l'unité de production localisée sur une maille hydraulique. Notre base de sondage concerne donc 44 % des irrigants agriculteurs et 51 % de la surface irriguée totale des périmètres. La représentativité de l'échantillon est confortée par sa dispersion géographique, nécessaire pour prendre en compte les milieux physiques.

La taille souhaitable pour notre échantillon a été fixée à une centaine d'exploitations. La méthode d'échantillonnage utilisée est la méthode des strates. L'étalement de l'aménagement des périmètres irrigués sur une période d'une vingtaine d'années explique en partie la coexistence de différents équipements. Une première stratification

[8] Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement.

a donc consisté à tenir compte du périmètre irrigué auquel appartiennent les exploitations. Ainsi, la proportion d'irrigants installés sur le Bras de la Plaine (73 %) et sur le Bras de Cilaos (27 %) est identique dans la base de sondage et dans notre échantillon. On a aussi cherché, au sein de chaque strate, à conserver une bonne dispersion géographique en terme de micro-zone pédo-climatique. Une deuxième stratification a consisté à tenir compte de l'écart au besoin en eau théorique, en cherchant à enquêter en priorité, mais pas seulement, les irrigants supposés être sur-consommateurs d'eau.

Des entretiens semi-directifs d'une heure environ, réalisés chez l'agriculteur ou sur son exploitation, ont été effectués. L'entretien type se déroulait en deux temps : on cherchait d'abord à retracer avec précision l'évolution du matériel d'irrigation au sein de l'exploitation, depuis l'installation de l'agriculteur [9] jusqu'en 2006, puis on cherchait à renseigner un ensemble de caractéristiques individuelles susceptibles d'expliquer les choix des irrigants en matière de techniques et de pratiques d'irrigation. L'accès aux coordonnées téléphoniques des irrigants, leur disponibilité en période de coupe de la canne à sucre [10] ainsi que le temps de transport nécessaire à chaque entretien furent les contraintes majeures de cette enquête, cela a probablement conditionné notre échantillon.

On a ainsi réalisé un sondage empirique et obtenu une échantillon représentatif de 111 exploitations cannières, dont 81 qui appartiennent au périmètre du Bras de la

[9] Qui a souvent eu lieu dans les années 1970 ou 1980.
[10] La coupe de la canne à sucre se déroule tous les ans de juillet à décembre.

Plaine et se répartissent dans 16 micro-zones ainsi que 30 qui appartiennent au Bras de Cilaos et se répartissent dans 6 micro-zones. La représentativité de notre échantillon est confortée par la distribution des écarts au besoin en eau théorique, qui présente la même allure en cloche que celle de la base de sondage (voir Annexe A).

L'échantillon permet de décrire à la figure (1.2) l'évolution des technologies d'irrigation sur les périmètres irrigués du sud de La Réunion de 1975 à 2005. Cela confirme d'abord que les deux types de matériel effectivement présents au sein des exploitations sont l'aspersion et le goutte-à-goutte. La dominance de l'aspersion est confirmée. En 1975, l'aspersion (en couverture mobile puis totale) était le seul matériel présent sur les périmètres ; en 1990, l'aspersion concerne 95 % d'agriculteurs et en 2005, cette technologie concerne toujours près de 90 % des agriculteurs. Les autres agriculteurs utilisent un système d'irrigation localisée au goutte-à-goutte, une infime partie (non représentée sur la figure) utilisant des canons enrouleurs (moins de 1 % de la population totale d'agriculteurs).

L'adoption des technologies d'irrigation améliorées (i.e. la couverture intégrale pour l'aspersion ou le goutte-à-goutte) a connu un démarrage assez lent, débuté à la fin des années 1980. En 1995, 10 % des exploitations étaient équipées d'aspersion en couverture intégrale, 7 % étaient équipées de goutte-à-goutte et 3 % étaient en mixte intégrale-goutte-à-goutte. Le reste des exploitations étaient équipés de matériel obsolète (aspersion en couverture mobile ou totale). L'adoption de la couverture intégrale a

ensuite suivi une accélération progressive jusqu'à aujourd'hui alors que dans le même temps, le goutte-à-goutte accusait un abandon progressif débuté à la fin des années 1990.

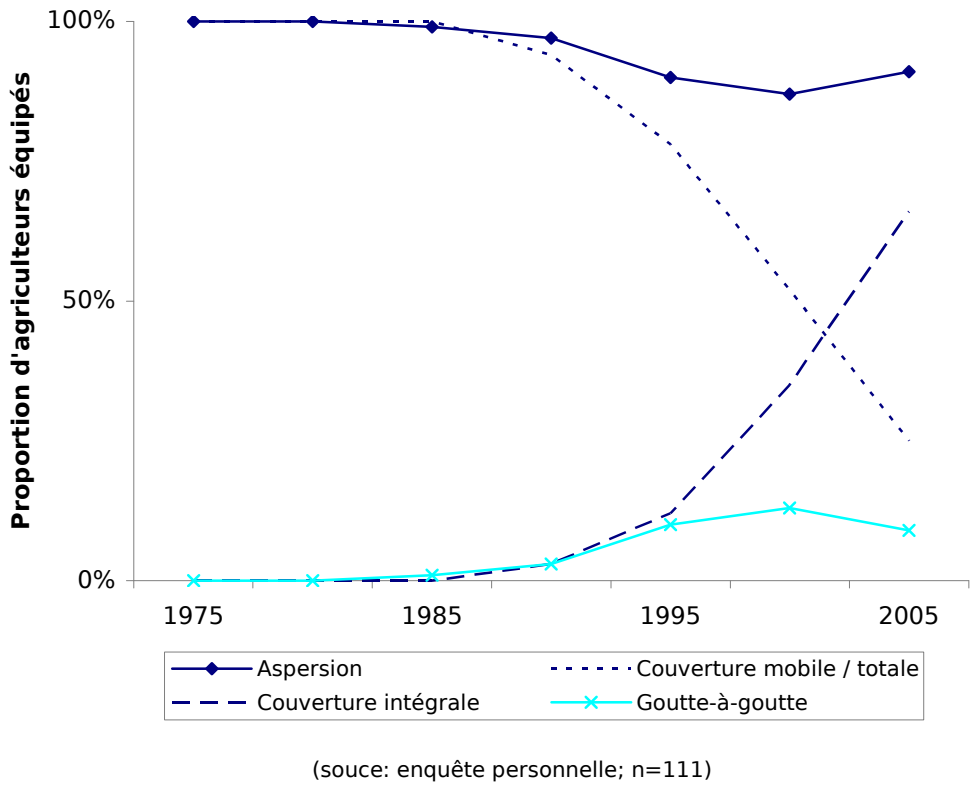


FIG. 1.2: La trajectoire des technologies d'irrigation sur les périmètres irrigués du sud de La Réunion, 1970-2006

D'après le tableau (1.2), on constate qu'en 2006, une proportion importante d'exploitations est équipée d'outils de pilotage automatique (41 % sont totalement équipés en vannes volumétriques ou programmables, et 10 % sont partiellement équipés en vannes automatiques) permettant une gestion plus fine des doses d'eau. La technologie d'irrigation dominante sur les périmètres est donc l'aspersion en couverture

intégrale combinée à des vannes automatiques, elle concerne 29 % des exploitations. L'aspersion en couverture intégrale combinée à des vannes manuelles est aussi très répandue puisqu'elle concerne 23 % des exploitations. Notons enfin que la quasi-totalité des exploitations équipées avec de l'aspersion en couverture mobile ou totale (matériel obsolète) complètent leur système d'irrigation par des vannes manuelles, alors que la totalité des exploitations équipées partiellement ou en totalité avec du goutte-à-goutte utilisent des vannes automatiques.

TAB. 1.2: Technologies d'irrigation présentes sur les périmètres irrigués du sud de La Réunion en 2006

Type de matériel	*Type de vannes*			
	Manuelles	Mixte Man-Auto.	Automatiques	Total
Obsolète	16 %	2 %	0 %	17 %
Mixte Obs-Int.	10 %	3 %	0 %	12 %
Intégrale	23 %	5 %	29 %	57 %
Mixte GàG-Asp	0 %	1 %	6 %	7 %
GàG	0 %	0 %	6 %	6 %
Total	49 %	10 %	41 %	

Source : enquête personnelle ; n=111.

1.3 Les facteurs empiriques de sélection des technologies d'irrigation

Nous confrontons à présent les résultats de notre enquête auprès des irrigants des périmètres du sud de La Réunion à une revue de la littérature empirique. On identifie ainsi les déterminants de la sélection des technologies d'irrigation améliorées par les exploitations agricoles de l'île de la Réunion. Ces facteurs explicatifs sont répartis en trois axes : les caractéristiques des irrigants, les caractéristiques du contexte d'adoption des irrigants et les caractéristiques des technologies d'irrigation économes en eau.

1.3.1 Les caractéristiques des irrigants et de leurs exploitations

Le premier axe des facteurs explicatifs de la sélection des technologies d'irrigation économes en eau par les agriculteurs concerne les caractéristiques des irrigants et de leurs exploitations. Six facteurs clés sont identifiés : la taille et le contexte pédo-climatique des exploitations ainsi que les objectifs, l'aversion au risque, les connaissances et les contraintes des irrigants.

La taille des exploitations est un des premiers critères mis en évidence par la littérature pour expliquer les décisions individuelles d'adoption technologique (Just et Zilberman, 1983 ; Feder et al., 1985 ; Jaffe et Stavins, 1991 ; Kemp, 1997 ; Tzouvelekas et al. 1999). Ce paramètre peut cependant avoir différents effets sur le taux d'adoption.

Ces effets dépendent notamment des caractéristiques des technologies et du contexte institutionnel. Plus précisément, le lien entre la taille des firmes et le taux d'adoption dépend des coûts fixes d'adoption, des préférences face au risque, des connaissances, des contraintes budgétaires, des besoins en temps de travail, etc.

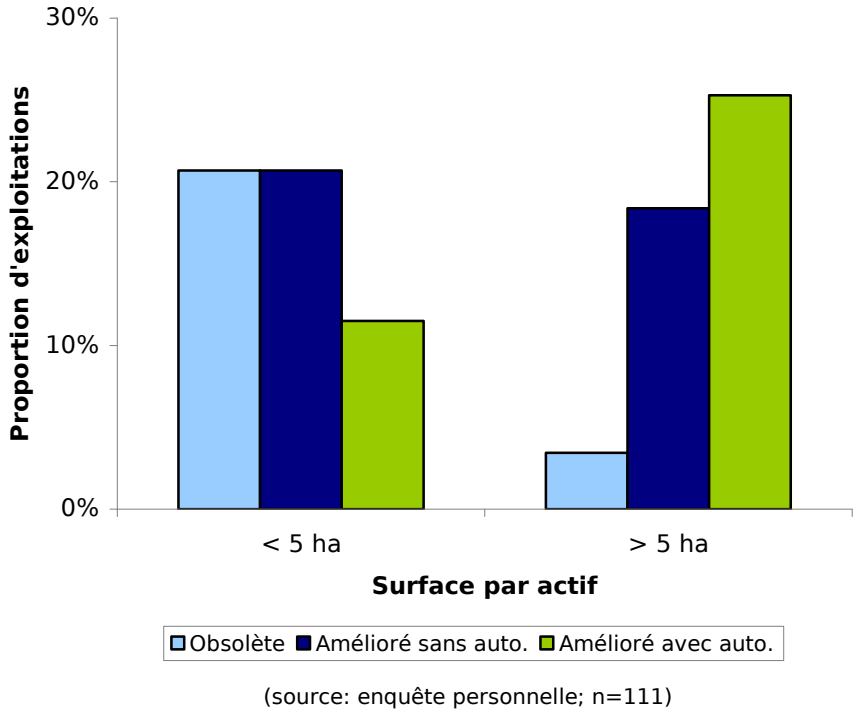


FIG. 1.3: L'adoption des technologies d'irrigation selon la surface par actif à l'île de la Réunion

L'effet de la taille des firmes sur le taux d'adoption semble donc ambigu et devrait dépendre d'autres facteurs, par exemple le nombre d'actifs total au sein de l'exploitation, définissant ainsi un indicateur pour les économies de main d'œuvre réalisables grâce à l'adoption d'une nouvelle technologie. La figure (1.3) montre qu'à La Réunion,

plus le rapport surface par actif augmente, plus les irrigants adoptent une technologie d'irrigation améliorée (intégrale ou goutte-à-goutte) avec outils de pilotage automatique [11].

Parmi les facteurs susceptibles d'influencer les choix des agriculteurs en matière de technologie d'irrigation, **les objectifs** des irrigants jouent un rôle essentiel. En effet, malgré le fait que la recherche du meilleur profit soit souvent un objectif essentiel car cela conditionne la survie de l'exploitation, des études montrent que d'autres objectifs peuvent guider les choix des irrigants (Sumpsi et al., 1996). En parallèle à la maximisation du profit, ils peuvent chercher à minimiser leur temps de travail ou minimiser le risque climatique. Ils peuvent aussi être guidés par des objectifs tels que la sauvegarde d'un patrimoine familial ou la sécurisation foncière de leurs terres. Ceci se répercutera directement sur leurs règles de décision économique et leurs choix technologiques. A La Réunion, l'âge des irrigants et surtout la présence de revenus extérieurs à l'agriculture dans une exploitation familiale ainsi que le rapport entre la surface mise en culture et la surface totale utilisable semblent définir correctement les préférences des irrigants (Fusillier et Saqué, 2001).

L'aversion au risque des irrigants peut aussi conditionner leurs décisions économiques et leurs choix technologiques (Just, 1973 ; Jensen, 1982 ; Just et Zilberman,

[11] Cette observation est conforme à la théorie économique standard qui dit que les entrepreneurs cherchent à maximiser la productivité du facteur le plus limitant. Lorsqu'il s'agit de la main d'œuvre, la technique qui économise le plus de travail pour gagner en productivité sera préférée.

1983 ; Yaron et al., 1992 ; Koundouri et al., 2006). En théorie, on suppose qu'un irrigant rationnel cherche à maximiser sa fonction d'utilité en allouant les ressources dont il dispose, notamment l'eau, de façon optimale. Généralement, la richesse des irrigants est le facteur principal qui détermine leur degré d'aversion au risque, les mieux dotés en capital étant les plus aptes à prendre des risques (Boussard, 1987). A La Réunion, l'aversion au risque des irrigants peut aussi s'appréhender par les décisions d'assolement prises dans le passé. En effet, le marché de la canne à sucre (auquel participent quasiment tous les irrigants) est un marché administré, i.e. les planteurs sont assurés de vendre toute leur production de canne aux usines sucrières. Par contre, le marché des fruits et légumes est beaucoup plus risqué dans la mesure où les irrigants peuvent rencontrer des problèmes pour écouler leur production sur le marché local. Le rapport entre la surface en canne et la surface en maraîchage au sein des exploitations est donc un indicateur du degré d'aversion au risque des irrigants (Fusillier et Saqué, 2001 ; Ferraris, 2002).

D'autre part, **les connaissances** (le capital humain) des irrigants jouent un rôle important pour expliquer leur comportement économique et leurs décisions d'investissements (Feder et al., 1985 ; Kemp, 1997 ; Saviotti, 2001). Différentes sortes de connaissances sont organisées dans les exploitations agricoles : des connaissances d'ingénierie hydraulique pour l'installation des systèmes d'irrigation, des connaissances à propos des propriétés des matériels d'irrigation utilisés pour produire, comment utiliser ces matériels, etc. Ces connaissances techniques dépendent du niveau initial de

formation des agriculteurs et sont constamment améliorées par des contacts avec les offreurs de matériel, le contact avec d'autres irrigants dans les réseaux associatifs ou syndicaux, le conseil de techniciens de la Chambre d'Agriculture et les stages d'irrigation effectués. L'attente d'une meilleure information sur les technologies et sur les compétences à mobiliser pour les utiliser de façon efficace peut ainsi influencer les choix technologiques individuels dans la mesure où l'adoption d'un nouveau système d'irrigation s'avère être un investissement qui engage sur au moins une dizaine d'années.

De plus, **les contraintes** auxquelles doivent faire face les irrigants, notamment leur contrainte budgétaire, sont déterminantes. Les annuités liées au remboursement du foncier, ou le montant du loyer annuel dans le cas d'une exploitation en fermage, ainsi que les annuités liées aux investissements réalisés (tracteur, matériel d'irrigation, etc.) peuvent contraindre fortement les choix technologiques des irrigants dans la mesure où cela détermine leur accès au crédit pour de nouveaux investissements (Fusillier et Saqué, 2001). L'acquisition de nouvelles technologies d'irrigation est un investissement lourd qui nécessite des capacités importantes de financement de la part des irrigants. A La Réunion, la plupart des irrigants sont des planteurs de canne à sucre installés sur des parcelles d'une superficie moyenne de cinq hectares. Ces agriculteurs ont souvent un crédit foncier en cours de remboursement ou un loyer à payer (dans le cas d'un fermage) qui limite leur capacité d'investissement. Certains agriculteurs contractent aussi jusqu'à dix ans de crédit pour financer leur matériel d'irrigation.

Chez ces irrigants, le changement de technologie d'irrigation apparaît alors lorsque le crédit sur leur technologie actuelle s'achève.

Enfin, **le contexte pédo-climatique des exploitations**, qui influence le besoin en eau d'irrigation et les rendements potentiels des cultures, est un facteur essentiel pour expliquer les décisions individuelles d'adoption d'une nouvelle technologie d'irrigation. En effet, la profitabilité relative de chaque matériel dépend des économies potentiellement réalisables sur la facture d'eau. C'est pourquoi la diffusion de nouvelles technologies d'irrigation devrait être plus rapide dans les zones sèches des périmètres irrigués.

Quelques études ont montré que la profitabilité relative des technologies d'irrigation dépend de la qualité du sol[12] (Caswell et Zilberman, 1986 ; Caswell et al., 1990 ; Khanna et Zilberman, 1997). D'autres études ont montré que le choix de matériel d'irrigation est directement corrélé au choix d'assolement des agriculteurs (Schoengold et al., 2005). En théorie, il existerait un seuil de qualité du sol au-delà duquel la profitabilité relative des nouvelles technologies d'irrigation devient inférieure à celle des anciens matériels (Caswell et Zilberman, 1986 ; Khanna et Zilberman, 1997). A La Réunion, le contexte pédo-climatique des exploitations semble bien synthétisé par le besoin théorique en eau, calculé par un modèle de bilan hydrique à l'échelle de micro-zones aux conditions physiques homogènes (Chopart et al., 2006).

[12]Deux effets sont envisageables. Un premier lié à la réserve utile qui déterminerait le besoin en eau et un second lié à la fertilité qui déterminerait le potentiel de rendement.

1.3.2 Les caractéristiques du contexte d'adoption des irrigants

Le second axe des facteurs clés de la diffusion de technologies d'irrigation économes en eau concerne les caractéristiques du contexte institutionnel et économique qui s'impose à tous les irrigants. Cinq facteurs clés sont identifiés : le prix de l'eau d'irrigation, les subventions à l'équipement, le prix de la canne à sucre, le transfert d'information et la confiance des irrigants envers leurs institutions.

En premier lieu le contexte économique, notamment **le prix de l'eau d'irrigation**, semble être un facteur déterminant pour expliquer les décisions économiques et les choix individuels d'adoption technologique (Caswell et Zilberman, 1985 ; Caswell et al., 1990 ; Khanna et Zilberman, 1997 ; Khanna et al., 2002) ainsi que le taux d'adoption agrégée des nouvelles technologies d'irrigation plus économes en eau (Fishelson et Rymon, 1989 ; Dinar et Yaron, 1992). Cependant, la faible évolution du prix de l'eau d'irrigation à La Réunion nous conduit à supposer que ce facteur ne présente qu'un impact limité sur le taux d'adoption technologique [13]. Après avoir suivi une augmentation moyenne de 6,5 % par an durant les années 90, le prix moyen [14] (calcul pour 5000 m^3/ha/semestre) n'a ensuite quasiment pas évolué de 1999 à aujourd'hui. Comme le montre la figure (1.4), il a même baissé si on considère la remise de 15 %

[13] Notons que le prix de l'eau est fixe mais le volume d'irrigation futur, donc le coût, est aléatoire et incertain.

[14] En 2006 sur les périmètres du sud, la structure tarifaire est en fait proportionnelle au volume consommé et progressive avec un palier : en dessous de 6000 m^3/ha/semestre, l'eau coûte 0,0625 €/m^3 et 0,0915 au delà. Cependant, la très faible proportion d'agriculteurs concernés par la tranche haute du prix nous conduit ici à considérer seulement la tranche basse du prix.

sur la facture d'eau mise en place de 1999 à 2003 pour aider le secteur de la canne à sucre irriguée.

De plus, une forte augmentation du prix de l'eau paraît contraire à l'objectif d'économiser l'eau tout en assurant la pérennité des exploitations. En effet, des études ont montré que la demande en eau individuelle est inélastique jusqu'à un certain seuil de tarification alors que le revenu des agriculteurs décroît de façon quasi-linéaire à mesure que le prix de l'eau augmente (Dumanois, 2003 ; Fusillier, 2006).

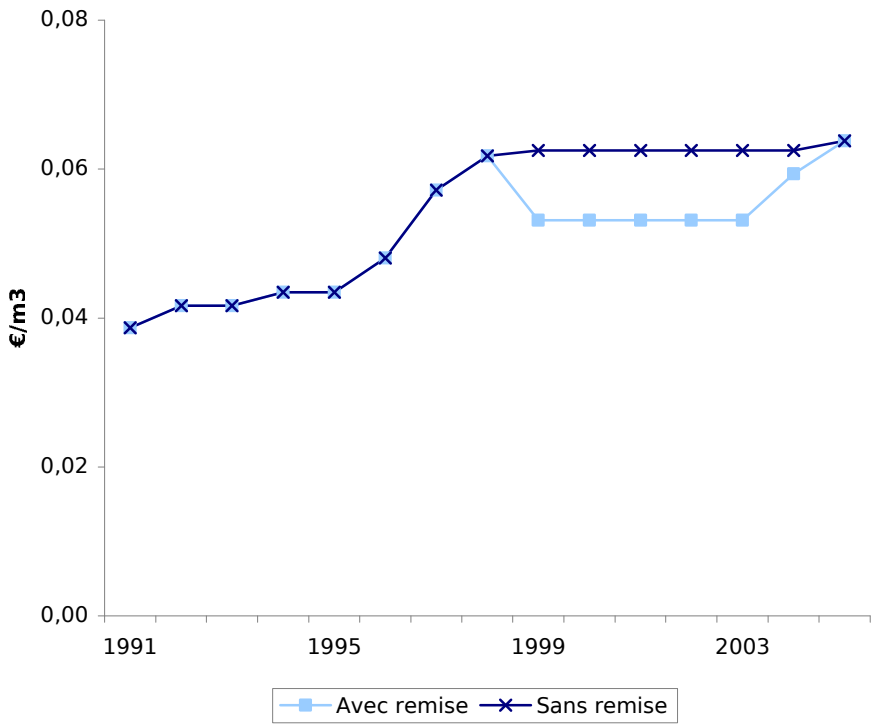


FIG. 1.4: L'évolution du prix courant de l'eau d'irrigation à La Réunion, 1990-2006 (périmètres SAPHIR)

Le contexte économique se caractérise aussi par **le régime d'aide à l'investisse-**

ment des différentes technologies d'irrigation, qui joue un rôle majeur sur la volonté des irrigants à s'équiper (Dinar et Yaron, 1992). En 2006 à La Réunion, un système d'irrigation par aspersion en couverture intégrale "clé en main" coûtait en moyenne 3900 €/ha et un système d'irrigation localisée au goutte-à-goutte 6500 €/ha. Ces coûts d'investissement peuvent varier de 5 à 10 % par an en fonction des variations de prix de certains accessoires qui composent chaque système d'irrigation.

Dans les années 1990, l'aspersion en couverture intégrale était subventionnée à 40 % et le goutte-à-goutte à 60 %. De 2000 à 2006, l'aspersion en couverture intégrale a été subventionnée à 60 % et le goutte-à-goutte à 75 % dans le cadre d'une opération d'élimination du matériel obsolète (couverture mobile et totale) conduite par le Conseil Général. La figure (1.5) montre que, grâce à cette hausse des taux de subvention, le coût initial d'investissement à la charge de l'agriculteur était quasiment le même pour chaque nouvelle technologie d'irrigation et s'élèvait à 1500 €/ha.

Cependant, le coût de l'aspersion en couverture intégrale varie fortement si l'irrigant construit seul son système. S'il monte lui-même ses canons, dimensionne son réseau et pose les tuyaux sur ses parcelles (il élimine ainsi le coût de conception et la part du coût d'investissement liée à la pose de l'équipement), un système d'aspersion en couverture intégrale peut coûter moins de 1000 €/ha sans subvention. Par contre, un système en goutte-à-goutte est beaucoup plus compliqué à construire seul à cause de la préparation du terrain nécessaire pour poser les tuyaux, des automa-

tismes à mettre en place ainsi que de la station de filtration à installer avec le matériel lui-même. Concernant le coût du goutte-à-goutte, il faut aussi considérer le réinvestissement nécessaire lors d'une replantation des souches de canne (à peu près tous les 7 ans). Ceci provoque un différentiel important de coût de fonctionnement entre chaque matériel et pourrait expliquer en partie son faible taux d'adoption sur les périmètres irrigués du sud de La Réunion.

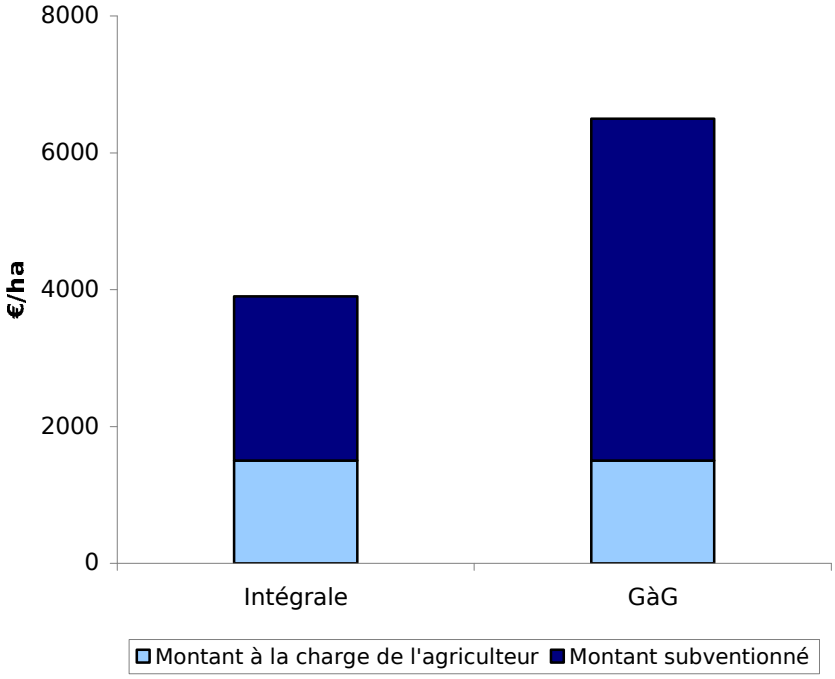


FIG. 1.5: Le coût subventionné et non subventionné des technologies d'irrigation améliorées à l'île de la Réunion, 2000-2006

D'autre part, la nature du marché auquel participent les irrigants joue probablement un rôle sur leur volonté d'innover en matière d'irrigation. A La Réunion, **le prix de la canne** et les incertitudes liées au marché du sucre peuvent avoir deux impacts

majeurs. Le premier concerne les choix d'assolement. Les irrigants peuvent ainsi être tentés de modifier leur assolement pour tenter d'augmenter leurs marges, le marché des fruits et légumes étant plus lucratif (mais aussi plus risqué) que celui de la canne à sucre. Le second impact lié à l'évolution du prix de la canne à sucre concerne les choix technologiques. Certains irrigants peuvent ainsi différer leurs investissements en matière de technologie d'irrigation et attendre de connaître l'évolution des perspectives du marché du sucre. D'autres agriculteurs, rassurés par le marché administré, et donc sécurisé, de la canne à sucre, peuvent au contraire s'équiper plus facilement. Le prix de la tonne de canne payée aux planteurs n'a pas évolué depuis 2001 et ne devrait pas changer avant 2010. Il dépend principalement de la richesse en sucre des cannes (39,09 €/tonne pour une richesse de 13,8 %), de la production totale de l'agriculteur (21,40 €/tonne pour les 700 premières tonnes) et du volume total produit dans l'île (1,30 €/tonne si la production dépasse 1500000 tonnes).

De plus, le contexte social, notamment **le transfert d'information**, influence le taux d'adoption des technologies d'irrigation économes en eau (Dinar et Yaron, 1992). Lorsque le nombre d'irrigants ayant déjà adopté est faible, la décision d'adoption constitue une action innovante. Dans ce cas, l'accès à l'information est généralement formel. Lorsque le nombre d'irrigants est déjà élevé, le transfert d'information est surtout dû au bouche à oreille répandu par les irrigants ayant déjà adopté (les innovateurs). En particulier, l'influence de certains irrigants peut s'avérer déterminante et inciter d'autres irrigants à se comporter comme eux. De plus, il semble que plus

l'accès à l'information est formel (BEPA, conseils de la Chambre d'Agriculture), plus les irrigants adoptent vite (Yaron et al., 1992). A contrario, plus l'accès à l'information est empirique (bouche à oreille, espionnage), plus la diffusion est lente. Enfin, le processus d'imitation inhérent à la diffusion de chaque innovation peut être plus ou moins marqué selon les caractéristiques de la nouvelle technologie.

Enfin, le contexte institutionnel, notamment **la confiance des irrigants envers leurs institutions**, peut modifier les choix technologiques individuels (Loehman et Dinar, 1994 ; Marshall, 2004). Il semble logique de considérer que la diffusion de nouvelles technologies d'irrigation, censée permettre d'améliorer l'efficience de l'eau, n'est pas seulement bénéfique pour les agriculteurs mais pour tous les acteurs de l'eau, voire pour la société dans son intégralité. La disposition des irrigants à s'équiper en technologies d'irrigation économes en eau s'apparente donc à leur volonté de coopérer avec les institutions qui les entourent. Le degré de coopération des agriculteurs peut dépendre notamment des taux de subvention de chaque matériel et de la confiance des irrigants envers les structures qui les suivent et les conseillent.

A La Réunion, cette confiance pourrait s'illustrer par les choix de financement des agriculteurs pour s'équiper d'une nouvelle technologie d'irrigation (recours ou non à la subvention) ainsi que par les choix de fournisseurs et d'installateurs de matériel d'irrigation pris par les irrigants. La confiance des irrigants est un facteur complexe, évolutif et difficilement mesurable. Il semble être lié aux caractéristiques du marché

des technologies d'irrigation et aux activités de conseil et de prescription de nouvelles technologies exercées par les institutions auprès des irrigants (Chambre d'Agriculture, SAPHIR, CIRAD).

1.3.3 Les caractéristiques des technologies d'irrigation

Le troisième axe des facteurs clés de la diffusion de technologies d'irrigation économes en eau concerne les caractéristiques de ces technologies. Trois facteurs clés sont identifiés : l'adaptabilité, la complexité et l'évolution du rapport qualité-prix des nouvelles technologies d'irrigation plus économes en eau.

L'adaptabilité des technologies d'irrigation économes en eau au contexte local, notamment aux besoins des irrigants, ainsi que **leur complexité**, peut modifier les décisions technologiques individuelles (Feder et al., 1985). En effet, certains types de matériel d'irrigation semblent mieux adaptés que d'autres à certains types de cultures, à certains types de sols, ainsi qu'au savoir-faire des agriculteurs. Ceci s'observe à La Réunion, où l'irrigation par aspersion, qui bénéficie d'une expérience accumulée de trente ans, semble mieux maîtrisée que le goutte-à-goutte pour cultiver la canne à sucre.

Les avantages et inconvénients de l'irrigation de la canne à sucre par aspersion sont listés dans le tableau (1.3). Notons tout d'abord que cette technologie nécéssite un niveau de technicité assez faible, ce qui pourrait expliquer sa large diffusion sur

les périmètres de La Réunion. D'autre part, son efficience est peu élevée, de l'ordre de 75 %, du fait d'une grande sensibilité au vent. Notons finalement que le travail associé à un système d'irrigation par aspersion est contraignant, notamment pour les systèmes en couverture mobile ou totale, où l'agriculteur doit déplacer lui-même son matériel afin d'irriguer l'ensemble de sa surface cultivée.

TAB. 1.3: Avantages et inconvénients de l'irrigation de la canne à sucre par aspersion

Avantages	*Inconvénients*
• Grande adaptabilité aux conditions de terrain • Faible technicité requise • Besoin en entretien restreint • Améliorations du système envisageables (couverture intégrale, automatismes)	• Efficience de 75 % (grande sensibilité au vent) • Travail contraignant • Optimisation du système difficile à atteindre (sensible aux conditions de débit et de pression)

Source : Caro Canne N°4 (2004).

Les avantages et inconvénients de l'irrigation de la canne à sucre par l'irrigation localisée au goutte-à-goutte sont listés dans le tableau (1.4). Notons tout d'abord que cette technologie nécessite un fort investissement initial de la part des agriculteurs, ce qui pourrait expliquer sa faible diffusion sur les périmètres irrigués de La Réunion. De plus, l'investissement nécessaire à chaque replantation des souches de canne à sucre, non éligible à une nouvelle subvention, pourrait expliquer son apparent abandon sur les périmètres irrigués de La Réunion. D'autre part, son impact sur la consommation

d'eau à La Réunion est ambigu car ce matériel permet de s'affranchir du vent mais valorise mal les fortes pluies qui touchent une grande partie des périmètres irrigués en saison humide. Ce matériel permet cependant un contrôle précis de la dose d'eau à apporter et peut améliorer l'efficience d'application des engrais, éléments essentiels de la productivité de l'exploitation.

TAB. 1.4: Avantages et inconvénients de l'irrigation de la canne à sucre localisée au goutte-à-goutte

Avantages	*Inconvénients*
• Efficience de 90 % (insensible au vent) • Contrôle précis de la dose d'eau à appliquer • Mécanisation totale envisageable • Apport fractionné des engrais envisageable	• Préparation du terrain • Travail technique et régulier • Risque de bouchage racinaire du réseau • Entretien de la station de filtration • Investissement nécessaire à chaque replantation • Valorisation limitée des fortes pluies

Source : Caro Canne N°4 (2004).

D'autre part, **l'évolution du rapport qualité-prix** des technologies d'irrigation économes en eau semble un paramètre important au moment du choix d'équipement des irrigants (Rieul, 1997). Ce rapport dépend notamment de l'évolution des pratiques des irrigants. En cas de changement technologique, il peut exister un coût d'apprentissage important pour atteindre un bon rapport qualité-prix avec une nou-

velle technologie complexe.

La figure (1.6) montre que chaque technologie nécessite un savoir-faire particulier. Dans le cas des technologies d'irrigation économes en eau, la transition de l'aspersion en couverture mobile ou totale vers l'aspersion en couverture intégrale peut s'accompagner d'un changement de pratiques (tours d'eau et doses d'eau) beaucoup moins radical que la transition de l'aspersion vers le goutte-à-goutte. Concernant l'aspersion, une forte évolution des pratiques, toutefois mois radicale que celle concernant le passage au goutte-à-goutte, apparaît cependant lorsque l'irrigant s'équipe aussi en vannes volumétriques ou programmables.

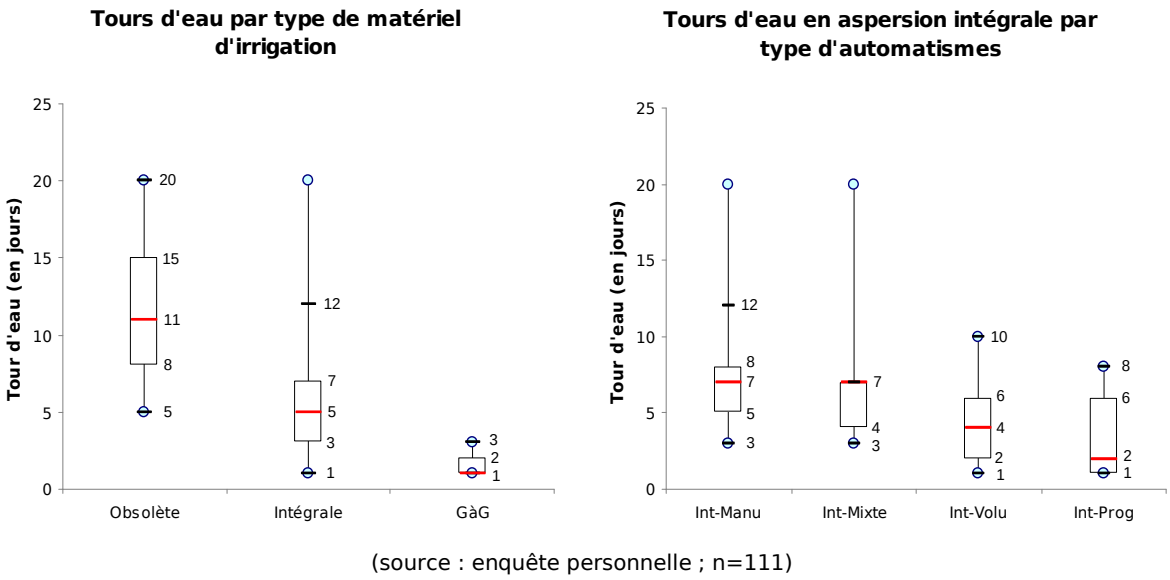


FIG. 1.6: Les tours d'eau pratiqués selon le type de technologie d'irrigation sur les périmètres irrigués du sud de La Réunion

Finalement, l'évolution du rapport qualité-prix des nouvelles technologies d'irriga-

tion plus économes en eau pourrait dépendre des croyances des irrigants en matière de pratiques [15]. Ainsi, un agriculteur qui passe de l'aspersion en couverture totale vers de l'aspersion en couverture intégrale peut conserver les mêmes pratiques (tours d'eau et doses longues), croyant qu'elles sont optimales. Cela peut influer de façon négative sur le rapport qualité-prix des nouvelles technologies. Dans ce cas, le changement technologique répond en fait surtout à un objectif de minimisation du temps de travail.

1.4 Les approches théoriques du changement de technologies d'irrigation

Dans cette section, nous conceptualisons les facteurs clés de la diffusion de technologies d'irrigation économes en eau à la Réunion précédemment identifiés. Deux référentiels théoriques sont mobilisés : l'approche "standard" et l'approche évolutionniste. La première partie de cette section présente les deux types de modèles représentatifs de l'approche standard : le modèle de diffusion épidémiologique et le modèle des choix rationnels d'adoption. La deuxième partie présente quelques éléments issus du référentiel de l'économie évolutionniste et utiles pour compléter l'approche standard. La quatrième et dernière partie de cette section identifie les approches et modèles adaptés à la diffusion des différentes technologies d'irrigation présentes à La Réunion.

[15] On a rencontré plusieurs agriculteurs au cours de l'enquête affirmant que "les feuilles ont besoin d'eau".

1.4.1 Les modèles de sélection des technologies d'irrigation par les agriculteurs

Nous présentons d'abord le modèle de diffusion épidémiologique, qui permet d'analyser la sélection des technologies d'irrigation par une population d'agriculteurs d'un point de vue dynamique et à un niveau agrégé, puis le modèle des choix rationnels d'adoption, qui permet d'analyser la sélection des technologies par un agriculteur représentatif, généralement d'un point de vue statique, à l'échelle d'une parcelle ou d'une exploitation.

1.4.1.1 La sélection par une population d'agriculteurs

Le modèle de diffusion épidémiologique fut, à l'origine, développé pour étudier la dissémination des maladies et des épidémies au sein de la population. En économie, ce modèle permet d'évaluer la dynamique de la probabilité d'adoption agrégée d'une innovation par l'ensemble de ses usagers potentiels. Ce modèle fait l'hypothèse qu'un processus endogène d'apprentissage, au sein de la population des adopteurs potentiels, génère un sentier de diffusion technologique en S. A chaque instant considéré, le taux d'adoption agrégée dépend du taux d'adoption passé et les adopteurs précoces, peu nombreux, sont communément appelés les innovateurs. Ce modèle capte en fait principalement les comportements de mimétisme des adopteurs potentiels, par des effets de bouche à oreille et d'entraînement collectif, et permet d'expliquer en partie le rôle des interactions sociales sur la structure de diffusion d'une nouvelle technologie .

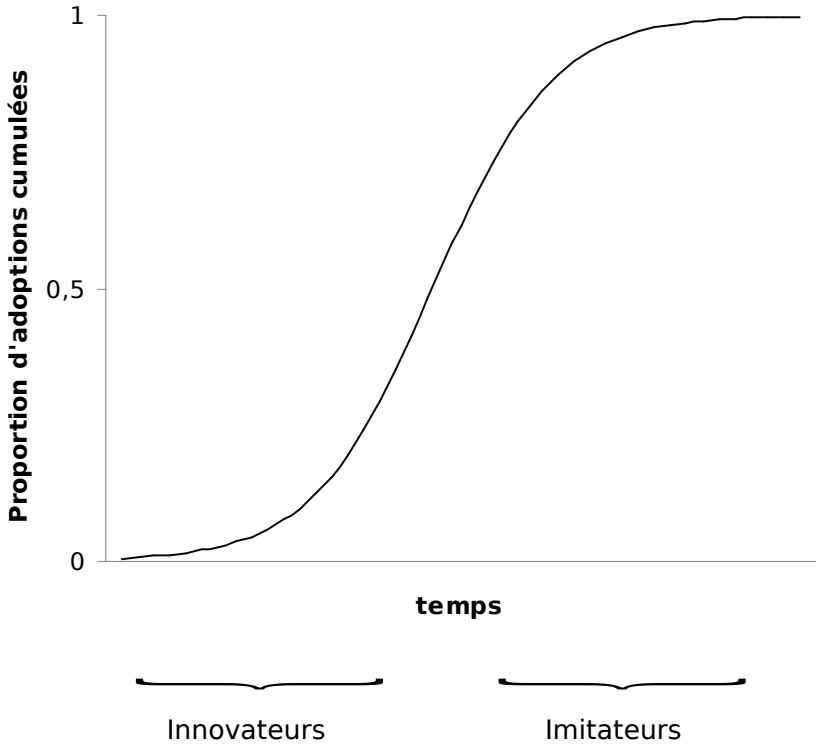


FIG. 1.7: La courbe de diffusion d'une nouvelle technologie

La courbe en S de diffusion technologique est représentée à la figure (1.7). Elle est définie comme la solution d'une équation différentielle. Elle est généralement composée de trois paramètres : l'origine, la pente et le plafond de diffusion. L'origine de la courbe correspond aux premières adoptions provoquées par l'entrée des producteurs de l'innovation sur le marché. La pente de la courbe de diffusion correspond au taux d'acceptation de l'innovation par la population des adopteurs potentiels. Le plafond de la courbe représente l'équilibre de long terme, lorsque la diffusion technologique est achevée. Le sentier de diffusion est ainsi reconstruit segment par segment dans chaque intervalle de temps considéré. Les principales formes fonctionnelles disponibles pour

reconstruire la courbe en S sont la courbe normale cumulée, la courbe logistique, la courbe de Gompertz et la courbe de Bass.

Griliches (1957) fut l'un des premiers à développer un modèle de diffusion épidémiologique pour expliquer la diffusion d'une innovation agricole, un nouvelle graine de maïs hybride, parmi les agriculteurs de plusieurs régions des Etats-Unis durant les années 1930-40-50. Les différences dans l'origine des courbes de diffusion entre chaque région étudiée sont expliquées par la profitabilité variable liée à l'entrée sur le marché, qui dépend de la densité du marché, des caractéristiques de l'innovation et des efforts de marketing entrepris auprès des agriculteurs, touchant les producteurs de l'innovation au sein de chaque région considérée. Les différences dans le plafond et dans la pente de la diffusion technologique sont généralement dues aux différences de la profitabilité liée à l'adoption technologique par les agriculteurs.

Chez Dinar et Yaron (1992), un modèle de diffusion épidémiologique est développé pour analyser la diffusion de plusieurs technologies d'irrigation au sein du secteur agricole israélien. Les technologies étudiées sont l'aspersion, la micro-aspersion et le goutte-à-goutte. Formellement, leur modèle de diffusion s'écrit :

$$N_t = \frac{d'_1}{1 + e^{\left(-d'_2 - \psi_0 t - \psi_3 t P_{t-1} - \psi_4 t P^w_{t-1} - \psi_5 t S_{t-1}\right)}} \tag{1.1}$$

où la variable N_t est la proportion d'adoptions à l'instant t, la variable P_{t-1} cor-

respond à l'évolution du prix de l'output de la date $t-2$ à la date $t-1$, la variable P^w_{t-1} correspond à l'évolution du prix de l'eau de la date $t-2$ à la date $t-1$ et la variable S_{t-1} correspond à l'évolution de la subvention aux équipements de la date $t-2$ à la date $t-1$. Les paramètres à estimer sont d'_1, le plafond de diffusion, d'_2 la constante d'intégration, ψ_0, la vitesse de diffusion, ψ_3, l'effet du prix de l'output sur la vitesse de diffusion, ψ_4, l'effet du prix de l'eau sur la vitesse de diffusion et ψ_5 l'effet de la subvention sur la vitesse de diffusion. L'estimation de ces paramètres permet aux auteurs de montrer l'influence des différentes variables économiques sur la vitesse et le plafond de diffusion. Le rôle des variables économiques sur le plafond de diffusion, cependant, n'est pas estimé directement comme pour la vitesse de diffusion, mais de façon paramétrique, en faisant varier d'_1 jusqu'à obtenir la meilleure estimation.

Chez Kemp (1997), la vitesse et le plafond de diffusion sont spécifiés simultanément comme des fonctions de variables économiques. L'analyse porte sur l'adoption de technologies de traitement biologique des eaux usées par le secteur industriel hollandais durant les années 1970-1980. Le modèle intégre une taxe sur les eaux usées, mise en place au début des années 1970 par les Pouvoirs Publics, capable d'influencer directement les paramètres de diffusion. L'estimation du modèle permet de mettre en évidence le rôle de la taxe sur la vitesse et le plafond de diffusion. Les résultats indiquent que la hausse progressive de la taxe a permis d'accélérer légèrement la diffusion des nouvelles technologies bénéfiques pour l'environnement. Ils montrent aussi que la hausse de la taxe a permis d'augmenter la taille de la population des adopteurs

potentiels, incitant certains industriels, auparavant non intéressés par la nouvelle technologie, à adopter l'innovation.

Le modèle de diffusion épidémiologique est un outil efficace pour expliquer la structure générale du processus de diffusion technologique. Il permet de mettre en évidence des facteurs socio-économiques, structurels et démographiques pour expliquer la structure de diffusion d'une innovation. Rarement appliqué à la diffusion des technologies d'irrigation, il semble intéressant de développer un modèle au sein duquel la vitesse et le plafond de diffusion sont simultanément spécifiés comme des fonctions de variables économiques. Ceci n'a, à notre connaissance, jamais été réalisé pour analyser la sélection des technologies d'irrigation par une population d'exploitants agricoles.

Le modèle de diffusion épidémiologique fait cependant l'objet de plusieurs critiques :

- la profitabilité de la technologie reste constante dans le temps pour chaque individu,
- chaque individu possède les mêmes chances d'adopter la nouvelle technologie,
- les adopteurs potentiels sont considérés homogènes et leur population est constante (sauf si le plafond de diffusion est endogénéisé),
- les sources d'information sont toutes internes (sauf pour le modèle de Bass),
- la prise en compte du risque, de l'incertitude et de l'acquisition d'information est difficilement intégrable,

- la possibilité d'adopter plusieurs fois l'innovation, lorsque cela est pertinent, n'est pas prise en compte.

Notons finalement que le modèle de diffusion épidémiologique ne permet pas de comprendre ce qui caractérise les individus adoptant plus tôt (ou plus tard) que les autres. Ceci a donné lieu au développement du modèle des choix rationnels d'adoption, qui permet d'analyser la sélection des technologies d'irrigation à l'échelle d'une parcelle ou d'une exploitation agricole.

1.4.1.2 La sélection par un agriculteur représentatif

Le modèle des choix rationnels d'adoption, qui est aussi appelé modèle de choix discret ou modèle de seuil, permet d'évaluer les probabilités d'adoption des nouvelles technologies par un individu (ou une firme) représentatif. Ce modèle fait l'hypothèse qu'un raisonnement économique rationnel, fondé sur la maximisation d'une fonction objectif sous contraintes, guide le timing des choix individuels. L'occurence de l'adoption technologique est expliquée en croisant les réalisations de la variable discrète à expliquer avec celles d'un certain nombre de variables explicatives dont les réalisations peuvent être indifféremment de nature qualitative ou quantitative. Dans ce contexte, la figure (1.8) montre que le nombre d'adopteurs, qui dépend d'un ensemble de caractéristiques individuelles, dessine une courbe de diffusion en S.

Le seuil d'adoption d'une nouvelle technologie est défini comme une combinaison de valeurs de certaines caractéristiques individuelles au-delà, ou en deçà, duquel l'adoption a lieu. Il est généralement le résultat d'une analyse coûts-bénéfices sous

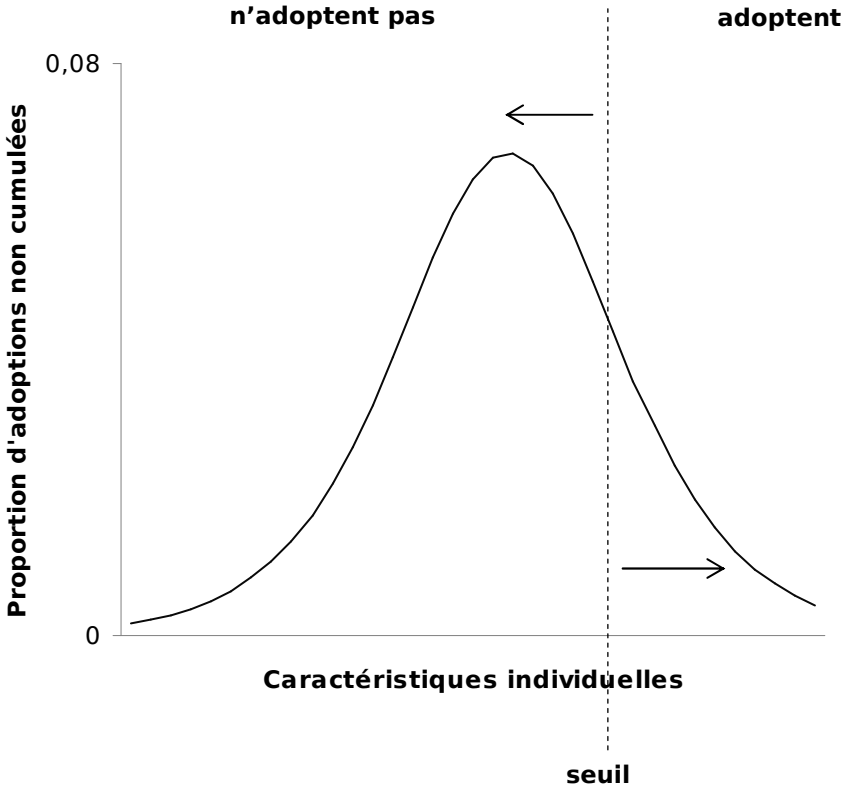


FIG. 1.8: La distribution des adopteurs potentiels

incertitude. Il dépend de variables explicatives pouvant concerner à la fois des caractéristiques de la nouvelle technologie à adopter ainsi que des caractéristiques des adopteurs potentiels et de leur contexte d'adoption. Comme il s'agit d'une probabilité, il doit être compris entre 0 et 1 et ne peut être spécifié de façon linéaire. Le choix de la relation entre la variable à expliquer et les variables explicatives se porte alors sur deux types de fonction : la fonction de répartition de la loi normale (modèle probit) et la fonction de répartition de la loi logistique (modèle logit).

David (1969) [16], fut un des premiers à développer un modèle des choix rationnels d'adoption pour expliquer l'adoption d'un certain type de moissonneuse mécanique (la moissonneuse McCorwick) par les agriculteurs du Midwest américain au XIX ème siècle. Il montre que le seuil d'adoption dépend surtout de la taille des exploitations agricoles. Pour les exploitations dont la taille est inférieure à un seuil critique, l'adoption n'a pas lieu car elle n'est pas profitable dans la mesure où les bénéfices de l'adoption, essentiellement les économies de main d'œuvre réalisables grâce à l'adoption, sont inférieures au coût de l'adoption.

Chez Caswell et Zilberman (1985), le modèle des choix rationnels d'adoption développé par Domencich et McFadden (1975) est utilisé pour expliquer l'adoption des nouvelles technologies d'irrigation par les producteurs de fruit situés dans la Central Valley en Californie, et traditionnellement équipés en irrigation à la raie. Les probabilités d'adoption de deux nouvelles technologies d'irrigation sont évaluées : l'irrigation par aspersion et l'irrigation localisée au goutte-à-goutte. La forme fonctionnelle retenue pour expliquer la probabilité P_{ij} de choisir la technologie j sur la parcelle i, évaluée par rapport à la probabilité P_{i1} de conserver l'irrigation à la raie, est la suivante :

$$\log \frac{P_{ij}}{P_{i1}} = \alpha_j + \beta_j L_i + \Gamma_j C_i - \gamma \Delta W_{ij} + \lambda_j E_i \tag{1.2}$$

où la variable L_i correspond à la localisation géographique de la parcelle i, la variable C_i correspond au fruit cultivé sur la parcelle i, la variable ΔW_{ij} correspond à la

[16] Cité par Kemp (1997).

différence entre le coût de l'eau d'irrigation par hectare sur la parcelle i avec la technologie j et le coût de l'eau d'irrigation sur la parcelle i avec le matériel traditionnel, et la variable E_i correspond à la source de la ressource en eau (eau de surface ou eau souterraine) sur la parcelle i. Les paramètres estimés sont α_j, la constante associée à chaque nouvelle technologie, β_j, Γ_j et λ_j, les effets associés aux caractéristiques de la parcelle i, et γ, l'effet conditionnel aux économies d'eau potentielles de la technologie j par rapport au matériel traditionnel sur la parcelle i.

Chez Koundouri et al. (2006), l'échelle d'analyse n'est plus la parcelle mais l'agriculteur. L'âge, le niveau de formation, l'indice d'aridité de l'exploitation, les dettes, l'accès au conseil à l'irrigation, l'accès à l'information, le bénéfice d'un revenu extérieur à l'agriculture, la nature de l'exploitation agricole (familiale ou pas) ainsi que les moments statistiques (estimés) de la distribution du profit sont les variables explicatives du choix d'adoption de la part des agriculteurs. La stratégie d'estimation développée permet de montrer que plus la variabilité du profit de l'exploitation agricole est grande, plus l'agriculteur est averse au risque et plus la probabilité d'adoption d'une nouvelle technologie d'irrigation augmente. Aucune distinction n'est faite, cependant, concernant la complexité de chaque nouvelle technologie, et le choix technologique de l'agriculteur représentatif se résume à adopter, ou pas, une nouvelle technologie d'irrigation.

Le modèle des choix rationnels d'adoption est un outil très intéressant pour ex-

pliquer les conditions de sélection individuelle des technologies d'irrigation par les agriculteurs. Il permet de mettre en évidence des facteurs économiques, environnementaux et institutionnels pour expliquer les décisions d'adoption. Il semble intéressant de développer une analyse empirique à l'échelle d'une exploitation agricole afin d'expliquer le choix d'une technologie d'irrigation donnée. Les modalités à expliquer pourront tenir compte du choix combiné matériel d'irrigation - outils de pilotage de l'irrigation, permettant alors d'expliquer le choix d'adoption des améliorations technologiques importantes pour économiser la ressource en eau.

Le modèle des choix rationnels fait cependant l'objet de plusieurs critiques :

- il n'intègre pas un mécanisme de transfert d'information et les interactions sociales jouent un rôle limité,
- le processus de diffusion est généralement guidé par des variations exogènes des prix, et le caractère endogène de ces variations n'est jamais vraiment pris en compte,
- un rôle mineur est attribué à l'apprentissage (car la plupart des modèles font l'hypothèse d'information parfaite et complète),
- des hypothèses très fortes encadrent la notion de rationalité.

Notons finalement que le modèle des choix rationnels ne permet pas de comprendre le rôle de la dynamique des institutions sur les comportements individuels. Ceci a donné lieu notamment au développement de la théorie évolutionniste du changement technologique, qui permet d'expliquer la façon dont les institutions (économiques,

sociales et politiques) façonnent et conditionnent les décisions économiques et les choix technologiques.

1.4.2 L'approche évolutionniste du changement technologique

Les travaux de Veblen, considérés comme fondateurs de l'approche évolutionniste en économie, mirent très tôt en évidence l'influence des institutions (et de leur évolution) sur les comportements économiques individuels (Veblen, 1909, p. 629) : *"Not only is the individual's conduct hedged about and directed by his habitual relations to his fellows in the group, but these relations, being of an institutional character, vary as the institutional scheme varies. The wants and desires, the end and aim, the ways and means, the amplitude and drift of the individual's conduct are functions of an institutional variable that is of a highly complex and wholly unstable character".*

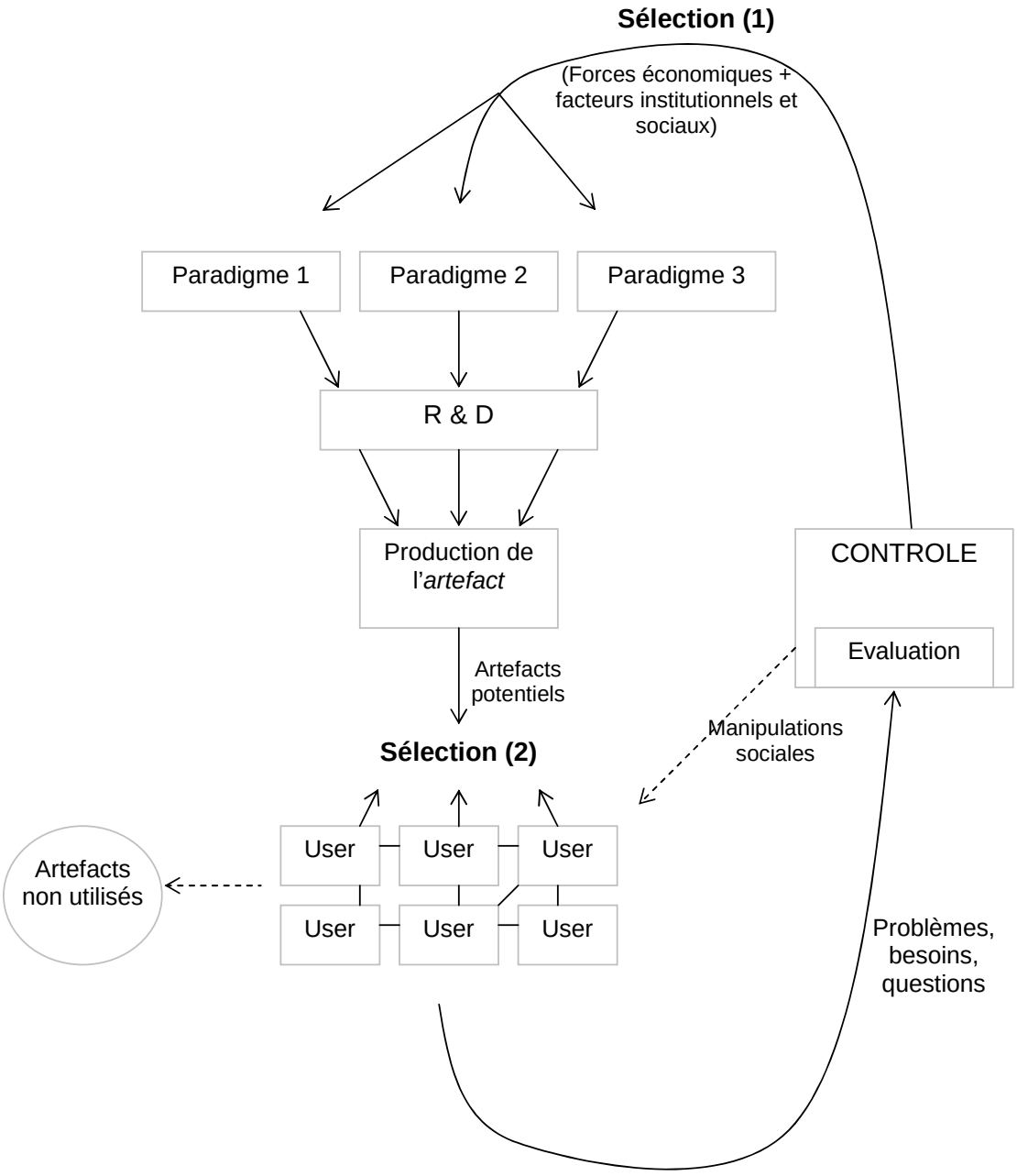
L'économie évolutionniste fait l'hypothèse que la diffusion d'une nouvelle technologie au sein d'un système économique correspond à la solution d'un problème spécifique caractérisé par un paradigme technologique. Cela sous-entend qu'une innovation technologique n'apparaît pas par hasard. Le paradigme technologique est composé à la fois d'un produit à développer et à améliorer et d'un ensemble d'heuristiques (Vers où allons-nous ? Vers où devrions-nous chercher ? Quelles sortes de connaissances devrions-nous mobiliser ?) (Dosi, 1988). Généralement, il s'agit d'améliorer les performances et réduire les coûts d'une technologie bien précise (par exemple une technologie d'irrigation). Le paradigme technologique synthétise d'abord l'ensemble

des connaissances collectives à propos des limites intrinsèques de la technologie à améliorer. Il comprend ensuite le programme de recherche pour améliorer la situation existante (Montaigne, 1997).

On peut l'illustrer en prenant l'exemple de la recherche de hausse de la productivité des terres irriguées suite à la hausse des prix du foncier et à la stagnation du prix de la canne à sucre au début des années 1990 à La Réunion. Une des réponses apportées par les institutions de contrôle fut la mise en place d'outils (subventions, conseil) pour inciter les agriculteurs à moderniser rapidement leurs matériels et leurs pratiques.

Pour expliquer la diffusion d'une innovation au sein d'un système social, le référentiel évolutionniste distingue deux niveaux de sélection : premièrement le niveau institutionnel et deuxièmement le niveau du marché représenté dans notre cas par les équipementiers et les agriculteurs. La sélection par les institutions se situe ex ante alors que la sélection par le marché se situe ex post. En d'autres termes, le contexte économique et social affecte le développement technologique de deux façons : premièrement la sélection de la direction de la mutation (i.e. la génèse de la diffusion technologique) par les institutions de contrôle et deuxièmement la sélection ex post à base d'essais et d'erreurs (i.e. la diffusion technologique) par les agriculteurs. Le cadre conceptuel évolutionniste du changement technologique au sein d'un système social est présenté par la figure (1.9).

Cette conceptualisation conduit à d'importantes questions théoriques en écono-



(Sources : Nelson & Winter, 1982; Dosi, 1982; 1988)

FIG. 1.9: Le référentiel évolutionniste du changement technologique

mie : comment les organisations (firmes, institutions, R&D et décideurs publics) réagissent à la sélection d'un paradigme technologique et comment les intéractions évoluent au sein de ce système technologique global et affectent le progrès le long d'une trajectoire technologique ? La notion d'équilibre est-elle encore pertinente ?

En fait, le résultat d'un paradigme technologique converge rarement vers un équilibre unique mais vers un ensemble d'équilibres. Cette vision dynamique de l'évolution économique est très différente de la tradition économique néo-classique, qui dans sa forme la plus simple suppose qu'un seul et unique équilibre peut être atteint, au regard des conditions initiales et des événements temporels (Bromley, 1982 ; Vatn, 2006). De plus, il est maintenant admis que les organisations peuvent faire des choix technologiques sous-optimaux à cause de leurs croyances sur ce qu'il est possible de faire ou tout du moins pertinent d'envisager de faire (Simon, 1959).

En particulier la dynamique d'apprentissage, par l'intermédiaire de l'évolution des interactions sociales, de l'ensemble des acteurs appartenant à une filière technologique est un paramètres central de " bloquages technologiques " potentiels du système économique (David, 1985 ; Arthur, 1989 ; Montaigne, 1997 ; Saviotti, 2001, Carillo-Hermosilla, 2005). Le sentier de diffusion peut présenter des dépendances qui évoluent au cours du processus de diffusion. La forme initiale du sentier de diffusion peut par exemple dépendre des objectifs institutionnels alors que le cœur du sentier peut dépendre d'autres paramètres tels que la nature des interactions sociales et le degré

d'information des agriculteurs. Ce référentiel a récemment été appliqué à l'analyse de l'adoption de nouvelles technologies moins polluantes par des producteurs et permet d'identifier les raisons qui poussent certains systèmes à faire des choix technologiques parfois sous-optimaux (i.e. à sélectionner un paradigme technologique mal adapté au contexte local) (Kemp, 1997 ; Mulder et al., 1999 ; Farolfi et Montaigne, 2001 ; Farolfi et Tidball, 2002 ; Lamy, 2004 ; Perret et Stevens, 2006).

Le contexte institutionnel du processus de changement technologique dans le secteur de la canne à sucre irriguée à La Réunion, appréhendé grâce à la grille de lecture évolutionniste, est illustré par la figure (1.10). Un premier niveau de sélection technologique est opéré par deux institutions : le Conseil Général et la Direction de l'Agriculture et de la Forêt (DAF). Ces institutions de contrôle sélectionnent le paradigme technologique de l'irrigation en tenant compte de plusieurs facteurs locaux : l'évolution de la stratégie de développement agricole, l'évolution de la politique de l'eau et l'évolution des pressions sociales (par exemple les besoins croissants en eau domestique).

Deux paradigmes technologiques sont décrits à la figure (1.10) : un au sein duquel la priorité est d'économiser la ressource en eau (plutôt relié à la promotion du goutte-à-goutte) et un autre au sein duquel la priorité est d'améliorer la production et la productivité agricoles (plutôt relié aux améliorations concernant l'irrigation par aspersion).

Le paradigme technologique initialement sélectionné génère et conditionne ensuite le cycle technologique. Tout d'abord, la recherche agronomique (CIRAD) ajuste les nouvelles technologies pour l'équipement en irrigation et en outils de pilotage aux besoins des agriculteurs. Ensuite, la Chambre d'Agriculture, qui suit les recommandations et résultats de la recherche, propose des formations et des services de conseil aux agriculteurs. Le deuxième niveau de sélection est donc opéré par les agriculteurs, qui interagissent entre eux par le biais d'associations et de syndicats, en fonction des caractéristiques techniques et économiques des nouvelles technologies mises sur le marché par les équipementiers.

Le cycle technologique se poursuit par la transmission de questions et besoins, par l'intermédiaire de la Chambre d'Agriculture, des associations d'irrigants et des syndicats, aux institutions de contrôle qui évaluent la nature du problème et prennent des décisions en fonction des informations dont ils disposent et de leurs contraintes. En d'autres termes, ils évaluent la décision à prendre concernant la poursuite du cycle technologique. Ils peuvent par exemple influencer concrètement les agriculteurs par l'intermédiaire de subventions à la production et à l'équipement. Ils peuvent aussi sélectionner un nouveau paradigme technologique ou ré-orienter le paradigme actuel.

Un point intéressant à noter est que les agriculteurs sont techniquement et administrativement influencés par plusieurs institutions. Cela peut être la source de problèmes

de coordination. C'est en partie pour répondre à ces problèmes qu'a été créé le Comité Technique pour l'Irrigation (CTI), qui décide de l'attribution des subventions à l'équipement aux agriculteurs qui en font la demande. Composé de membres du Conseil Général, de la DAF et de la Chambre d'Agriculture, le CTI joue un rôle important au deuxième niveau de sélection des technologies d'irrigation et pourrait profondément affecter le contexte de sélection des agriculteurs.

L'analyse de l'évolution du paradigme technologique de l'irrigation permet de mieux comprendre le phénomène de diffusion du goutte-à-goutte constaté sur les périmètres du sud de La Réunion. L'adoption du goutte-à-goutte débuta en fait lorsque le paradigme technologique évolua vers des objectifs d'économie d'eau et avec l'introduction de nouvelles zones irriguées plus sèches à la fin des années 1980 (Chastel, 1989).

Cette phase fut suivie d'une phase d'apprentissage générée par des interactions entre les usagers et les institutions ainsi que par l'utilisation du goutte-à-goutte par certains agriculteurs ("*learning by using*"). Un résultat de cette phase d'apprentissage mit en évidence que la transition de l'aspersion vers le goutte-à-goutte nécessiterait une modification profonde des pratiques des agriculteurs et des services d'appui-conseil. Ce changement aurait problablement eu besoin d'une phase de formation trop longue et trop coûteuse pour à la fois les agriculteurs et les institutions. Un autre résultat de cette phase mit en évidence la difficile adaptabilité du goutte-à-goutte à la culture de

canne à sucre puisque des problèmes de bouchage des goutteurs (à cause des racines des cannes) furent fréquemment observés durant la phase de *learning by using* et car on s'aperçut que les tuyaux du réseau tertiaire devaient être arrachés et remplacés à chaque replantation des souches de canne, qui a effectivement lieu tous les huit à dix ans. La figure (1.2) montre que les premiers abandons du goutte-à-goutte sont intervenus en 2000, soit une dizaine d'années après les premières adoptions.

Aussi, lorsque le paradigme technologique évolua vers une attention accrue concernant l'amélioration rapide de la productivité des exploitations au début des années 2000, les informations récoltées par les agriculteurs et les institutions à propos du goutte-à-goutte durant les années 1990 favorisèrent la diffusion d'un système amélioré d'irrigation par aspersion (couverture intégrale, vannes automatiques) au détriment du goutte-à-goutte, dans la mesure où les agriculteurs et les institutions possédaient déjà une bonne maîtrise de l'irrigation de la canne à sucre par aspersion.

L'approche évolutionniste permet donc de mettre en évidence des facteurs technologiques, économiques, structurels et culturels pour expliquer la diffusion des nouvelles technologies d'irrigation au sein du secteur de la canne à sucre irriguée de l'île de la Réunion. Elle permet aussi de relativiser les résultats des modèles standards, tout en indiquant les extensions pertinentes à envisager pour appliquer ces modèles à la sélection des technologies d'irrigation par les agriculteurs de La Réunion.

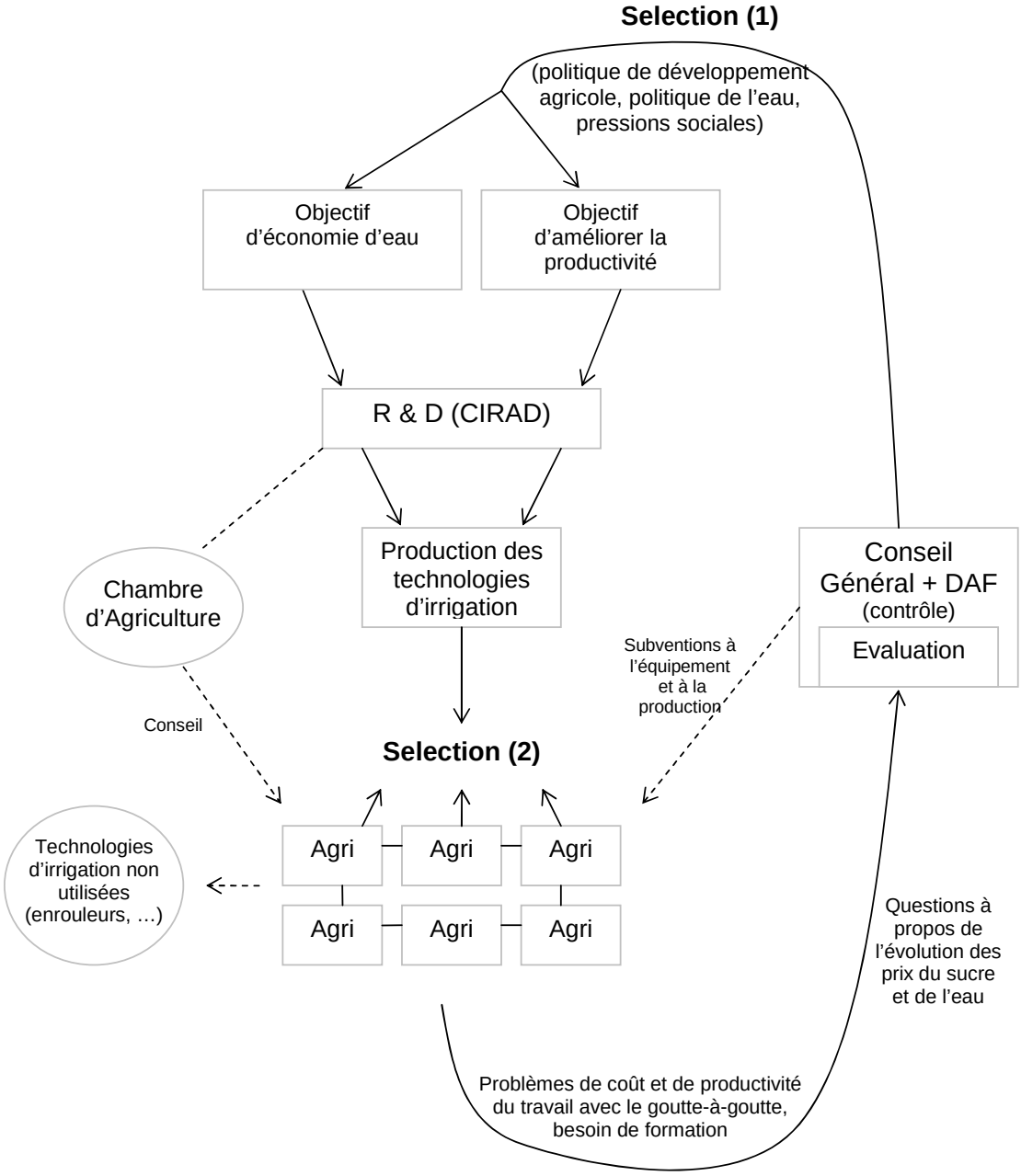


FIG. 1.10: Le contexte institutionnel du changement technologique dans le secteur de l'irrigation à La Réunion

1.4.3 Le choix des modèles de sélection des technologies d'irrigation par les agriculteurs de La Réunion

Dans cette section, on développe l'idée qu'il n'existe pas de modèle idéal qui capte l'ensemble des facteurs clés de la sélection des technologies d'irrigation par les agriculteurs. Un tel modèle serait en fait très complexe, et devrait intégrer des éléments liés aux facteurs suivants (ainsi qu'à leur évolution) : les propriétés techniques et économiques des nouvelles technologies d'irrigation, les interactions et influences sociales qui incitent les agriculteurs à s'équiper, les préférences individuelles, la perception de l'innovation par les agriculteurs, les tentatives par les équipementiers et les institutions de persuader les agriculteurs de moderniser leur système d'irrigation, la recherche d'information et de réduction du risque par les agriculteurs, etc.

Le véritable problème est donc, pour chaque nouvelle technologie d'irrigation étudiée, de déterminer la nature des facteurs explicatifs de la vitesse de diffusion. Les déterminants peuvent, d'une part, être endogènes ; auquel cas le modèle de diffusion épidémiologique semble mieux adapté. Dans le modèle de diffusion épidémiologique, l'apprentissage (endogène) et l'imitation sont les facteurs clés de la diffusion. D'autre part, les déterminants peuvent être exogènes ; auquel cas le modèle des choix rationnels d'adoption semble plus pertinent. Dans le modèle des choix rationnels d'adoption, le processus de diffusion est le résultat de changements exogènes dans le contexte (hétérogène) d'adoption. La différence majeure de ces deux types de modèle concerne

donc la façon dont les adopteurs potentiels acquièrent l'information à propos des nouvelles technologies, dans un contexte d'information coûteuse et de capacités cognitives limitées.

Nous discutons à présent de l'importance relative de différents mécanismes de diffusion pour chaque nouvelle technologie d'irrigation présente sur les périmètres irrigués de La Réunion. Dans la mesure où les adopteurs potentiels sont tous des producteurs de canne à sucre, nous analysons comment la diffusion technologique peut être affectée par la nature de l'innovation (incrémentale ou radicale) et son coût (faible, moyen ou élevé).

Sur la base de ces deux facteurs, nous choisirons le meilleur modèle entre le modèle de diffusion épidémiologique dans un cadre fixe, le modèle de diffusion épidémiologique dans un cadre évolutif (intégrant notamment des facteurs économiques qui évoluent), le modèle des choix rationnels d'adoption dans un cadre déterministe et le modèle des choix rationnels d'adoption dans un cadre incertain, pour analyser les modalités de diffusion des différentes nouvelles technologies d'irrigation à La Réunion. Le tableau (1.5) synthétise l'analyse. Parmi ces quatre modèles, le modèle de diffusion épidémiologique dans un cadre évolutif intègre quelques éléments issus du référentiel évolutionniste, en intégrant des non linéarités liées au contexte d'adoption pouvant affecter à la fois la vitesse de diffusion et le nombre final d'adopteurs.

L'adoption de la couverture intégrale seule (sans outils de pilotage automatique) est, pour un producteur de canne à sucre de La Réunion, une innovation incrémentale moyennement coûteuse. Pour ce type d'innovation, on considère généralement que l'apprentissage est le facteur clé de la diffusion, même si un processus de formation des goûts (effets d'entraînement collectif) peut aussi être un facteur explicatif important de la diffusion. A notre avis, pour analyser la diffusion d'une innovation agricole peu complexe et moyennement coûteuse, le modèle de diffusion épidémiologique dans un cadre fixe ou évolutif est le mieux adapté, même si le modèle des choix rationnels d'adoption, dans un cadre déterministe ou incertain, peut aussi être mobilisé pour décrire le processus de diffusion.

L'adoption de la couverture intégrale avec outils de pilotage automatique (vannes volumétriques ou programmables) est, pour un producteur de canne à sucre de La Réunion, une innovation incrémentale coûteuse. Pour ce type d'innovations, même si l'apprentissage pourrait à nouveau être considéré comme le facteur explicatif principal, on considère que la diffusion est affectée par un ensemble de facteurs liés à l'évolution du contexte d'adoption des irrigants, variations de prix des inputs et améliorations du rapport qualité-prix de l'innovation, ainsi qu'à l'évolution du capital des adopteurs potentiels, etc. A notre avis, pour analyser la diffusion d'une innovation agricole peu complexe mais coûteuse, le modèle de diffusion épidémiologique dans un cadre évolutif et le modèle des choix rationnels dans un cadre incertain sont les modèles les mieux adaptés pour décrire le processus de diffusion.

TAB. 1.5: Modèles appropriés pour analyser la sélection des technologies d'irrigation améliorées par les irrigants de La Réunion

	Caractéristiques de l'innovation	Coût de l'innovation	Type de modèle (1)[a]	(2)[b]	(3)[c]	(4)[d]
ACI seule	Incrémentale	Moyen	oui	oui	oui	oui
ACI avec automatismes	Incrémentale	Elevé		oui		oui
GAG	Radicale	Elevé				oui

[a] Modèle de sélection collective dans un cadre fixe.
[b] Modèle de sélection collective dans un cadre évolutif.
[c] Modèle de sélection individuelle dans un cadre déterministe.
[d] Modèle de sélection individuelle dans un cadre incertain.

L'adoption du goutte-à-goutte est, pour un producteur de canne à sucre de La Réunion, une innovation radicale coûteuse. En général, dans le cas d'une innovation complexe et chère, la diffusion a tendance à être lente. Lorsqu'une innovation est complexe, les adopteurs potentiels ont besoin de temps pour évaluer la nouvelle technologie et acquérir les compétences nécessaires à son utilisation. Une telle évaluation peut prendre la forme d'expérimentations personnelles, d'acquisition d'information de la part de l'exploitant agricole, de consultation de spécialistes extérieurs (notamment les services de conseil à l'irrigation) et de l'observation de l'expérience des autres agriculteurs. Les coûts élevés peuvent aussi être un facteur affectant la diffusion, en retardant l'adoption de l'innovation. Les adopteurs averses au risque sont en général réticents à acheter une innovation plus chère. Les coûts élevés de l'innovation peuvent aussi constituer un problème pour les plus petites exploitations, qui peuvent manquer

de fonds pour investir et souffrir de désavantages d'échelle. A notre avis, pour analyser la diffusion d'une innovation agricole complexe et coûteuse, le modèle des choix rationnels d'adoption dans un cadre incertain est le seul modèle candidat pour décrire le processus de diffusion.

1.5 Conclusion

Ce chapitre a d'abord présenté la problématique du changement technologique dans le secteur de l'irrigation à La Réunion. On montre notamment le rôle important joué par la modernisation des équipements en irrigation pour améliorer l'efficience de l'eau d'irrigation sur les périmètres irrigués du sud de La Réunion. Ce chapitre présente ensuite l'ensemble des déterminants de la sélection des technologies d'irrigation économes en eau par les agriculteurs de l'île de la Réunion. Les résultats d'une enquête auprès des irrigants combinée à une revue de la littérature ont permis de classer ces facteurs clés en trois axes : les caractéristiques des irrigants, les caractéristiques du contexte d'adoption des irrigants et les caractéristiques des technologies d'irrigation économes en eau.

Plus précisément on recense comme facteurs explicatifs : (1) la taille et le contexte pédo-climatique des exploitations ainsi que les objectifs, l'aversion au risque, les connaissances et les contraintes (notamment budgétaire) des irrigants ; (2) le prix de l'eau d'irrigation, les subventions à l'équipement, le prix de la canne, le transfert d'infor-

mation et la confiance des irrigants envers leurs institutions et (3) l'adaptabilité, la complexité et l'évolution du rapport qualité-prix des nouvelles technologies d'irrigation économes en eau.

Deux modèles théoriques issus de l'approche standard ont été mobilisés pour conceptualiser ces déterminants, le modèle de diffusion épidémiologique et le modèle des choix rationnels d'adoption. Dans le modèle de diffusion épidémiologique, les déterminants de la diffusion sont endogènes (apprentissage, imitation) et dans le modèle des choix rationnels d'adoption, les déterminants de la diffusion sont exogènes (des changements exogènes dans les caractéristiques des exploitations agricoles et du contexte d'adoption des agriculteurs). L'approche évolutionniste a aussi été mobilisée afin de relativiser la portée des modèles standards. La grille de lecture évolutionniste a été utilisée pour représenter la carte institutionnelle du changement technologique dans le secteur de l'irrigation à l'île de la Réunion. Cela a permis d'illustrer le rôle fondamental joué par le contexte d'adoption, notamment le contexte institutionnel, sur la diffusion des nouvelles technologies d'irrigation à La Réunion. Il semblerait que la mise en place d'une politique de prix incitative soit une condition nécessaire mais pas suffisante pour élaborer une politique de l'eau soutenable. Une approche intégrée dans laquelle des facteurs technologiques, économiques, structurels et culturels sont pris en compte semble plus appropriée.

Le problème traité dans ce chapitre permet de dériver les modèles adaptés au

contexte de La Réunion. Tout d'abord, la diffusion de l'aspersion en couverture intégrale sans automatismes semble dépendre de facteurs endogènes, suivre une courbe en S et répondre ainsi aux critères de diffusion épidémiologique. De plus, la diffusion de la couverture intégrale avec automatismes semble dépendre à la fois de facteurs endogènes et exogènes. Le modèle de diffusion épidémiologique dans un cadre évolutif (i.e. qui intègre certains éléments évolutionnistes comme la vitesse et le plafond de diffusion endogènes) et le modèle des choix rationnels d'adoption dans un cadre incertain semblent les mieux à même de décrire le processus de diffusion. Finalement la diffusion du goutte-à-goutte semble dépendre de facteurs plus complexes. Il semble que pour le goutte-à-goutte, seul le modèle des choix rationnels d'adoption dans un cadre incertain soit pertinent pour décrire le processus de diffusion.

La réponse à la question sur l'impact des instruments économiques initialement soulevée mérite une analyse plus poussée. C'est l'objectif du deuxième chapitre de cette thèse où on cherche à évaluer le rôle des incitations publiques sur le processus de sélection d'un nouvelle technologie d'irrigation par une population d'agriculteurs.

Chapitre 2

La sélection collective des technologies d'irrigation

2.1 Introduction

"The principal task of the social sciences lies in the explanation of social phenomena, not the behavior of single individuals. In isolated cases the social phenomena may derive directly, through summation, from the behavior of individuals, but more often this is not. Consequently, the focus must be on the social system whose behavior is to be explained. This may be as small as a dyad or as large as a society or even a world system, but the essential requirement is that the explanatory focus be on the system as a unit, not on the individuals or other components which make it up."
(James Coleman, 1990, cité par William Brock et Steven Durlauf, 2001)

La mise en place d'une politique de l'eau efficace est un sujet d'étude important en économie appliquée à cause du problème de rareté des ressources en eau [1] [2]. Dans le secteur de l'agriculture irriguée, la trajectoire technologique des équipements pour l'irrigation peut largement influencer la consommation d'eau effectivement appliquée aux cultures. En particulier, la transition vers des technologies plus modernes pourrait contribuer à améliorer le pilotage de l'irrigation par les irrigants, et donc à économiser l'eau [3] (Sunding et Zilberman, 2002 ; Schuck et al., 2005). Dans ce chapitre, nous nous intéressons à la question suivante, importante pour la politique de l'eau d'irrigation : dès l'instant où une nouvelle technologie d'irrigation, plus économe en eau, est offerte par un producteur, quels sont les facteurs qui déterminent sa diffusion au sein du secteur agricole.

Le modèle principal de diffusion technologique focalise sur la diffusion épidémiologique et sur la manière dont le comportement d'imitation pourrait expliquer les modalités du profil en S de la diffusion agrégée parmi la population des adopteurs potentiels dans le temps (Griliches, 1957 ; Mansfield, 1961). Formellement, une courbe de diffusion est définie comme la solution d'une équation différentielle de la forme :

$$\dot{n}_t = f\left(n_t, \beta, N\right) \tag{2.1}$$

[1] Voir par exemple Gaudin (2006), Berg et Lin (2007), García-Valiñas et Muñiz (2007) ou Groom et al. (2008) pour un aperçu de quelques récents résultats.

[2] Voir Margat et Tiercelin (1998) pour une synthèse des grandes problématiques sur l'eau dans d'autres domaines que l'économie.

[3] Voir Chopart et al. (2006), Fusillier (2006) et Richefort (2008) pour la preuve concernant l'île de la Réunion.

où n_t est une variable qui représente la proportion de la population ayant adopté l'innovation à l'instant t, β un paramètre qui reflète la vraisemblance d'adoption de l'innovation (aussi appelé la *vitesse* de diffusion), N un paramètre qui reflète la taille de la population qui peut eventuellement adopter l'innovation (aussi appelé le *plafond* de diffusion) et $f\,()$ une fonction qui détermine l'allure de la courbe de diffusion.

Suite aux travaux de Chow (1967), la plupart des recherches empiriques dans ce domaine s'est intéressée à l'introduction de variables économiques qui changent au cours du temps et peuvent affecter la vitesse et le plafond du processus de diffusion technologique (Glaister, 1974 ; Griliches, 1980 ; Bass, 1980 ; Horsky et Simon, 1983 ; Kalish et Lilien, 1983 ; Kalish, 1985 ; Mahajan et al., 1988 ; Karshenas et Stoneman, 1992). Un cadre conceptuel intéressant a été développé par Jarvis (1981), qui a montré que la diffusion de zônes de pâturages améliorées (“ fertilized grass-legume ”) en Uruguay de 1960 à 1980 suivait un sentier logistique au sein duquel la vitesse et le plafond de diffusion étaient influencés par l'évolution des prix du bœuf et des engrais. Ce cadre conceptuel a rarement été appliqué au domaine spécifique de la diffusion des nouvelles technologies d'irrigation. Les quelques résultats disponibles suggèrent une courbe de diffusion logistique, qui peut être affectée par des variables économiques telles que le prix de l'eau, le prix des outputs et les subventions à l'équipement en matériel d'irrigation performant (Fishelson et Rymon, 1989 ; Dinar et Yaron, 1992).

Ce chapitre fournit une contribution empirique originale à cette littérature [4]. Notre jeu de données offre une échantillon rarement disponible en économie agricole. Il inclut des séries de 110 agriculteurs en panel avec des observations de l'équipement en technologie d'irrigation avant et après un changement significatif des taux de subvention à l'équipement. En complément à l'originalité des données, on teste plusieurs formes fonctionnelles pour estimer la courbe réelle de diffusion du système d'aspersion en couverture intégrale. Notre analyse diffère des analyses de diffusion traditionnelles dans la mesure où la vitesse et le plafond de diffusion sont simultanément spécifiés comme une fonction du taux de subvention [5].

Ce chapitre est structuré ainsi. A la section 2, nous présentons le cadre conceptuel. La section 3 présente les données utilisées et la stratégie d'estimation des paramètres de diffusion. A la section 4, les principaux résultats d'estimation sont discutés, et la section 5 conclut le chapitre en dégageant quelques recommandations pour les décideurs publics.

2.2 Cadre conceptuel

Dans cette section, on définit formellement le sentier de diffusion dans un cadre évolutif, puis on présente les différentes formes fonctionnelles pour la courbe de diffu-

[4] Ce chapitre est basé sur un document de travail soumis pour publication en octobre 2008 ("Diffusion of Irrigation Technologies : The Role of Mimicking Behaviour and Public Incentives", avec M-E. Binet, 19 p).

[5] Voir aussi Beers et al. (2007) pour l'étude de l'impact environnemental des subventions.

sion technologique.

2.2.1 Le sentier de diffusion

L'évolution non-linéaire des instruments économiques peut avoir un impact à la fois sur la vitesse et le plafond de diffusion (Kemp, 1997). On définit N_t comme le nombre d'irrigants pouvant potentiellement adopter la technologie d'irrigation à l'instant t, β_t comme la vraisemblance d'adoption de la technologie d'irrigation à l'instant t et S_t comme le taux de subvention à l'équipement à l'instant t. On suppose que le nombre d'adoptions à l'instant t est une fonction des variables n_t, β_t et N_t. Formellement, une courbe de diffusion avec des modalités (vitesse et plafond) de diffusion endogènes est définie comme la solution d'une équation différentielle de la forme :

$$\dot{n}_t = f\left(n_t, \beta_t, N_t\right) \tag{2.2}$$

En supposant qu'à la fois β_t et N_t sont une fonction de la variable S_t, la courbe de diffusion $f\left(\right)$ est formellement définie par les paramètres β, N, η and γ, par l'intermédiaire des fonctions β_t et N_t écrites de la façon suivante :

$$\begin{cases} \beta_t = u\left(S_t, \beta, \eta\right) \\ N_t = v\left(S_t, N, \gamma\right) \end{cases} \tag{2.3}$$

Les paramètres η et γ caractérisent l'impact de la subvention publique sur, respectivement, la vitesse et le plafond de diffusion. On suppose qu'une augmentation du taux de subvention à l'équipement aura pour conséquence d'accroître la vitesse d'adoption

de la nouvelle technologie d'irrigation par les irrigants : $du/dS_t = \eta > 0$. On suppose aussi qu'une hausse du taux de subvention augmentera le nombre d'irrigants ayant adopté la nouvelle technologie d'irrigation à la fin du processus de diffusion : $dv/dS_t = \gamma > 0$. L'effet théorique d'une hausse du taux de subvention à l'équipement sur le sentier de diffusion est illustré par la figure (2.1).

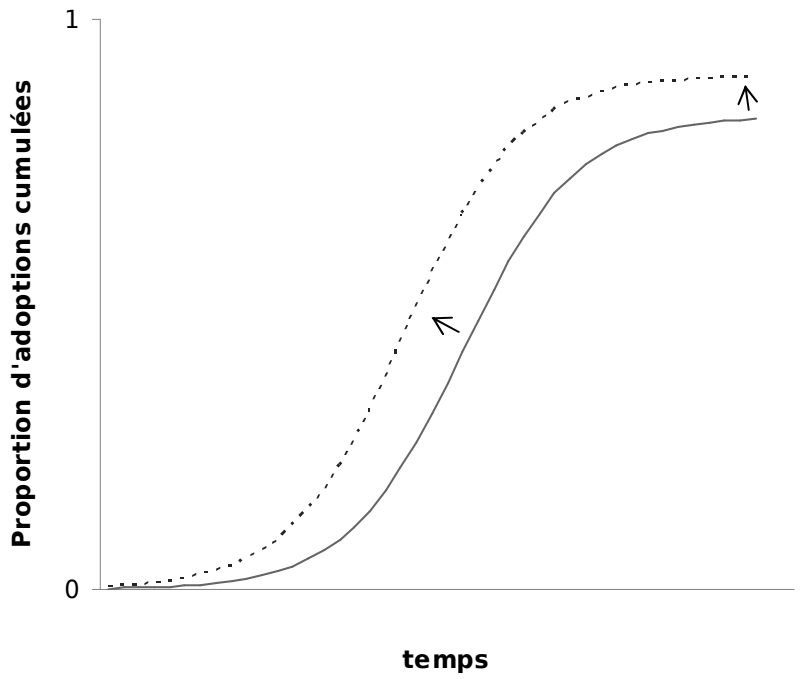


FIG. 2.1: L'effet théorique d'une hausse des subventions à l'équipement sur le sentier de diffusion d'une nouvelle technologie d'irrigation

2.2.2 La fonction de diffusion technologique

Les travaux existants sur la diffusion agrégée des technologies d'irrigation, et plus généralement sur la diffusion des innovations agricoles, ont essentiellement mobilisé la

courbe de diffusion logistique[6].

Dans les travaux pionniers, et désormais classiques, de Griliches (1957), la diffusion de nouvelles variétés hybrides de graines est expliquée par la fonction logistique avec la vitesse et le plafond de diffusion supposés constants. Formellement, la courbe de diffusion logistique dans un cadre fixe (avec des modalités constantes de diffusion) est définie comme la solution d'une équation différentielle de la forme :

$$\dot{n}_t = \beta \frac{n_t}{N} (N - n_t) \tag{2.4}$$

L'équation (2.4) stipule que le nombre de nouvelles adoptions à l'instant t est égal au nombre d'irrigants potentiellement adopteurs à l'instant t, $N - n_t$, multiplié par le produit de la proportion d'irrigants ayant déjà adopté à l'instant t, n_t/N, et du paramètre β. Notons aussi que bien que la probabilité d'adoption augmente au cours du temps, le nombre de nouveaux adopteurs décroît après un certain point (lorsque $n_t/N = 0.5$ dans le cas de la fonction logistique). Ceci est dû au nombre décroissant d'irrigants n'ayant pas adopté la nouvelle technologie d'irrigation. La proportion cumulée d'adopteurs est décrite par une courbe logistique au profil en S, qui tend de façon asymptotique vers le niveau de saturation, N.

L'alternative classique au modèle logistique est offerte par le modèle de Gompertz,

[6]On trouve dans Cramer (2003) une analyse historique de l'évolution du modèle logistique depuis sa naissance, en réponse à la théorie malthusienne sur la croissance démographique, jusqu'à ses récentes avancées en biologie ou en économie.

au sein duquel la diffusion est plus lente au début et à la fin du processus de diffusion (Chow, 1967 ; Lakhani, 1975 ; Dixon, 1980). Formellement, la courbe de Gompertz avec la vitesse et le plafond de diffusion supposés constants est définie comme la solution d'une équation différentielle de la forme :

$$\dot{n}_t = \beta n_t \left(\ln\left(N\right) - \ln\left(n_t\right)\right) \tag{2.5}$$

L'équation (2.5) génère une sigmoïde légèrement différente de celle produite par la fonction logistique. La courbe de Gompertz est en fait positivement asymétrique alors que la courbe logistique est parfaitement symétrique. Le point d'inflexion de la courbe de Gompertz se produit lorsque 37 % du plafond de diffusion a été atteint (i.e. lorsque $n_t/N = 0.37$). Le taux relatif de diffusion, $\dot{n}_t/n_t$, décroît de façon non-linéaire au cours du temps. En d'autres termes, le modèle de Gompertz suppose qu'entre des petits intervalles de temps égaux, la nouvelle technologie d'irrigation perd des proportions équivalentes de son pouvoir de diffusion.

Le modèle de Bass est l'extension classique du modèle logistique. Le modèle de Bass permet de spécifier une distinction entre les irrigants se comportant comme des innovateurs (les adopteurs précoces) et ceux se comportant comme des imitateurs (Bass, 1969). Formellement, la courbe de diffusion de Bass avec les paramètres de diffusion supposés constants est définie comme la solution d'une équation différentielle de la forme :

$$\dot{n}_t = \left(\delta + \beta \frac{n_t}{N}\right)(N - n_t) \tag{2.6}$$

L'équation (2.6) stipule que la probabilité conditionnelle d'adoption d'une nouvelle technologie d'irrigation par la population d'exploitants agricoles dépend de deux paramètres : le paramètre β, qui peut s'interpréter comme le coefficient d'influence interne, et le paramètre δ, qui reflète une source d'information externe au processus de diffusion et peut s'interpréter comme le coefficient d'influence externe.

Dans notre recherche, cette source d'information externe peut inclure les services d'appui-conseil et les efforts de communication des institutions locales pour promouvoir les nouvelles technologies d'irrigation (Lekvall et Wahlbin, 1973 ; Dodson et Muller, 1978). Le terme $\delta\,(N - n_t)$ dans la partie droite de l'équation (2.6), qui représente les adoptions de la part d'irrigants qui ne sont pas influencés dans leur timing d'adoption par le nombre d'irrigants ayant déjà adopté la nouvelle technologie, décroît de façon progressive au cours du temps dans la mesure où le nombre d'irrigants n'ayant pas encore adopté à l'instant t, $(N - n_t)$, continue de décroître.

2.3 Stratégie d'estimation

Dans cette section, on présente d'abord les variables utilisées pour l'approche empirique, puis on développe la stratégie économétrique adéquate pour estimer la diffusion d'une nouvelle technologie d'irrigation au sein du secteur de la canne à sucre irriguée

à l'île de la Réunion de 1990 à 2006.

2.3.1 Les variables utilisées

Les données utilisées dans ce chapitre proviennent de l'enquête réalisée fin 2006 auprès de 111 irrigants spécialisés dans la culture de canne à sucre et localisés sur les périmètres du sud de l'île de la Réunion. L'échantillon fut construit de manière empirique, par la méthode des strates, en utilisant une base de sondage construite en 2000 par le CIRAD. Les strates utilisées furent d'abord la localisation géographique des irrigants, puis leur niveau de consommation d'eau (voir Annexe A).

La trajectoire technologique des nouvelles technologies d'irrigation sur les périmètres irrigués du sud de la Réunion est représentée à la figure (2.2). L'irrigation par aspersion, qui concerne une grande majorité d'irrigants, a évolué de l'aspersion en couverture mobile ou totale vers l'aspersion en couverture intégrale. Cette amélioration de l'irrigation par aspersion débuta dans les années 1980. Au même moment, la technique de l'irrigation localisée au goutte-à-goutte commença à être utilisée avec l'introduction de nouvelles zones irriguées dans des régions plus sèches (cf. chapitre 1). La diffusion de cette nouvelle technologie d'irrigation dans les périmètres du sud gérés par la SAPHIR, après un départ assez lent quoique comparable à l'intégrale, semble faire face à un abandon progressif ayant commencé à la fin des années 1990.

Parmi les raisons avancées pour expliquer ce phénomène d'abandon du goutte-

à-goutte, il semblerait que le profond changement de pratiques et d'appui-conseil à l'irrigation, nécessaire à la transition de l'irrigation par aspersion vers l'irrigation localisée au goutte-à-goutte, ait provoqué cet abandon progressif (cf. chapitre 1). Dans ce chapitre, nous nous intéressons plutôt à expliquer la diffusion de l'aspersion en couverture intégrale qui semble être dans une phase d'accélération progressive entamée dans les années 1990.

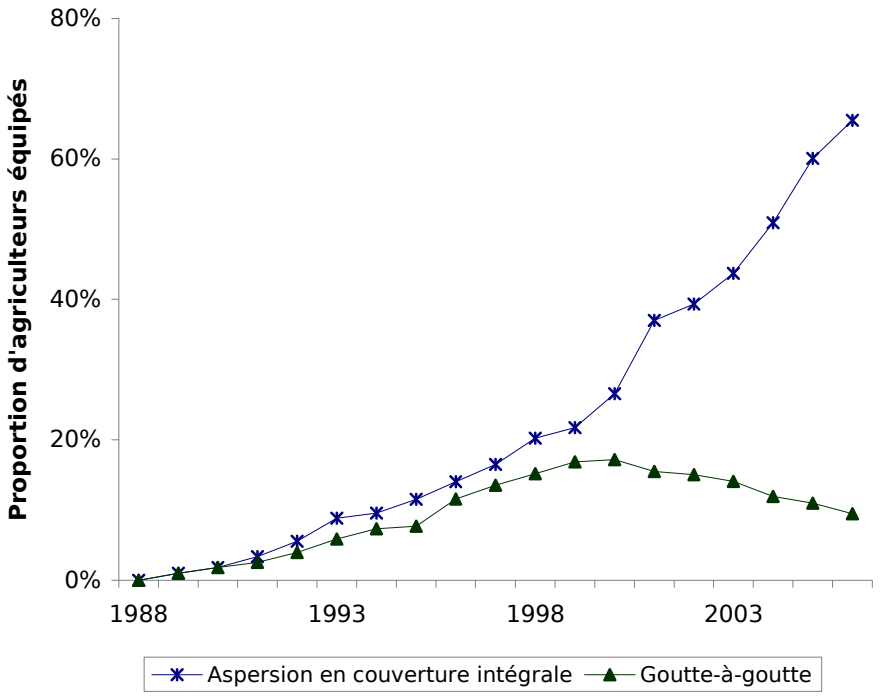


FIG. 2.2: La diffusion des nouvelles technologies d'irrigation à l'île de la Réunion, 1990-2006

Le tableau (2.1) décrit l'évolution des proportions d'adoption de l'aspersion en couverture intégrale pour 110 irrigants de 1990 à 2006 ainsi que l'évolution du taux

de subvention pour l'adoption de cette technologie. Au cours des années 1990, les politiques agricole et environnementale mises en place à La Réunion étaient orientées vers des considérations d'économie d'eau et d'amélioration de la productivité. Cela était essentiellement dû à l'introduction des nouvelles zones irriguées dans les zones plus sèches.

Tab. 2.1: Proportion d'adoptions et taux de subvention de l'aspersion en couverture intégrale à La Réunion, 1990-2006

Année	Proportion de nouveaux adopteurs[a]	Proportion cumulée de nouveaux adopteurs[a]	Taux de subvention[b]
1990	0.010	0.020	0.40
1991	0.017	0.038	0.40
1992	0.024	0.061	0.40
1993	0.035	0.097	0.40
1994	0.008	0.105	0.40
1995	0.020	0.125	0.40
1996	0.026	0.151	0.40
1997	0.026	0.177	0.40
1998	0.040	0.217	0.40
1999	0.016	0.233	0.40
2000	0.051	0.283	0.65
2001	0.100	0.383	0.65
2002	0.024	0.407	0.65
2003	0.036	0.443	0.65
2004	0.062	0.505	0.65
2005	0.092	0.597	0.65
2006	0.044	0.641	0.65

[a] calculé à partir d'un échantillon de 110 irrigants (source : enquête personnelle).
[b] valeur moyenne du taux de subvention par hectare (source : institutions locales).

Puis, au cours des années 2000, améliorer la productivité de culture de canne

à sucre devint l'orientation majeure des politiques publiques. Cela fut motivé par une diminution de la surface en canne à sucre, de plus en plus concurrencée par les extensions urbaines, une menace de fermeture des usines de sucre et les renégociations concernant la politique européenne à propos du secteur sucrier. Cela conduisit les institutions locales à allouer de nouvelles ressources (hausse des taux de subvention à l'équipement) pour l'adoption de technologies d'irrigation plus robustes et moins risquées telles que l'aspersion en couverture intégrale et des services d'appui-conseil à l'irrigation simplifiés. L'idée de base était d'inciter les irrigants à un rapide changement technologique.

2.3.2 La procédure d'estimation

Dans cette partie, on présente d'abord la stratégie économétrique adéquate pour estimer la proportion d'adoptions cumulées dans le temps de l'aspersion en couverture intégrale à La Réunion, puis celle permettant d'estimer la proportion d'adoptions dans chaque intervalle de temps.

2.3.2.1 L'estimation de la proportion d'adoptions cumulées dans le temps

La procédure d'estimation suit deux étapes. Premièrement, on estime le modèle logistique simple avec la vitesse et le plafond de diffusion spécifiés constants. La solution de l'équation (2.4) donne le nombre d'adopteurs en fonction du temps :

$$n_t = \frac{N}{1 + \mathrm{e}^{(-\alpha-\beta t)}} \tag{2.7}$$

où le paramètre α est la constante d'intégration. Ce modèle peut alors être spécifié de la façon suivante (Griliches, 1957) :

$$Y_t = \alpha + \beta t + \varepsilon_t \tag{2.8}$$

où :

$Y_t = \ln\left(n_t/(N - n_t)\right)$

$\varepsilon_t \sim N\left(0, \sigma^2\right)$

Les paramètres α et β de l'équation (2.8) peuvent être efficacement estimés par les moindres carrés ordinaires. Le paramètre représentant le plafond de diffusion est estimé en faisant varier N de façon paramétrique de 70 % à 100 % de la proportion d'irrigants considérés comme adopteurs potentiels. L'équation produisant le R^2 le plus élevé est supposé donner le meilleur estimateur conditionnel pour N (Jarvis, 1981). On fournit aussi un diagnostic pour la présence d'autocorrélation des termes d'erreur et analysons un processus d'autorégression du premier ordre. Le terme d'erreur prend la forme suivante :

$$\varepsilon_t = \rho\varepsilon_{t-1} + u_t \tag{2.9}$$

où :

$E\left(u_t\right) = 0; \quad E\left(u_t^2\right) = \sigma_u^2 \quad \text{et} \quad Cov\left(u_t, u_s\right) = 0 \ \text{ si } \ t \neq s$

$E(\varepsilon_t) = 0$ et $Var(\varepsilon_t) = \frac{\sigma_u^2}{1-\rho^2}$

Le paramètre ρ représente l'autocorrélation d'ordre 1. S'il ressort significatif de l'estimation, on peut conclure que la corrélation entre ε_t et ε_{t-1} est différente de zéro. La procédure d'estimation de Cochrane-Orcutt est utilisée pour estimer α, β et ρ[7].

2.3.2.2 L'estimation de la proportion d'adoptions dans chaque intervalle de temps

Au cours de la deuxième étape, on estime les modèles logistique, de Gompertz et de Bass, en tenant compte des effets potentiels d'une hausse du taux de subvention à l'équipement sur la vitesse et le plafond de diffusion. On spécifie une relation fonctionnelle entre les modalités de diffusion (les variables β_t et N_t) et le taux de subvention à l'équipement (la variable S_t). Formellement, compte tenu du fait que $S_t \in [0,1]$, β_t et N_t peuvent être spécifiés de la façon suivante :

$$\begin{cases} \beta_t = \beta + \eta S_t \\ N_t = N(1 - \gamma(1 - S_t)) \end{cases} \tag{2.10}$$

Il est alors intéressant de noter que si le taux de subvention tend vers 0, son impact sur la vitesse de diffusion tend vers 0 alors que son impact sur le plafond de diffusion tend vers $(1-\gamma)N$: $\lim_{S_t \to 0} \beta_t = \beta$ et $\lim_{S_t \to 0} N_t = N - \gamma N$. A l'opposé, si le taux de subvention tend vers 1, son impact sur la vitesse de diffusion tend vers η alors que son impact sur le plafond de diffusion tend vers 0 : $\lim_{S_t \to 1} \beta_t = \beta + \eta$ et $\lim_{S_t \to 1} N_t = N$.

[7] Voir Greene (2000), pp. 546-548.

Pour prendre en compte l'autocorrélation positive des termes d'erreur, on estime la proportion d'adoptions dans chaque intervalle de temps. Dans ce contexte, le modèle logistique avec la vitesse et le plafond de diffusion endogènes peut être spécifié en temps discret de la façon suivante (Kemp, 1997) :

$$\Delta X_t = \beta_t X_{t-1} \left(X_t^* - X_{t-1} \right) + \varepsilon_t \tag{2.11}$$

où :

$\Delta X_t = (n_t - n_{t-1})/N$

$X_{t-1} = n_{t-1}/N$

$X_t^* = 1 - \gamma \left(1 - S_t\right)$

$\varepsilon_t \sim N\left(0, \sigma^2\right)$

La variable X_t caractérise la proportion d'irrigants ayant déjà adopté l'aspersion en couverture intégrale à l'instant t et la variable X_{t-1} représente la proportion d'irrigants ayant adopté l'aspersion en couverture intégrale à l'instant $t-1$. Les paramètres β , η et γ doivent être estimés en rajoutant un bruit blanc (un terme d'erreur identiquement et indépendamment distribué) dans la partie droite de l'équation (2.10).

Pour traiter la non-linéarité des coefficients, on dérive les estimateurs des moindres carrés non linéaires [8]. La somme au carré des résidus s'écrit :

[8] D'autres méthodes d'estimation sont possibles (Srinivasan et Mason, 1986). Voir Schmittlein et Mahajan (1982) pour la méthode du maximum de vraisemblance appliquée au modèle de Bass.

$$S = \sum_{t=1}^{T} \left[\Delta X_t - \beta_t X_{t-1} \left(X_t^* - X_{t-1}\right)\right]^2 \tag{2.12}$$

Les coefficients sont estimés en minimisant (la moitié de) la somme du carré des résidus. La condition du premier ordre par rapport à la vitesse de diffusion β est :

$$\frac{\partial S}{\partial \beta} = -\sum_{t=1}^{T} \left[\Delta X_t - \beta_t X_{t-1} \left(X_t^* - X_{t-1}\right)\right] \left[X_{t-1} \left(X_t^* - X_{t-1}\right)\right] = 0 \tag{2.13}$$

La condition du premier ordre par rapport à l'effet de la subvention sur la vitesse de diffusion η est :

$$\frac{\partial S}{\partial \eta} = -\sum_{t=1}^{T} \left[\Delta X_t - \beta_t X_{t-1} \left(X_t^* - X_{t-1}\right)\right] \left[S_t X_{t-1} \left(X_t^* - X_{t-1}\right)\right] = 0 \tag{2.14}$$

La condition du premier ordre par rapport à l'effet de la subvention sur le plafond de diffusion γ est :

$$\frac{\partial S}{\partial \gamma} = \sum_{t=1}^{T} \left[\Delta X_t - \beta_t X_{t-1} \left(X_t^* - X_{t-1}\right)\right] \left[\beta_t X_{t-1} \left(1 - S_t\right)\right] = 0 \tag{2.15}$$

En pratique, on estime d'abord le modèle logistique avec β_t et N_t spécifiés constants ainsi que les trois variantes suivantes : le modèle logistique avec β_t spécifié comme une fonction de S_t, le modèle logistique avec N_t spécifié comme une fonction de S_t et le modèle logistique avec β et N_t spécifiés simultanément comme des fonctions de S_t.

On estime aussi le modèle de Gompertz spécifié en temps discret de la façon suivante (Kemp, 1997) :

$$\Delta X_t = \beta_t X_{t-1} \left(\ln \left(N_t \right) - \ln \left(n_{t-1} \right) \right) + \varepsilon_t \tag{2.16}$$

La somme au carré des résidus s'écrit :

$$S = \sum_{t=1}^{T} \left[\Delta X_t - \beta_t X_{t-1} \left(\ln \left(N_t \right) - \ln \left(n_{t-1} \right) \right) \right]^2 \tag{2.17}$$

La condition du premier ordre minimisant (la moitié de) la somme au carré des résidus par rapport à la vitesse de diffusion β est :

$$\frac{\partial S}{\partial \beta} = - \sum_{t=1}^{T} \left[\Delta X_t - \beta_t X_{t-1} \left(\ln \left(N_t \right) - \ln \left(n_{t-1} \right) \right) \right] \left[X_{t-1} \left(\ln \left(N_t \right) - \ln \left(n_{t-1} \right) \right) \right] = 0 \tag{2.18}$$

La condition du premier ordre par rapport à l'effet de la subvention sur la vitesse de diffusion η est :

$$\frac{\partial S}{\partial \eta} = - \sum_{t=1}^{T} \left[\Delta X_t - \beta_t X_{t-1} \left(\ln \left(N_t \right) - \ln \left(n_{t-1} \right) \right) \right] \left[S_t X_{t-1} \left(\ln \left(N_t \right) - \ln \left(n_{t-1} \right) \right) \right] = 0 \tag{2.19}$$

La condition du premier ordre par rapport à l'effet de la subvention sur le plafond

de diffusion γ est :

$$\frac{\partial S}{\partial \gamma} = \sum_{t=1}^{T} \left[\Delta X_t - \beta_t X_{t-1} \left(\ln\left(N_t\right) - \ln\left(n_{t-1}\right)\right)\right] \left[\beta_t X_{t-1} \frac{N\left(1 - S_t\right)}{N_t}\right] = 0 \tag{2.20}$$

Comme pour le modèle logistique, on estime d'abord le modèle de Gompertz avec β_t et N_t spécifiés constants ainsi que les trois variantes suivantes : le modèle de Gompertz avec β_t spécifié comme une fonction de S_t, le modèle de Gompertz avec N_t spécifié comme une fonction de S_t et le modèle de Gompertz avec β_t et N_t spécifiés simultanément comme des fonctions de S_t.

Finalement, on estime le modèle de Bass spécifié en temps discret de la façon suivante (Kemp, 1997) :

$$\Delta X_t = \left(\delta + \beta_t X_{t-1}\right)\left(X_t^* - X_{t-1}\right) + \varepsilon_t \tag{2.21}$$

La somme au carré des résidus s'écrit :

$$S = \sum_{t=1}^{T} \left[\Delta X_t - \left(\delta + \beta_t X_{t-1}\right)\left(X_t^* - X_{t-1}\right)\right]^2 \tag{2.22}$$

La condition du premier ordre minimisant (la moitié de) la somme au carré des résidus par rapport au paramètre d'influence interne β est :

$$\frac{\partial S}{\partial \beta} = -\sum_{t=1}^{T} \left[\Delta X_t - (\delta + \beta_t X_{t-1})\left(X_t^* - X_{t-1}\right)\right]\left[X_{t-1}\left(X_t^* - X_{t-1}\right)\right] = 0 \qquad (2.23)$$

La condition du premier ordre par rapport au paramètre d'influence externe δ est :

$$\frac{\partial S}{\partial \delta} = -\sum_{t=1}^{T} \left[\Delta X_t - (\delta + \beta_t X_{t-1})\left(X_t^* - X_{t-1}\right)\right]\left[X_t^* - X_{t-1}\right] = 0 \qquad (2.24)$$

La condition du premier ordre par rapport à l'effet de la subvention sur la vitesse de diffusion η est :

$$\frac{\partial S}{\partial \eta} = -\sum_{t=1}^{T} \left[\Delta X_t - (\delta + \beta_t X_{t-1})\left(X_t^* - X_{t-1}\right)\right]\left[S_t X_{t-1}\left(X_t^* - X_{t-1}\right)\right] = 0 \qquad (2.25)$$

La condition du premier ordre par rapport à l'effet de la subvention sur le plafond de diffusion γ est :

$$\frac{\partial S}{\partial \gamma} = \sum_{t=1}^{T} \left[\Delta X_t - (\delta + \beta_t X_{t-1})\left(X_t^* - X_{t-1}\right)\right]\left[(\delta + \beta_t X_{t-1})\left(1 - S_t\right)\right] = 0 \qquad (2.26)$$

Comme pour les modèles logistique et de Gompertz, on estime d'abord le modèle de Bass avec β_t et N_t spécifiés constants ainsi que les trois variantes suivantes : le modèle de Bass avec β_t spécifié comme une fonction de S_t, le modèle de Bass avec

N_t spécifié comme une fonction de S_t et le modèle de Bass avec β et N_t spécifiés simultanément comme des fonctions de S_t.

Les conditions du premier ordre du modèle logistique, du modèle de Gompertz et du modèle de Bass pour estimer les paramètres par les moindres carrés n'admettent pas de solution explicite. Ce cas nécessite donc une procédure itérative pour obtenir une solution. La méthode itérative de Gauss-Newton est utilisée pour calculer les estimations des coefficients [9], en affectant la valeur estimée par la méthode des moindres carrés ordinaires comme valeur intiale pour β et zéro comme valeur initiale pour les autres coefficients des différents modèles. Le logiciel R est utilisé pour programmer les estimations. La tâche empirique consiste ensuite à sélectionner la meilleure spécification pour expliquer la dynamique d'adoption. Plusieurs mesures d'efficacité des estimations sont donc calculées :

- le R^2 égal à $1 - \left[\left(\sum_{t=1}^{T} \varepsilon_t^2\right) \Big/ \left(\sum_{t=1}^{T} \left(\Delta X_t - \Delta \bar{X}\right)^2\right)\right]$,
- le R^2 ajusté égal à $1 - [((T-1)\,(1-\mathrm{R}^2))/(T-K)]$ où K est le nombre de régresseurs et
- la Log Vraisemblance du modèle.

Pour produire les estimations, on élimine de l'échantillon ces agriculteurs qui ont adopté l'aspersion en couverture intégrale après avoir adopté puis abandonné le goutte-à-goutte (moins de 5 % du nombre total d'irrigants dans l'échantillon inital), dans la mesure où ces agriculteurs demeuraient inéligibles à l'attribution d'une subvention à

[9] Voir Greene (2000), p 421.

l'équipement une fois qu'ils prirent la décision de revenir vers l'irrigation par aspersion. Toutes les estimations ont été conduites sur une période de dix-sept ans, allant de 1990 à 2006.

2.4 Résultats d'estimation

Cette section présente et analyse les résultats des estimations des paramètres de diffusion de l'aspersion en couverture intégrale dans le secteur de la canne à sucre irriguée à l'île de la Réunion au cours de la période 1990-2006. Dans un premier temps, on présente les résultats d'estimation de la proportion d'adoptions cumulées dans le temps obtenues grâce à l'estimation du modèle logistique simple. Dans un deuxième temps, on présente les résultats d'estimation de la proportion d'adoptions dans chaque intervalle de temps, obtenues grâce à l'estimation des modèles logistique, de Gompertz et de Bass spécifiés avec des paramètres de diffusion endogènes, fonctions de l'évolution du taux de subvention à l'équipement.

2.4.1 Les caractéristiques du sentier de diffusion

Les résultats empiriques du modèle logistique avec la vitesse et le plafond constants sont listés dans le tableau (2.2). Le premier point important à noter est que la meilleure estimation du plafond de diffusion reflète avec précision l'adoption de l'aspersion en couverture intégrale par la population d'irrigants ($R^2 = 0.98$). Les estimations des paramètres α et β sont chacune clairement différentes de zéro à un niveau de signifi-

cativité de 1 % et le R^2 est maximisé pour $N = 0.83$.

Ces résultats impliquent que 83 % de la population totale d'irrigants va éventuellement adopter la nouvelle technologie d'irrigation, avec 90 % du plafond final atteint en 2011 et 99 % en 2018. Le deuxième point important à noter concerne la présence de résidus autocorrélés. La statistique de Durbin-Watson pour l'équation (2.8), égale à $\left(\sum_{t=2}^{T}(\varepsilon_t - \varepsilon_{t-1})^2\right) \Big/ \left(\sum_{t=1}^{T}\varepsilon_t^2\right)$, est inférieure à 0.9, ce qui nous conduit à rejeter l'hypothèse nulle qu'il n'y a pas d'autocorrélation à un niveau de significativité de 5 %.

TAB. 2.2: Résultats d'estimation du modèle logistique avec paramètres de diffusion constants, 1990-2006

	α	β	ρ	N	R^2	adj-R^2	logLik	DW
(1)[a]	-540.79**	0.27**		0.83	0.98	0.98	4.27	0.80
	(19.82)	(0.01)						
(2)[b]	-504.39**	0.25**	0.39**	0.83	0.99	0.99	11.98	1.51
	(21.53)	(0.01)	(0.15)					

Projection des adoptions futures

	Année
$0.9N$	2011
$0.99N$	2018

** significatif à 5 %, écart-types entre parenthèses.
[a] MCO.
[b] Processus d'autorégression du premier ordre.

Un processus d'autogrégression du premier ordre est analysé [10]. Comme espéré, cette stratégie d'estimation améliore les résultats. La preuve en est donné par un R^2

[10] Voir Greene (2000), pp 531-532.

ajusté plus important (0.99 comparé à 0.98 lors de l'estimation intiale) ainsi que par le test de ratio de Log Vraisemblance (LR) qui nous conduit à rejeter l'hypothèse nulle que $\rho = 0$ à un niveau de significativité de 1 % $((LR = 15.42) > \chi_1^2)$.

Les résultats du modèle logistique avec la vitesse et le plafond de diffusion constants sont illustrés par la figure (2.3). Cette représentation graphique de l'estimation démontre que ce modèle permet de décrire empiriquement la tendance générale des changements observés d'acquisition de la couverture intégrale pour l'irrigation par aspersion au cours de la période d'analyse, avec des valeurs basses durant les premières années de diffusion et des valeurs plus élevées de 2000 à 2006. Ces résultats montrent que l'imitation, à travers le bouche-à-oreille et les effets d'entraînement collectif, est le facteur explicatif principal du processus de diffusion de la couverture intégrale sur les périmètres irrigués du sud de l'île de la Réunion.

2.4.2 Le rôle des incitations publiques

On analyse maintenant le rôle des incitations publiques sur les paramètres de diffusion. Dans un premier temps, on analyse le rôle des subventions à l'équipement, puis dans un deuxième temps, on analyse le rôle du conseil à l'irrigation.

2.4.2.1 Les subventions à l'équipement

Les résultats empiriques du modèle logistique avec la vitesse et le plafond de diffusion spécifiés comme une fonction du taux de subvention à l'équipement sont listés

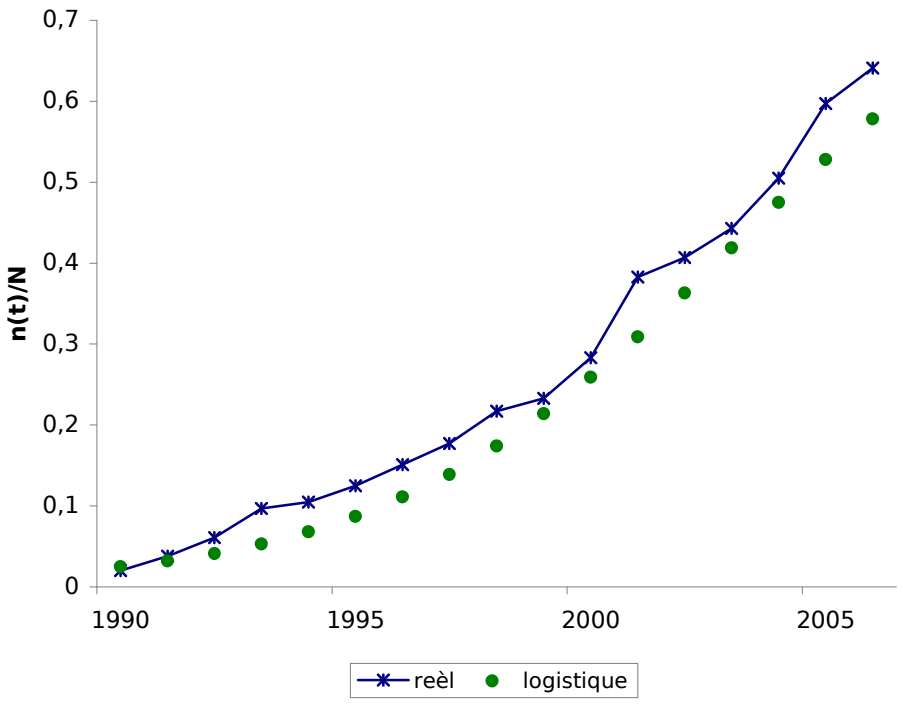


FIG. 2.3: Les résultats d'estimation pour $\frac{n_t}{N}$ du modèle logistique avec β_t et N_t constants

dans le tableau (2.3). Notons d'abord que les coefficients de Durbin-Watson qui sont présentés sont compris entre 2.11 et 2.22, ce qui ne nous conduit pas à rejeter l'hypoyhèse nulle qu'il n'y a pas d'autocorrélation à un niveau de significiativité de 5 %. Ces valeurs sont supérieures à celles obtenues lors de l'estimation du modèle logistique simple par la méthode des moindres carrés ordinaires. Cela nous indique qu'il n'existe pas de corrélation sérielle dans l'estimation des résidus du modèle logistique transformé.

Le R^2 et le R^2 ajusté présentés dans le tableau (2.3) peuvent être utilisés pour sé-

TAB. 2.3: Résultats d'estimation du modèle logistique avec paramètres de diffusion endogènes, 1990-2006

	β	η	γ	R^2	adj-R^2	logLik	DW
(1)[a]	0.24^{**}			0.35	0.35	41.90	2.22
	(0.03)						
(2)[b]	0.13	0.18		0.37	0.33	42.09	2.20
	(0.19)	(0.31)					
(3)[c]	0.43^{**}		0.66^{*}	0.40	0.36	42.52	2.11
	(0.17)		(0.35)				
(4)[d]	0.32	0.15	0.62	0.40	0.32	42.56	2.12
	(0.42)	(0.56)	(0.42)				

** significatif à 5 %, * significatif à 10 %, écart-types entre parenthèses.
[a] β_t constant et N_t constant
[b] $\beta_t = \beta + \eta S_t$ et N_t constant
[c] β_t constant et $N_t = N\left(1 - \gamma\left(1 - S_t\right)\right)$
[d] $\beta_t = \beta + \eta S_t$ et $N_t = N\left(1 - \gamma\left(1 - S_t\right)\right)$

lectionner la meilleure forme fonctionnelle. Dans le modèle logistique, la spécification de N_t comme une fonction de S_t donne de meilleurs résultats que la spécification de N_t comme une constante, puisque le R^2 et le R^2 ajusté affichent des valeurs plus élevées. Par contre, la spécification de β_t comme une fonction de S_t ainsi que la spécification simultanée de β_t et de N_t comme des fonctions de S_t améliorent peu les résultats puisque le R^2 affiche une valeur plus élevée que le modèle logistique simple mais le R^2 ajusté affiche une valeur plus faible.

Parmi les paramètres estimés, seul η n'est jamais différent de zéro de façon significative pour un niveau de significativité minimum de 10 %. Ces résultats montrent

que le taux de subvention à l'équipement est un facteur significatif du processus de diffusion de l'aspersion en couverture intégrale. Ces résultats, qui suggèrent que l'influence du taux de subvention à l'équipement se caractérise surtout à travers N_t, le nombre d'irrigants potentiellement adopteurs, doivent cependant être considérés avec précaution car le test de ratio de Log Vraisemblance nous conduit à ne pas rejeter l'hypothèse nulle que $\gamma = 0$ à un niveau de significativité de 15 %.

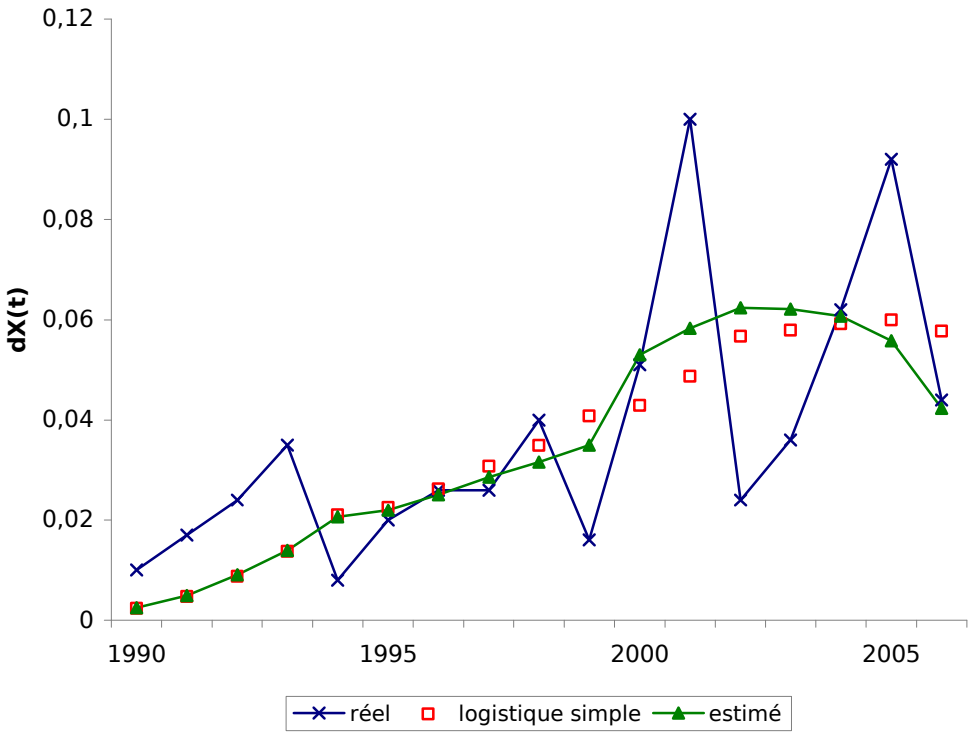


FIG. 2.4: Les résultats d'estimation pour ΔX_t du modèle logistique avec β_t constant et $N_t = N(1 - \gamma(1 - S_t))$

Les résultats des modèles logistique avec $\beta_t = \beta$ et $N_t = N$ ainsi qu'avec $\beta_t = \beta$ et $N_t = N(1 - \gamma(1 - S_t))$ sont illustrés à la figure (2.4). Cette figure montre que l'inclusion d'une subvention à l'équipement capable d'influencer le plafond de diffusion

au sein du modèle logistique, est plus à même de décrire l'augmentation soudaine de ΔX_t apparue en 2000 suite à la hausse du taux de subvention. Il semblerait que ce changement dans le contexte d'adoption des irrigants ait permis à certains irrigants à la base réfractaire à l'idée de changer de matériel de devenir des adopteurs potentiels.

Le tableau (2.4) présente les résultats empiriques du modèle de Gompertz avec la vitesse et le plafond de diffusion spécifiés comme une fonction du taux de subvention à l'équipement. Comme pour l'estimation du modèle logistique transformé, il est intéressant de noter que les coefficients de Durbin-Watson qui sont présentés sont compris entre 1.98 et 2.31, ce qui ne nous conduit pas à rejeter l'hypoyhèse nulle qu'il n'y a pas d'autocorrélation à un niveau de significiativité de 5 %. Ces valeurs sont à peu près équivalentes de celles du modèle logistique transformé. Cela nous indique qu'il n'existe pas de corrélation sérielle dans l'estimation des résidus du modèle de Gompertz transformé, et que du point de vue du traitement de l'autocorrélation des résidus, le modèle de Gompertz n'est pas préférable au modèle logistique.

Dans le modèle de Gompertz, la spécification de β_t comme une fonction de S_t donne de meilleurs résultats que la spécification de β_t comme une constante, puisque le R^2 et le R^2 ajusté affichent des valeurs plus élevées. La spécification simultanée de β_t et N_t comme des fonctions de S_t donne aussi de meilleurs résultats que le modèle de Gompertz simple, mais améliore peu les résultats du modèle avec β_t spécifié comme une fonction de S_t et N_t constant. De plus, la spécification de N_t comme une fonction

TAB. 2.4: Résultats d'estimation du modèle de Gompertz avec paramètres de diffusion endogènes, 1990-2006

	β	η	γ	R^2	adj-R^2	logLik	DW
(1)[a]	0.14**			0.31	0.31	41.30	1.98
	(0.02)						
(2)[b]	-0.02	0.28*		0.45	0.42	43.30	2.22
	(0.08)	(0.14)					
(3)[c]	0.09*		-2.49	0.33	0.28	41.50	2.15
	(0.05)		(4.86)				
(4)[d]	-0.02	0.32	0.22	0.46	0.38	43.30	2.31
	(0.10)	(0.22)	(0.78)				

** significatif à 5 %, * significatif à 10 %, écart-types entre parenthèses.
[a] β_t constant et N_t constant
[b] $\beta_t = \beta + \eta S_t$ et N_t constant
[c] β_t constant et $N_t = N\left(1 - \gamma\left(1 - S_t\right)\right)$
[d] $\beta_t = \beta + \eta S_t$ et $N_t = N\left(1 - \gamma\left(1 - S_t\right)\right)$

de S_t et β_t constant améliore peu les résultats puisque le R^2 affiche une valeur plus élevée que le modèle de Gompertz simple mais le R^2 ajusté affiche une valeur plus faible.

Parmi les paramètres estimés, seul γ n'est jamais différent de zéro de façon significative pour un niveau minimum de significativité de 10 %. De plus, le test de ratio de Log Vraisemblance nous conduit ici à rejeter l'hypothèse nulle que $\eta = 0$ à un niveau de significativité de 5 %. Ces résultats confirment que le taux de subvention à l'équipement est un facteur significatif du processus de diffusion de l'aspersion en couverture intégrale, bien que son influence sur le plafond de diffusion soit moins mise

en évidence que dans le cas du modèle logistique. D'après le modèle de Gompertz, l'influence du taux de subvention à l'équipement se caractérise surtout à travers β_t, la vitesse de diffusion technologique.

Les résultats du modèle de Gompertz avec $\beta_t = \beta + \eta S_t$ et $N_t = N$ sont illustrés à la figure (2.5). Afin de comparer les formes fonctionnelles utilisées, cette figure décrit aussi les résultats du modèle logistique simple, c'est à dire avec $\beta_t = \beta$ et $N_t = N$. On constate d'abord que le modèle de Gompertz décrit correctement la courbe réelle de diffusion de l'aspersion en couverture intégrale. Cette figure montre aussi que l'inclusion d'une subvention à l'équipement capable d'influencer la vitesse de diffusion, est à même de décrire l'augmentation soudaine de ΔX_t apparue en 2000 suite à la hausse du taux de subvention. Il semblerait que ce changement dans le contexte d'adoption des irrigants ait permis à certains irrigants d'adopter plus rapidement la nouvelle technologie d'irrigation.

2.4.2.2 Le conseil à l'irrigation

Le tableau (2.5) présente les résultats empiriques du modèle de Bass avec la vitesse et le plafond de diffusion spécifiés comme une fonction du taux de subvention à l'équipement. Comme pour les modèles logistique et de Bass transformés, il est intéressant de noter que les coefficients de Durbin-Watson qui sont présentés sont compris entre 2.21 et 2.38, ce qui ne nous conduit pas à rejeter l'hypoyhèse nulle qu'il n'y a pas d'autocorrélation à un niveau de significiativité de 5 %. Ces valeurs sont à peu près

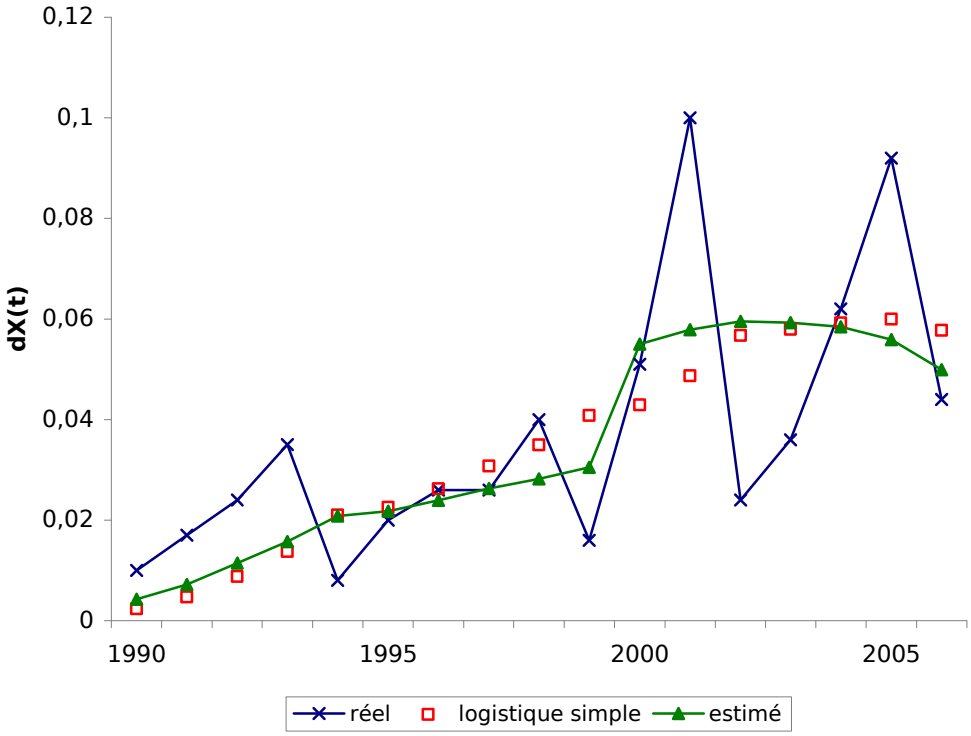


FIG. 2.5: Les résultats d'estimation pour ΔX_t du modèle de Gompertz avec $\beta_t = \beta + \eta S_t$ et N_t constant

équivalentes de celles des modèles logistique et de Gompertz transformés. Cela nous indique qu'il n'existe pas de corrélation sérielle dans l'estimation des résidus du modèle de Bass transformé, et que du point de vue du traitement de l'autocorrélation des résidus, le modèle de Bass n'est pas préférable aux modèles logistique et de Gompertz.

La spécification de β_t comme une fonction de S_t donne de meilleurs résultats que la spécification de β_t comme une constante, puisque le R^2 et le R^2 ajusté affichent des valeurs plus élevées. D'autre part, la spécification de N_t comme une fonction de S_t donne aussi de meilleurs résultats que le modèle de Gompertz simple, puisque

TAB. 2.5: Résultats d'estimation du modèle de Bass avec paramètres de diffusion endogènes, 1990-2006

	δ	β	η	γ	R^2	adj-R^2	logLik	DW
(1)[a]	0.01	0.21**			0.38	0.34	42.29	2.28
	(0.01)	(0.05)						
(2)[b]	0.02	-0.16	0.56		0.47	0.39	43.56	2.38
	(0.01)	(0.26)	(0.38)					
(3)[c]	0.01	0.38**		0.67*	0.43	0.35	42.94	2.21
	(0.02)	(0.17)		(0.36)				
(4)[d]	0.02	-0.15	0.66	0.40	0.48	0.36	43.68	2.34
	(0.02)	(0.37)	(0.55)	(0.66)				

** significatif à 5 %, * significatif à 10 %, écart-types entre parenthèses.
[a] β_t constant et N_t constant
[b] $\beta_t = \beta + \eta S_t$ et N_t constant
[c] β_t constant et $N_t = N(1 - \gamma(1 - S_t))$
[d] $\beta_t = \beta + \eta S_t$ et $N_t = N(1 - \gamma(1 - S_t))$

les indicateurs d'efficacité des estimations affichent tous des valeurs plus élevées. En revanche, le modèle spécifié avec le plafond de diffusion endogène et la vitesse de diffusion constante appauvrit les résultats du modèle de Gompertz simple. De plus, la spécification simultanée de β_t et N_t comme des fonctions de S_t améliore peu les résultats du modèle spécifié avec β_t endogène et N_t constant, puisque seul le R^2 affiche une valeur plus élevée.

Parmi les paramètres estimés, δ et η ne sont jamais différents de zéro de façon significative pour un niveau minimum de significativité de 10 %. Cependant, le test de ratio de Log Vraisemblance nous conduit ici à rejeter l'hypothèse nulle que $\eta = 0$ à un niveau de significativité de 15 % ainsi qu'à ne pas rejeter l'hypothèse nulle que $\gamma = 0$

à un niveau de significativité de 15 %. Ces résultats confirment à nouveau que le taux de subvention à l'équipement est un facteur significatif du processus de diffusion de l'aspersion en couverture intégrale. D'après le modèle de Bass, l'influence du taux de subvention à l'équipement se caractérise surtout à travers β_t, la vitesse de diffusion technologique. Ces résultats confirment les résultats obtenus suite à l'estimation du modèle de Gompertz.

Les résultats du modèle de Bass avec $\beta_t = \beta + \eta S_t$ et $N_t = N$ sont illustrés à la figure (2.6). Afin de comparer la courbe logistique et la courbe de Bass, cette figure décrit aussi les résultats du modèle logistique simple. On constate d'abord que le modèle de Bass décrit correctement la courbe réelle de diffusion de l'aspersion en couverture intégrale. Cette figure montre aussi que l'inclusion d'une subvention à l'équipement capable d'influencer la vitesse de diffusion, est à même de décrire l'augmentation soudaine de ΔX_t apparue en 2000 suite à la hausse du taux de subvention. Ce résultat confirme le résultat obtenu suite à l'estimation du modèle de Gompertz qui dit que la hausse des taux de subvention à l'équipement a permis d'accélérer la diffusion de la nouvelle technologie d'irrigation au sein des périmètres irrigués du sud de La Réunion.

Parmi les douze modèles estimés à la deuxième étape, le premier modèle à émerger est le modèle de Gompertz au sein duquel β_t est une fonction de S_t dans la mesure où ce modèle affiche le R^2 ajusté le plus élevé, égal à 0.42. Cette valeure est cohérente avec les valeurs trouvées dans la littérature (Kemp, 1997). Le second modèle à noter est le modèle de Bass au sein duquel β_t est une fonction de S_t dans la mesure

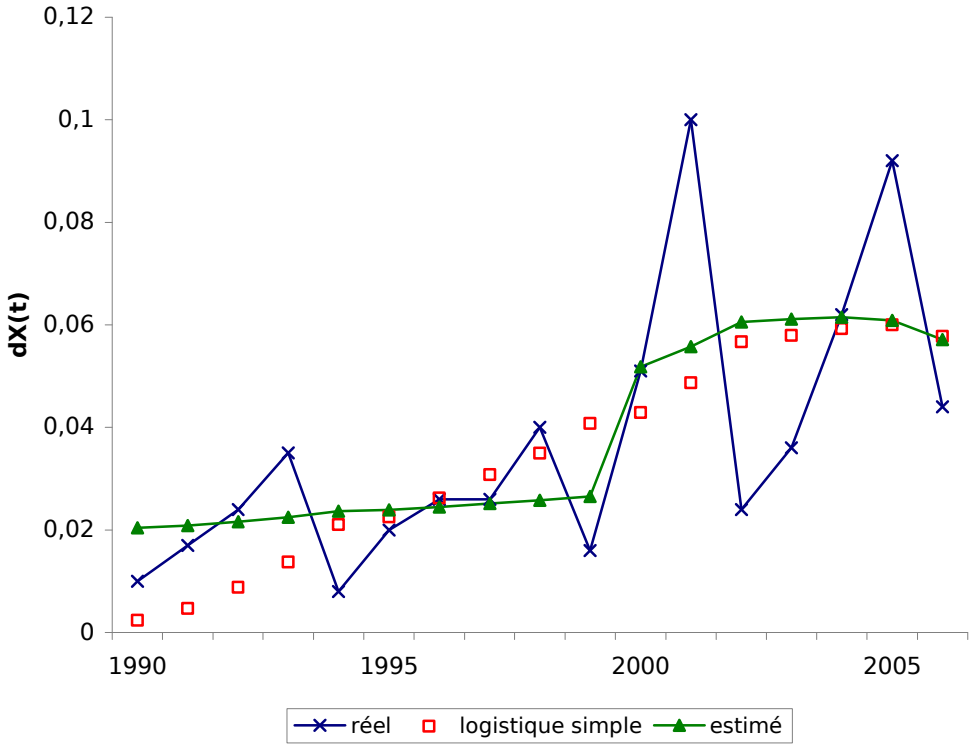


FIG. 2.6: Les résultats d'estimation pour ΔX_t du modèle de Bass avec $\beta_t = \beta + \eta S_t$ et N_t constant

où ce modèle affiche des valeurs élevées pour les deux indicateurs d'efficacité utilisés ($R^2 = 0.47$ et adj-$R^2 = 0.39$) comparé aux autres modèles. Il se pourrait que le paramètre supplémentaire, δ, inclu dans le modèle de Bass améliore légèrement les résultats du modèle logistique. Bien qu'elles n'apparaissent jamais différentes de zéro de façon significative, les estimations de δ affichent des valeurs cohérentes avec celles trouvées dans la littérature.

Ces résultats montrent d'abord que la fonction logistique n'est pas la mieux adaptée pour expliquer la courbe réelle de diffusion de l'aspersion en couverture inté-

grale. Cela nous conduit à penser que des asymétries existent au sein du sentier réel de diffusion. Ces résultats montrent aussi que les sources d'information principales des irrigants à propos de l'aspersion en couverture intégrale furent surtout internes au processus de diffusion. Cela semble cohérent avec la réalité puisque les services d'appui-conseil et les efforts de communication des institutions locales (formations, stages, etc.), bien qu'assez constants durant la période du processus de diffusion de l'aspersion en couverture intégrale étudiée dans ce chapitre, étaient surtout destinés aux technologies d'irrigation les plus sophistiquées.

Il peut sembler étonnant d'obtenir des résultats différents concernant l'effet du taux de subvention à l'équipement sur le sentier de diffusion selon la spécification utilisée pour la courbe de diffusion. Le modèle logistique estimé dans ce chapitre met plutôt en évidence un impact de la subvention sur le plafond de diffusion alors que les modèles de Bass et de Gompertz mettent plutôt en évidence un impact sur la vitesse de diffusion.

Lorsque les paramètres de diffusion sont exogènes, les résultats montrent que le modèle logistique est plus efficace que les modèles de Gompertz et de Bass. Par contre, lorsque les paramètres de diffusion sont endogènes (fonction du taux de subvention), les modèles de Gompertz et de Bass sont plus efficaces que le modèle logistique.

Une explication possible concerne les asymétries du sentier de diffusion constatées

à la figure (2.6) qui pourraient être mal prises en compte par le modèle logistique. La parfaite symétrie de la courbe logistique avec les paramètres de diffusion exogènes pourrait troubler les résultats concernant l'effet de la subvention sur la forme du sentier de diffusion. Cette hypothèse sur la forme du sentier caractéristique de diffusion pourrait être trop restrictive et l'usage de courbes alternatives semble préférable pour analyser l'effet du taux de subvention.

2.5 Conclusion

Ce chapitre a développé un cadre conceptuel permettant de comprendre comment les agriculteurs obtiennent l'information à propos d'une nouvelle technologie d'irrigation plus économe en eau, et finalement d'identifier les facteurs explicatifs de l'adoption d'une amélioration technologique pour un matériel d'irrigation historiquement très répandu à La Réunion. On a estimé les modèles logistique, de Gompertz et de Bass afin d'expliquer le plus précisément possible la diffusion de l'aspersion en couverture intégrale dans le secteur de la canne à sucre irriguée de l'île de la Réunion. L'approche développée dans ce chapitre a notamment intégré la possibilité d'évaluer l'impact des incitations publiques à l'adoption de nouvelles techniques d'irrigation sur la structure de diffusion.

Les résultats d'estimation montrent que les principales sources d'information des irrigants à propos de l'aspersion en couverture intégrale proviennent du bouche-à-

oreille et des effets d'entraînement collectif. En d'autres termes, l'imitation apparaît être le facteur explicatif principal de la dynamique d'adoption. Les résultats montrent aussi que le sentier de diffusion caractéristique ne représente pas une courbe en S parfaitement symétrique. Un facteur explicatif important des modalités du processus de diffusion concerne les incitations économiques, dans la mesure où les résultats montrent qu'une hausse du taux de subvention à l'équipement en couverture intégrale pour l'irrigation par aspersion a affecté de façon significative la vitesse, et dans une moindre mesure le plafond, de diffusion.

Ces résultats ont d'importantes implications pour les décideurs publics. Premièrement, on a montré que la diffusion d'une innovation incrémentale peu risquée telle que la couverture intégrale pour l'aspersion, qui implique seulement un léger changement des pratiques d'irrigation pour des agriculteurs déjà équipés avec un système d'irrigation par aspersion, suit de façon spontannée un courbe en S. De plus, on a montré qu'une hausse du taux de subvention à l'équipement a apporté les incitations nécessaires pour une adoption plus rapide de la nouvelle technologie plus économe en eau de la part des agriculteurs. Finalement, on a montré que la diffusion technologique a été affectée par des changements non-linéaires du contexte d'adoption des irrigants.

Le modèle de diffusion agrégée développé ne répond cependant pas à plusieurs questions importantes. Pourquoi certains agriculteurs ont adopté l'aspersion en couverture intégrale et d'autres non ? Qu'est-ce qui caractérise les agriculteurs qui décident de

s'équiper à la fois d'une nouvelle technologie d'irrigation et d'outils de pilotage automatique ? Existe-t-il des moyens d'action pour les Pouvoirs Publics permettant de stimuler l'adoption de techniques d'irrigation plus sophistiquées et aussi plus économes en eau ? Les réponses à ces questions sont essentielles du point de vue de la gestion durable des ressources en eau. C'est l'objet du troisième chapitre, où nous développons une approche complémentaire à celle développée dans ce chapitre, en analysant les choix technologiques des agriculteurs à l'échelle d'une exploitation.

Chapitre 3

La sélection individuelle des technologies d'irrigation

3.1 Introduction

Deux composantes majeures caractérisent le comportement d'exploitations agricoles susceptibles d'investir dans une nouvelle technologie d'irrigation. Il existe, d'une part, une composante macroéconomique liée aux interactions sociales, où l'apprentissage (endogène) et le mimétisme sont les facteurs explicatifs des décisions économiques et des choix technologiques. D'autre part, il existe une composante microéconomique liée à la rationalité privée des agriculteurs, où les caractéristiques agronomiques et socio-économiques des exploitations agricoles sont les facteurs explicatifs des décisions économiques et des choix technologiques (Sunding et Zilberman, 2001).

Le poids de chaque composante peut cependant varier selon la complexité et le coût des nouvelles technologies. Le cas des technologies d'irrigation dans le secteur de la canne à sucre irriguée à La Réunion illustre bien cette idée. Au cours du deuxième chapitre, on a en effet montré que les interactions sociales généraient un sentier de diffusion en S de l'aspersion en couverture intégrale, une nouvelle technologie d'irrigation peu complexe et moyennement coûteuse. Par contre, la diffusion de technologies d'irrigation plus sophistiquées comme le goutte-à-goutte et les outils de pilotage automatique, processus crucial pour améliorer durablement l'efficience de l'irrigation, semble mal correspondre aux critères de diffusion épidémiologique. Pour comprendre et expliquer ce processus, une autre approche fondée sur le comportement économique de l'exploitation agricole paraît nécessaire.

Le modèle des choix rationnels d'adoption permet d'analyser le comportement économique et les choix technologiques à l'échelle d'une exploitation agricole. Contrairement au modèle de diffusion épidémiologique considéré comme un modèle de déséquilibre, on suppose que les exploitations agricoles optimisent leur utilité et prennent leurs décisions à l'équilibre. Autrement dit, la courbe de diffusion est reconstruite point par point, et non segment par segment comme dans le modèle de diffusion épidémiologique. La décision individuelle d'adopter ou pas une nouvelle technologie d'irrigation est explicitement modélisée.

En théorie, l'agriculteur représentatif adoptera une nouvelle technologie d'irriga-

tion s'il est *rationnel* d'agir comme cela, i.e. si l'utilité espérée avec l'adoption est supérieure à l'utilité espérée sans l'adoption. En d'autres termes, chaque technologie procure un niveau spécifique de satisfaction qui détermine le choix technologique de l'exploitant agricole. La dynamique de diffusion est le fruit des décisions individuelles des agriculteurs : à chaque instant t donné, le taux d'adoption agrégée d'une nouvelle technologie d'irrigation correspond à une certaine combinaison des choix technologiques individuels.

Dans sa forme complète, l'estimation de ce modèle appliqué au domaine de l'irrigation nécessite l'estimation de la fonction d'efficience de l'irrigation, de la fonction de production, de la fonction de profit, de la fonction d'utilité et de la distribution du risque pour chaque exploitation agricole. Cela nécessite l'accès à de nombreuses données généralement non disponibles en recherche agricole. C'est pourquoi au niveau empirique, de nombreuses études ont estimé une version réduite de ce modèle, mettant en évidence des facteurs tels que le choix d'assolement, le contexte pédo-climatique, le prix de l'eau, le risque, l'information, etc. (Caswell et Zilberman, 1985 ; Shresta et Gopalakrishnan, 1993 ; Green et al., 1996 ; Schuck et al., 2005 ; He et al., 2007).

Plus récemment, quelques applications empiriques ont cherché à incorporer des aspects dynamiques dans l'estimation en focalisant sur des facteurs qui reflètent la structure stochastique de la fonction d'utilité et les coûts irréversibles liés à la décision d'adopter. Le poids de ces facteurs reste néanmoins ambigu et semble dépendre

fortement des coûts fixes d'investissement, du niveau d'incertitude lié à l'utilisation de chaque technologie et des caractéristiques individuelles (Kemp, 1997 ; Carey et Zilberman, 2002 ; Koundouri et al., 2006).

Ce chapitre fournit une contribution empirique originale à cette littérature [1]. Notre jeu de données inclue la possibilité de tester, à l'échelle d'une exploitation agricole, l'effet de plusieurs variables liées aux caractéristiques agronomiques, économiques et sociales des agriculteurs sur le choix d'une technologie d'irrigation donnée. En complément à l'originalité du jeu de données, on estime la probabilité d'adoption d'une nouvelle technologie d'irrigation combinée au choix des outils de pilotage de l'irrigation. Notre analyse diffère des analyses d'adoption traditionnelles en économie de l'irrigation dans la mesure où les caractéristiques des irrigants, les caractéristiques du contexte d'adoption des irrigants et les caractéristiques des nouvelles technologies d'irrigation sont prises en compte simultanément pour expliquer le processus de sélection des technologies d'irrigation par les agriculteurs.

Ce chapitre est organisé ainsi. A la section 2, nous détaillons le cadre conceptuel. La section 3 présente les données utilisées ainsi que la méthode d'estimation des probabilités d'adoption de chaque nouvelle technologie d'irrigation. La section 4 analyse les résultats d'estimation et la section 5 conclut en dégageant quelques recommandations

[1] Ce chapitre est l'approfondissement d'une présentation effectuée aux 25èmes Journées de Microéconomie Appliquée ("Imitation, rationalité et adoption de technologies d'irrigation améliorées à l'île de la Réunion"). Le document de travail issu de cette présentation a été soumis pour publication en mai 2008 (avec J-L. Fusillier).

pour les décideurs publics.

3.2 Cadre conceptuel

Dans cette section, on développe d'abord le modèle lorsque la distribution climatique est connue, puis lorsqu'elle est aléatoire.

3.2.1 Le modèle dans un cadre déterministe

On note j l'indice concernant la technologie d'irrigation avec $j = 0$ pour la technologie obsolète, $j = 1$ pour une amélioration incrémentale de la technologie obsolète et $j = 2$ pour une technologie plus moderne. La décision d'adopter une technologie d'irrigation améliorée est modélisée comme un choix discret. L'agriculteur peut choisir d'adopter une technologie d'irrigation améliorée ($\delta_j = 1$ pour $j = 1$) ou une technologie d'irrigation plus moderne ($\delta_j = 1$ pour $j = 2$).

On suppose que l'agriculteur est en monoculture ; il produit seulement un output q. On note p le prix de l'output, $f\,()$ la fonction de production supposée continue et deux fois différentiable, x_j l'eau consommée par hectare avec la technologie j et w le paramètre correspondant au prix de l'eau d'irrigation, Z^j le vecteur des autres inputs (travail, engrais, etc.) consommés avec la technologie j et r le vecteur correspondant aux prix des autres inputs, et k_j le coût par hectare de la technologie j.

L'eau (input x_j) est supposée être un facteur de production essentiel. On suppose que l'efficience de l'irrigation varie entre les agriculteurs. Cette hypothèse est intégrée au modèle par l'intermédiaire du paramètre $h_j(\alpha)$ dans la fonction de production, α étant un vecteur de caractéristiques de l'agriculteur. La fonction de production peut donc s'écrire $q = f(h_j(\alpha)\, x_j, Z^j)$.

Le problème de choix de technologie d'irrigation auquel est confronté l'agriculteur s'écrit de la façon suivante :

$$\underset{\delta_j, x_j}{\text{Max}} \quad \sum_{j=0}^{2} \delta_j \left[pf\left(h_j(\alpha)\, x_j, Z^j\right) - wx_j - r'Z^j - k_j \right] \tag{3.1}$$

$$s/c \quad \begin{cases} \delta_j \in \{0, 1\} \\ \sum\limits_{j=0}^{2} \delta_j = 1 \end{cases} \tag{3.2}$$

La recherche d'un maximum se déroule en deux étapes. Premièrement, la quantité optimale d'eau (un choix continu) est déterminée conditionnellement à chaque technologie d'irrigation. Ensuite, dans une logique d'induction à rebours, la technologie d'irrigation conduisant au profit le plus élevé est identifiée.

La quantité optimale d'eau est déterminée de la manière suivante :

$$\Pi_j = \underset{x_j}{\text{Max}} \quad pf\left(h_j(\alpha)\, x_j, Z^j\right) - wx_j - r'Z^j - k_j \tag{3.3}$$

La condition du première ordre est :

$$p\frac{\partial f\left(h_j\left(\alpha\right)x_j, Z^j\right)}{\partial x_j} = w \tag{3.4}$$

En d'autres termes, cette condition d'optimisation implique que la profitabilité marginale de l'eau doit être égale au prix de l'eau [2]. Une fois que la deuxième étape, i.e. le problème continu, est résolue, le problème de choix discret de la sélection technologique doit être analysé, en choisissant :

$$\begin{cases} \delta_2 = 1 & \text{si} \quad \Pi_2 > \Pi_0 \ \text{ et } \ \Pi_2 > \Pi_1 \\ \delta_1 = 1 & \text{si} \quad \Pi_1 > \Pi_0 \ \text{ et } \ \Pi_1 > \Pi_2 \\ \delta_2 = \delta_1 = 0 & \text{sinon} \end{cases} \tag{3.5}$$

La condition de choix d'une technologie plus moderne ($\delta_j = 1$ si $j = 2$) vérifie donc les deux inégalités suivantes :

$$\begin{cases} p\left(f_2 - f_1\right) - w\left(x_2 - x_1\right) - r'\left(Z^2 - Z^1\right) - \left(k_2 - k_1\right) > 0 \\ p\left(f_2 - f_0\right) - w\left(x_2 - x_0\right) - r'\left(Z^2 - Z^0\right) - \left(k_2 - k_0\right) > 0 \end{cases} \tag{3.6}$$

Ce modèle génère des hypothèses testables empiriquement. En particulier, si on suppose que α reflète seulement la qualité du sol des exploitations, il existerait une valeur seuil de α au delà de laquelle la technologie d'irrigation améliorée devient plus rentable que la technologie d'irrigation plus sophistiquée car $\frac{d(\Pi_2 - \Pi_1)}{d\alpha} < 0$ (Sunding, 2002).

[2] On suppose w constant.

3.2.2 Le modèle dans un cadre incertain

A présent, on suppose que les agriculteurs ont une fonction d'utilité de Von Neuman-Morgenstern U qui reflète leurs préférences, U_j représentant l'utilité de l'agriculteur avec la technologie j. On intègre ε, une variable aléatoire représentant le risque climatique, dans la fonction de production. Dans ce contexte, le besoin en eau est incertain et la profitabilité d'une amélioration de l'efficience d'irrigation est incertaine. La distribution du risque, $G()$, est supposée exogène aux actions des agriculteurs (Koundouri et al., 2006).

Le problème de choix de technologie d'irrigation auquel est confronté l'agriculteur s'écrit de la façon suivante :

$$\underset{\delta_j, x_j}{\text{Max}} \sum_{j=0}^{2} \delta_j \int \left[U\left(pf\left(h_j\left(\alpha\right) x_j, Z^j, \varepsilon \right) - wx_j - r'Z^j - k_j \right) \right] dG\left(\varepsilon\right) \tag{3.7}$$

$$s/c \quad \begin{cases} \delta_j \in \{0,1\} \\ \sum\limits_{j=0}^{2} \delta_j = 1 \end{cases} \tag{3.8}$$

Comme dans le cas du modèle dans un cadre déterministe, la recherche d'un maximum se déroule en deux étapes. Premièrement, la quantité optimale d'eau est déterminée conditionnellement à chaque technologie d'irrigation. Ensuite la technologie d'irrigation conduisant au profit le plus élevé est identifiée.

La quantité optimale d'eau est déterminée de la manière suivante :

$$E\left(U^j\right) = \underset{x_j}{\text{Max}} \int \left[U\left(pf\left(h_j\left(\alpha\right)x_j, Z^j, \varepsilon\right) - wx_j - r'Z^j - k_j\right)\right] dG\left(\varepsilon\right) \tag{3.9}$$

La condition du premier ordre est :

$$p\left(E\left[\frac{\partial f\left(h_j\left(\alpha\right)x_j, Z^j, \varepsilon\right)}{\partial x_j}\right] + \frac{\text{cov}\left(U', \partial f\left(h_j\left(\alpha\right)x_j, Z^j, \varepsilon\right)/\partial x_j\right)}{E\left(U'\right)}\right) = w \tag{3.10}$$

En d'autres termes, cette condition d'optimisation implique que l'utilité marginale espérée de l'eau doit être égale au prix de l'eau. Plus précisément, le terme $\text{cov}\left(U', \partial f\left(h_j\left(\alpha\right)x_j, Z^j, \varepsilon\right)/\partial x_j\right)/E\left(U'\right)$ reflète les préférences de l'agriculteur face au risque. Si l'agriculteur est neutre au risque, ce terme est nul et la condition d'optimisation implique que la profitabilité marginale espérée de l'eau doit être égale au prix de l'eau comme dans le cas déterministe. Si l'agriculteur est averse au risque, ce terme est différent de zéro ; il est proportionnel et de signe opposé à la prime marginale de risque (Koundouri et al., 2006). De plus, comme $\partial^2 f/(\partial\varepsilon\partial x_j) < 0$, plus l'irrigant est averse au risque, plus sa consommation d'eau à l'équilibre est élevée.

Ensuite la technologie d'irrigation conduisant à l'espérance d'utilité la plus élevée est identifiée :

$$\begin{cases} \delta_2 = 1 & \text{si} \quad E(U_2) > E(U_0) \;\text{ et }\; E(U_2) > E(U_1) \\ \delta_1 = 1 & \text{si} \quad E(U_1) > E(U_0) \;\text{ et }\; E(U_1) > E(U_2) \\ \delta_2 = \delta_1 = 0 & \text{sinon} \end{cases} \tag{3.11}$$

On suppose aussi que les profits futurs après adoption sont incertains. Autrement dit, l'achat d'une nouvelle technologie d'irrigation implique un coût fixe d'investissement et une valeur d'option (des "fonds perdus") liée à une certaine irréversibilité dans la décision d'adopter. Dans ce contexte, il peut exister une valeur positive de l'information et les agriculteurs peuvent préférer retarder l'adoption d'une nouvelle technologie d'irrigation afin d'obtenir plus d'informations sur les nouveaux équipements (Dixit et Pindyck, 1994 ; Carey et Zilberman, 2002 ; Koundouri et al., 2006). L'agriculteur choisira d'adopter la nouvelle technologie d'irrigation si l'utilité espérée avec l'adoption est supérieure à la somme de l'utilité espérée sans l'adoption et d'une prime additionnelle V_j pour $j = 1, 2$:

$$\begin{cases} \delta_2 = 1 & \text{si} \quad E(U_2) - V_2 > E(U_0) \;\text{ et }\; E(U_2) - V_2 > E(U_1) - V_1 \\ \delta_1 = 1 & \text{si} \quad E(U_1) - V_1 > E(U_0) \;\text{ et }\; E(U_1) - V_1 > E(U_2) - V_2 \\ \delta_2 = \delta_1 = 0 & \text{sinon} \end{cases} \tag{3.12}$$

La prime V_j représente la valeur de l'information et devrait dépendre des coûts fixes d'investissement, du niveau d'incertitude rattaché à l'utilisation de la nouvelle

technologie et des caractéristiques des agriculteurs. La condition de choix d'une nouvelle technologie ($\delta_j = 1$ si $j = 2$) peut finalement s'écrire :

$$\begin{cases} E(U_2) - E(U_0) > V_2 \\ E(U_2) - E(U_1) > V_2 - V_1 \end{cases} \tag{3.13}$$

Malgré l'importance donnée aux variations microéconomiques dans la littérature théorique, la plupart des études empiriques sur l'adoption d'innovations par les agriculteurs souffre de l'utilisation de données agrégées sur les choix technologiques, généralement à l'échelle d'une région, et cherche à comparer les pourcentages d'adoption entre les différentes zones. Peu d'études empiriques ont en fait été capables d'analyser la sélection technologique par une exploitation agricole avec des variables microéconomiques.

3.3 Stratégie d'estimation

Dans cette section, on présente d'abord les variables utilisées pour l'approche empirique, puis on développe la stratégie économétrique adéquate pour estimer les probabilités individuelles d'adoption des nouvelles technologies d'irrigation.

3.3.1 Les variables utilisées

Les données utilisées dans ce chapitre concernent la campagne 2005-2006 et l'échantillon est constitué de 87 exploitants agricoles spécialisés dans la culture de la canne

à sucre à l'île de la Réunion (i.e. cultivant de la canne à sucre sur plus de 75 % de leur surface agricole utilisable). L'échantillon a pu être construit grâce à des entretiens semi-directifs réalisés aux cours de l'enquête de 2006 (voir annexe A).

Pour l'estimation, nous retenons six variables indépendantes : deux quantitatives (surface par actif et besoin en eau) et quatre qualitatives ordonnées (intensification, diversification, autre activité et association). La variable dépendante tient compte du choix combiné, que l'on suppose simultané, de matériel d'irrigation (aspersion en couverture intégrale ou goutte-à-goutte) et d'outils de pilotage de l'irrigation (vannes manuelles ou automatiques). Le système d'aspersion en couverture totale (voire mobile dans quelques cas isolés) avec vannes manuelles est utilisé comme la technologie standard de référence pour cultiver la canne à sucre.

Le modèle est appliqué aux périmètres irrigués mitoyens du Bras de la Plaine et du Bras de Cilaos, situés au sud ouest de l'île de la Réunion. Pour des raisons historiques et structurelles, les agriculteurs sur ces périmètres participent tous au marché administré (i.e. avec des prix garantis) de la canne à sucre. Il y a eu sur ces périmètres un nombre considérable d'adoption de nouvelles technologies d'irrigation au cours de la dernière décennie, puisqu'au moment de l'enquête (fin 2006), 39 % des exploitations étaient équipées d'aspersion en couverture intégrale avec des vannes manuelles et 39 % des exploitations étaient équipés d'une nouvelle technologie d'irrigation (aspersion en couverture intégrale ou plus rarement goutte-à-goutte) avec des vannes automatiques.

Le tableau (3.1) montre l'intérêt d'estimer la probabilité jointe matériel d'irrigation - outils de pilotage de l'irrigation. Il semble que le choix des automatismes soit l'élément essentiel permettant d'améliorer durablement l'efficience de l'irrigation puisque le choix de vannes automatiques réduit fortement l'écart relatif au besoin eau (i.e. le rapport (Conso − Besoin)/Besoin, avec le besoin en eau pondéré de l'efficience intrinsèque du matériel d'irrigation détenu par l'agriculteur), dont la moyenne tend plus fortement vers zéro (0.02) que dans le cas d'une nouvelle technologie d'irrigation sans automatismes (0.12). Le choix des outils de pilotage de l'irrigation semble être aussi un élément important pour définir la complexité des différentes technologies d'irrigation puisque le tour d'eau moyen associé à une nouvelle technologie d'irrigation avec automatismes est inférieur à 4 jours (avec un écart-type inférieur à 3), incitant les agriculteurs à modifier considérablement leurs pratiques.

Tab. 3.1: Caractéristiques des technologies d'irrigation

		Obsolète	Améliorée sans auto.	Améliorée avec auto.
Tour d'eau	Moyenne	11.9	7.7	3.9
	Ecart-type	4.3	5.0	2.9
Ecart au besoin en eau	Moyenne	0.18	0.12	0.02
	Ecart-type	0.65	0.44	0.46
Proportion (n=88)		24 %	39 %	37 %

Source : CIRAD et enquête personnelle

Afin de tenir compte simultanément des caractéristiques des adopteurs potentiels et de leur contexte d'adoption, trois variables indépendantes sont rattachées aux caractéristiques des agriculteurs (ou de leurs exploitations) et trois autres sont rattachées au contexte d'adoption des agriculteurs. Parmi les variables rattachées aux caractéristiques des agriculteurs, une variable est quantitative (continue) et deux variables sont qualitatives (discrètes).

La variable quantitative concerne le ratio entre la surface totale de l'exploitation (en hectares) et le nombre de travailleurs actifs au sein de l'exploitation. Cette variable reflète les économies de main d'œuvre réalisables grâce à l'adoption technologique. Elle peut aussi refléter la capacité des agriculteurs à financer les investissements. D'après le tableau (3.2), on constate que plus la technologie d'irrigation utilisée est complexe, plus la moyenne du ratio surface par actif est important.

Les deux variables qualitatives concernent l'objectif de productivité en canne à sucre des agriculteurs (intensification) et le degré de diversification, en parallèle à la culture de la canne à sucre, décidée par les agriculteurs (diversification). L'intensification et la diversification sont des variables discrètes pouvant prendre chacune trois modalités : peu intensif (< à 80 tonnes/ha/an), intensif (de 80 à 100 tonnes/ha/an) ou très intensif (plus de 100 tonnes/hectare/an) ainsi que pas diversifié (aucune culture autre que la canne à sucre), diversifié (une culture en complément à la canne à sucre), très diversifié (plus d'une culture en complément à la canne à sucre). D'après le ta-

TAB. 3.2: Caractéristiques des irrigants

Variable		Obsolète	Améliorée sans auto.	Améliorée avec auto.
Surface par actif (ha)	Moyenne	4.43	6.15	8.02
	Ecart-type	2.10	3.26	4.24
Intensification	1	3 %	2 %	0 %
	2	17 %	20 %	21 %
	3	3 %	17 %	17 %
Diversification	1	22 %	26 %	17 %
	2	1 %	5 %	6 %
	3	1 %	8 %	14 %

Source : CIRAD et enquête personnelle

bleau (3.2), on constate que l'adoption d'une nouvelle technologie d'irrigation semble dépendre d'un objectif de productivité en canne plus intensif. Ceci est vrai à la fois pour une nouvelle technologie d'irrigation sans automatismes ou avec automatismes. On constate aussi que plus la technologie d'irrigation utilisée est complexe, plus le degré de diversification est important.

Parmi les variables rattachées aux caractéristiques du contexte d'adoption des agriculteurs, une variable est quantitative et deux variables sont qualitatives.

La variable quantitative concerne le besoin net de la culture de canne en m^3/ha/an, calculé par un modèle de bilan hydrique suite au découpage des périmètres irrigués en 24 micro-zones aux conditions pédo-climatiques homogènes (Chopart & al., 2006,

cf. Annexe A), non pondéré de l'efficience intrinsèque du matériel et pour un tour d'eau moyen de huit jours. Cette variable reflète plusieurs facteurs. Elle reflète d'une part le contexte pédo-climatique de l'exploitation. D'autre part, elle pourrait refléter l'intensité de l'appui-conseil aux irrigants, surtout destiné aux agriculteurs situés dans les zones les plus sèches des périmètres irrigués. Enfin, elle pourrait refléter l'exposition au risque des irrigants, le risque pesant sur la production étant plus important dans les zones les plus sèches des périmètres irrigués car il intervient surtout en cas de restrictions (coupures d'eau). Notons finalement, à la lecture du tableau (3.3) qu'il se pourrait que certaines micro-zones brouillent l'effet associé au besoin en eau sur les choix technologiques des irrigants. Une tâche empirique consistera à détecter ces micro-zones.

TAB. 3.3: Caractéristiques du contexte d'adoption des irrigants

Variable		Obsolète	Améliorée sans auto.	Améliorée avec auto.
Besoin en eau (m^3/ha/an)	Moyenne	6521	6440	6234
	Ecart-type	755	748	825
Autre activité	0	22 %	21 %	28 %
	1	2 %	18 %	9 %
Association	0	18 %	28 %	21 %
	1	6 %	11 %	16 %

Source : CIRAD et enquête personnelle

Les deux variables qualitatives concernent le contexte économique et le contexte

social de l'agriculteur. Le contexte économique est appréhendé par une variable discrète pouvant prendre deux modalités : pas de revenu extérieur à l'agriculture pour l'exploitant agricole ou bénéfice d'un revenu extérieur grâce à l'exercice d'une activité non agricole rémunérée ou grâce au revenu du conjoint s'il ne travaille pas déjà au sein de l'exploitation (la pluriactivité de l'exploitant ou de son conjoint). Le contexte social est appréhendé par une variable discrète pouvant prendre deux modalités : pas d'implication dans les associations d'irrigants ou membre d'une association d'irrigants (il en existe deux principales à La Réunion). Cette variable pourrait refléter le degré d'information des agriculteurs et leur engagement dans des actions collectives. D'après le tableau (3.3), on constate que l'adoption d'une nouvelle technologie d'irrigation semble associée au bénéfice d'un revenu extérieur. Ceci est surtout vrai pour l'adoption de l'aspersion en couverture intégrale sans automatismes. D'après le tableau (3.3), on constate aussi que plus la technologie d'irrigation utilisée est complexe, plus l'implication dans le réseau associatif est important.

On peut finalement dégager un profil d'irrigants par stratégie en matière de technologies d'irrigation :

- Les agriculteurs encore équipés en aspersion en couverture totale (ou mobile) avec des vannes manuelles affichent une consommation en eau éloignée du besoin en eau. Ils semblent installés sur des petites surfaces, sont très peu diversifiés, ne bénéficient généralement pas de revenu extérieur à l'agriculture et ne sont pas impliqués dans le réseau associatif ;

- Les agriculteurs ayant fait le choix de s'équiper d'un système d'irrigation par aspersion en couverture intégrale avec des vannes manuelles affichent une consommation en eau assez éloignée du besoin en eau. Ils semblent avoir un objectif de productivité en canne assez intensif, sont peu diversifiés et bénéficient généralement d'un revenu extérieur à l'agriculture ;
- Les agriculteurs ayant fait le choix de s'équiper d'une nouvelle technologie d'irrigation avec des vannes automatiques sont ceux qui semblent valoriser le mieux la ressource en eau. Ils sont installés sur de plus grandes surfaces, semblent avoir un objectif de productivité en canne assez intensif et sont généralement diversifiés ainsi qu'impliqués dans le réseau associatif.

3.3.2 La procédure d'estimation

Le modèle des choix rationnels d'adoption que nous appliquons empiriquement est le modèle logit multinomial à modalités non ordonnées. Nous cherchons à expliquer pourquoi l'adoption d'une technologie d'irrigation améliorée intervient ou pas chez les agriculteurs. Autrement dit, nous cherchons à calculer la probabilité qu'un tel événement se produise. Le modèle à estimer est donné par l'équation (3.12). Nous estimons une version réduite de ce modèle, en nous focalisant sur des facteurs liés aux caractéristiques agro-économiques et sociales des irrigants.

Dans cette partie, on justifie d'abord la spécification retenue pour notre modèle, puis on présente la stratégie d'estimation des déterminants du choix individuel d'adop-

tion technologique par un agriculteur représentatif et enfin on discute des méthodes de calcul des élasticités et des probabilités d'adoption agrégée.

3.3.2.1 La spécification du modèle

Dans notre modèle, on suppose que la variable à expliquer (l'adoption d'une technologie d'irrigation améliorée donnée) peut prendre trois modalités : pas d'adoption (toujours en couverture mobile ou totale), adoption de couverture intégrale sans automatismes, adoption d'une technologie d'irrigation améliorée (couverture intégrale ou goutte-à-goutte) avec automatismes.

De plus, nous ne donnons pas de hiérarchie entre chaque modalité. Les modalités possibles de la variable dépendante ne sont le reflet d'aucun classement ou d'aucune hiérarchie sous-jacente ; l'ordre dans lequel sont rangées les différentes occurences de la variable à expliquer est sans importance et ne doit pas affecter le calcul des probabilités de ces occurences. Dans ce contexte, nous suivons une approche en terme de fonction d'utilité : on suppose que chaque type de matériel induit pour l'agriculteur un niveau de satisfaction qui détermine le choix de cet agriculteur. L'agriculteur i choisit la modalité j si :

$$U_{ij} = \text{Max}\left\{U_{i0}, U_{i1}, ..., U_{iJ}\right\} \tag{3.14}$$

où U_{ij} représente l'utilité de l'agriculteur i avec la modalité j. On suppose que l'utilité que retire un agriculteur i de la modalité j n'est pas la même que celle que

retirerait un autre agriculteur i' de cette même modalité : cette utilité [3] est susceptible de varier en fonction de caractéristiques x_i propres à chaque agriculteur telles que la capacité à couvrir les coûts fixes, la capacité à valoriser le facteur le plus limitant sur l'exploitation (notamment le travail pour les grandes exploitations), le degré d'incertitude sur les résultats (lié aux connaissances des irrigants), l'aversion au risque des irrigants, etc. Le paramètre β_j représente les caractéristiques spécifiques à la modalité j (les coefficients β_j peuvent varier entre les différentes modalités) mais communes à tous les agriculteurs et ε_{ij} un terme d'erreur pour l'agriculteur i avec la modalité j. Le modèle empirique que nous estimons prend la forme générale suivante :

$$U_{ij} = \beta_j x_i + \varepsilon_{ij} \tag{3.15}$$

Dans sa forme complète, le modèle empirique que nous estimons prend la forme suivante :

$$U_{ij} = \beta_{1j} + \beta_{2j} S_i + (\beta_{3j} + \beta_{3'j} Z_1 + \beta_{3''j} Z_2)\, B_i + \beta_{4j} I_i + \beta_{5j} D_i + \beta_{6j} R_i + \beta_{7j} A_i + \varepsilon_{ij} \tag{3.16}$$

où la variable quantitative S_i représente le ratio surface par actif de l'agriculteur i, la variable quantitative B_i reflète le besoin en eau de l'agriculteur i, les variables binaires Z_1 et Z_2 sont deux dummies concernant deux micro-zones où l'effet du besoin en eau sur le choix technologique semble contraire au reste des périmètres irrigués [4],

[3] Qui peut aussi être assimilée à une profitabilité.

[4] Ces deux micro-zones ont été identifiées grâce à un test économétrique. On a d'abord estimé

la variable qualitative I_i reflète l'objectif de productivité de l'agriculteur i, la variable qualitative D_i reflète le choix de diversification de l'agriculteur i, la variable binaire R_i reflète le bénéfice d'un revenu extérieur à l'agriculture pour l'agriculteur i et la variable binaire A_i reflète l'implication de l'agriculteur i dans le réseau social.

3.3.2.2 L'estimation des déterminants du choix individuel d'adoption technologique

Comme les méthodes linéaires donnent des probabilités qui pourraient être inférieures à 0 ou supérieures à 1 et des problèmes d'hétéroscédasticité sur les termes d'erreur, nous devons utiliser une méthode non linéaire. Il est de plus nécessaire, dans le cas du modèle logit multinomial, de supposer que les termes d'erreur sont des variables aléatoires indépendantes et identiquement distribuées selon une loi de Weibull (Domencich et McFadden, 1975). Dès lors, en prenant la précaution de normaliser β_0 à 0, la probabilité que la satisfaction (ou l'utilité) de l'agriculteur i soit maximisée lorsqu'il choisit la modalité j (ie. la probabilité pour qu'il choisisse effectivement la modalité j) s'écrit :

$$P_{ij} = \frac{e^{\beta'_j x_i}}{1 + \sum_{k=1}^{J} e^{\beta'_k x_i}} \quad \text{pour } j = 1, 2, ..., J \tag{3.17}$$

le modèle sans tenir compte des deux deux micro-zones, i.e. on a d'abord estimé le modèle $U_{ij} = \beta_{1j} + \beta_{2j} S_i + \beta_{3j} B_i + \beta_{4j} I_i + \beta_{5j} D_i + \beta_{6j} R_i + \beta_{7j} A_i + \varepsilon_{ij}$ où on a constaté des résultats ambigus (signe négatif, non significatif) concernant le paramètre β_{3j}. On a alors cherché à identifier, en utilisant la spécification décrite par l'équation (3.16), les micro-zones susceptibles de troubler les résultats. On a finalement retenu deux micro-zones : Pierrefonds et une zone englobant Bassin Martin et Bassin Plat.

De plus, la probabilité que la satisfaction de l'agriculteur i soit maximisée lorsqu'il choisit le statu quo (i.e. la probabilité pour qu'il choisisse effectivement de conserver sa technologie d'irrigation traditionnelle) :

$$P_{i0} = \frac{1}{1 + \sum_{k=1}^{J} e^{\beta'_k x_i}} \tag{3.18}$$

On occultera par la suite, pour des raisons de commodité, le signe prime qui affecte les différents coefficients. Il est important de noter, cependant, que chaque coefficient β_{mj} (le coefficient relatif à la m-ième variable explicative et à la j-ième technologie) doit être interprété comme représentatif des conséquences d'une modification unitaire de x_{mi} sur la probabilité que le choix de l'agriculteur i se porte sur la modalité j plutôt que sur la modalité 0.

Autrement dit, si β_{mj} est positif, tout accroissement de x_{mi} contribue à rendre plus probable le choix de la modalité j par rapport à celui de la modalité 0 pour l'agriculteur i :

$$\ln\left[\frac{P_{ij}}{P_{i0}}\right] = \beta_j x_i \tag{3.19}$$

La Log Vraisemblance de l'échantillon d'estimation s'écrit de la façon suivante (Greene, 2000) :

$$\ln L = \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=0}^{J} \delta_{ij} \ln P_{ij} \tag{3.20}$$

avec $\ln P_{ij} = \beta_j x_i - \ln \left(1 + \sum_{k=1}^{J} e^{\beta_k x_i} \right)$. Les coefficients β_j sont obtenus par maximisation de la Log Vraisemblance de l'échantillon d'estimation :

$$\underset{\beta_1,...,\beta_J}{\text{Max}} \quad \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=0}^{J} \delta_{ij} \ln P_{ij} \tag{3.21}$$

où il est utile de rappeler que $\delta_{ij} = 1$ si, *de facto*, l'agriculteur i choisit la modalité j et $\delta_{ij} = 0$ sinon. La condition du premier ordre est :

$$\frac{\partial \ln L}{\partial \beta_j} = \sum_{i=1}^{n} \left[\delta_{ij} - P_{ij} \right] x_i \quad \text{pour } j = 1, ..., J \tag{3.22}$$

Ces conditions du premier ordre n'admettent pas de solution explicite. Pour calculer l'estimation des coefficients β_j, la procédure d'itération de Newton est utilisée [5]. Le logiciel R est utilisé pour programmer l'estimation.

3.3.2.3 Le calcul des élasticités et des probabilités d'adoption agrégée

Munis des estimations des différents coefficients, on peut calculer l'effet marginal d'une variation de x_m sur la probabilité que l'agriculteur choisisse la technologie j (plutôt que 0) :

[5] Voir Greene (2000), pp 860-861.

$$\frac{\partial P_j}{\partial x_m} = P_j \left[\beta_j - \sum_{k=0}^{J} P_k \beta_k \right] \tag{3.23}$$

ou l'élasticité de ce choix par rapport à x_m :

$$\frac{\partial P_j}{\partial x_m} \frac{x_m}{P_j} = x_m \left[\beta_j - \sum_{k=0}^{J} P_k \beta_k \right] \tag{3.24}$$

On note que les valeurs de l'effet marginal comme de l'élasticité dépendent du point à partir duquel on les mesure. Pour cette raison, on les calcule ici au point moyen.

Cela est aussi valable pour l'agrégation des probabilités individuelles. On propose de les calculer de deux façons différentes. Tout d'abord au point moyen :

$$\Gamma_j = \frac{e^{\beta'_j \bar{x}}}{1 + \sum\limits_{k=1}^{J} e^{\beta'_k \bar{x}}} \quad \text{pour } j = 1, ..., J \tag{3.25}$$

puis comme la moyenne des probabilités individuelles estimées :

$$\Gamma'_j = \frac{\sum\limits_{i=1}^{n} P_{ij}}{n} \quad \text{pour } j = 1, ..., J \tag{3.26}$$

3.4 Résultats d'estimation

Dans cette section, on analyse d'abord les résultats généraux de l'estimation du modèle puis on évalue précisément le rôle des différents facteurs-clés identifiés. Cela

nous permet, dans un premier temps, de caractériser le seuil d'adoption des différentes nouvelles tehnologies d'irrigation étudiées, puis dans un deuxième temps, de discuter du rôle des principaux facteurs d'adoption.

3.4.1 Les caractéristiques du seuil d'adoption

Pour évaluer les qualités explicative et prédictive du modèle, des indicateurs fondés sur les vraisemblances (plutôt que sur le carré des résidus) sont privilégiés. A la statistique de Fisher pour l'hypothèses nulle $\beta_m = 0 \ \ \forall m > 1$ on substitue un ratio de Log Vraisemblance : LR $= 2\,(\ln L_{UR} - \ln L_R)$, où L_{UR} et L_R sont les vraisemblances des modèles, respectivement, non contraint et contraint. Sous H_0, le ratio de Log Vraisemblance est réputé obéir à une loi du Chi-deux à $l - 2$ degrés de liberté, où l est le nombre de paramètres estimés (Amemiya, 1981). Au R^2 traditionnel on préfèrera le R^2 de McFadden : $1 - [(\ln L_{UR})/(\ln L_R)]$. Enfin, le pourcentage de prédictions correctes est calculé comme le nombre total de prédictions correctes (i.e. on évalue la prédiction pour chaque observation de l'échantillon) divisé par le nombre total d'observations.

Chacune de ces mesures, reportées dans le tableau (3.4), apportent la preuve que le modèle estimé possède un bon pouvoir explicatif et prédictif. Le ratio de Log Vraisemblance calculé, égal à 51.4, est supérieur à la valeur théorique du Chi-deux à 16 degrés de liberté, égal à 34.27. Etant donnée la valeur de la Log Vraisemblance du modèle estimé, cela nous permet de conclure que les coefficients estimés, excepté la constante, sont différents de zéro de façon significative pour un niveau de significati-

vité de 1 %.

Tab. 3.4: Résultats du modèle logit multinomial pour le choix d'une nouvelle technologie d'irrigation

Variable	Améliorée sans auto.	Améliorée avec auto.
Constante	-18.4371**	-17.7044**
	(-2.77)	(-2.65)
Surface par actif	0.3096	0.4179**
	(1.90)	(2.57)
Besoin en eau	0.0016*	0.0013
	(2.16)	(1.66)
Dummy 1	-0.0003	-0.0005*
	(-1.67)	(-2.29)
Dummy 2	0.0005	0.0006*
	(1.74)	(2.03)
Intensification	1.7095*	1.6754*
	(2.25)	(2.17)
Diversification	1.6808*	2.3601**
	(2.19)	(3.03)
Autre activité	3.1843**	1.9777
	(2.72)	(1.57)
Association	1.2280	1.7552*
	(1.44)	(1.96)
Log Vraisemblance	68.1	
Test du ratio de $\ln L$: χ^2_{16}	51.4	
R^2 de McFadden	0.27	
Proportion de prédictions correctes :	68 % (59/87)	

** significatif à 1 %, * significatif à 5 %, statistique de student entre parenthèses.

Le R^2 de McFadden calculé, égal à 0.27, est conforme aux valeurs trouvées dans la

littérature (Caswell et Zilberman, 1985 ; Sunding et Zilberman, 2001). Enfin, le modèle prédit correctement le choix de technologie d'irrigation de 59 agriculteurs sur 87, soit un pourcentage de prédictions correctes égal à 68 %. Les valeurs de ces indicateurs sont des résultats raisonnables au regard de la taille de l'échantillon et compte tenu du fait que l'analyse porte sur des données en coupe.

D'après le tableau (3.4), le signe de chaque coefficient estimé semble cohérent. Les résultats montrent que la probabilité d'adoption d'une nouvelle technologie d'irrigation, sans ou avec automatismes, s'accroît à mesure qu'augmente le rapport surface par actif, le besoin en eau, l'objectif de productivité ou le degré de diversification. Cette probabilité augmente aussi si l'agriculteur bénéficie d'un revenu extérieur à l'agriculture ou s'il est impliqué dans le réseau associatif. Les statistiques de student montrent que tous les coefficients sont significatifs pour un degré de significativité d'au moins 15 %. Parmi les facteurs qui affectent principalement le choix d'une nouvelle technologie d'irrigation sans automatismes, on note le bénéfice d'un revenu extérieur à l'agriculture, significatif à 1 %, ainsi que le besoin en eau, l'objectif de productivité en canne à sucre (intensification) et le degré de diversification, significatifs à 5 %. Parmi les facteurs qui affectent principalement le choix d'une nouvelle technologie d'irrigation avec automatismes, on recense le rapport surface par actif et le degré de diversification, significatifs à 1 %, ainsi que l'objectif de productivité en canne à sucre et l'implication dans le réseau associatif, significatifs à 5 %.

Deux zones où l'effet du besoin en eau sur le choix de technologie d'irrigation contraste avec l'effet total associé au besoin en eau ont été détectées. La première concerne Pierrefonds, micro-zone située dans les bas avec un fort besoin en eau et un sol très pierreux. Dans cette micro-zone, il se pourrait que des facteurs tels que le risque de déclassement des terrains agricoles ainsi que le risque de vol des nouveaux matériels contraignent fortement l'adoption d'une nouvelle technologie d'irrigation. Les coefficients associés à cette dummy sont négatifs et ce facteur affecte principalement le choix d'une nouvelle technologie avec automatismes, significatif à 5 %.

La seconde zone où l'effet du besoin en eau sur le choix de technologie d'irrigation contraste avec l'effet total associé au besoin en eau concerne les micro-zones limitrophes de Bassin Martin et Bassin Plat, où le besoin en eau est relativement faible comparé aux autres micro-zones (cf. Annexe A). Dans cette micro-zone, il se pourrait que le renouvellement des générations d'exploitants agricoles ainsi que le fort appui-conseil à l'irrigation incitent à l'adoption des nouvelles technologies d'irrigation. Les coefficients associés à cette variable sont positifs et ce facteur affecte principalement le choix d'une nouvelle technologie d'irrigation avec automatismes, significatif à 5 %. Ces facteurs de localisation très significatifs montrent l'existence d'effets de proximité. Ils suggèrent une limite des logiques individuelles et un retour à l'imitation. Ils suggèrent aussi des actions localisées de conseil.

3.4.2 Le rôle des principaux facteurs d'adoption

Dans le cas du modèle linéaire, le coefficient β_{mj} peut être interprété comme l'effet d'une variation unitaire de x_{mi} sur P_{ij}. Avec les modèles non linéaires, il en va différemment. Afin de mesurer les conséquences d'une variation de x_{mi} sur P_{ij}, on propose deux mesures. On calcule, d'une part, les effets marginaux des variables discrètes donnés par l'équation (3.23). Cette mesure reflète la variation de la probabilité d'adoption d'une nouvelle technologie d'irrigation donnée en réponse à une variation unitaire de chaque variable discrète. Pour les facteurs quantitatifs, l'inconvénient majeur de cette mesure concerne sa sensibilité à l'échelle dans laquelle est exprimée la variable x_m. On calcule donc, d'autre part, les élasticités des variables continues données par l'équation (3.24). Cette mesure reflète le taux de variation de la probabilité d'adoption d'une nouvelle technologie d'irrigation donnée en réponse à une variation de 1 % de chaque variable continue.

D'après le tableau (3.5), les probabilités d'adoption d'une nouvelle technologie sans ou avec automatismes apparaîssent très sensibles au besoin en eau. Plus particulièrement, la probabilité d'adoption d'une nouvelle technologie d'irrigation sans automatismes apparaît très sensible au besoin en eau ainsi qu'à la pluriactivité des agriculteurs. De plus, la probabilité d'adoption d'une nouvelle technologie d'irrigation avec automatismes apparaît particulièrement sensible au besoin en eau ainsi qu'au rapport surface par actif, au degré de diversification et à l'implication dans le réseau associatif.

Notons finalement que la différence de significativité statistique entre chaque coefficient estimé donné par le tableau (3.4) nous conduit à relativiser les points suivants du tableau (3.5) : la moindre importance de l'élasticité du besoin en eau sur la probabilité d'adoption d'une technologie d'irrigation améliorée avec automatismes par rapport à la couverture intégrale sans automatismes, le faible effet marginal de l'implication dans le réseau associatif sur la probabilité d'adoption de la couverture intégrale sans automatismes ainsi que la faible élasticité du rapport surface par actif sur la probabilité d'adoption d'une technologie d'irrigation améliorée avec automatismes.

Tab. 3.5: Elasticités, effets marginaux et probabilités agrégées

Variable	Améliorée sans auto.		Améliorée avec auto.	
	Elasticité	Effet marginal	Elasticité	Effet marginal
Surface par actif	0.1878		0.8834	
Besoin en eau	3.4126		1.3212	
Intensification		0.1399		0.1734
Diversification		0.0383		0.3455
Autre activité		0.4195		0.0424
Association		0.0237		0.2600
Probabilité agrégée[a]		0.42		0.51
Probabilité agrégée[b]		0.32		0.43

[a] Calculé à la valeur moyenne de chaque variable explicative.
[b] Moyenne des probabilités individuelles.

Les résultats de deux méthodes d'agrégation des probabilités individuelles d'adop-

tion sont aussi présentées dans le tableau (3.5). Chaque méthode utilisée propose des valeurs relativement proches des valeurs réelles (39 % d'agriculteurs équipés d'un système d'aspersion en couverture intégrale avec vannes manuelles et 37 % d'agriculteurs équipés d'une nouvelle technologie d'irrigation avec automatismes).

La première méthode d'agrégation, donnée par l'équation (3.24) consiste à calculer les probabilités d'adoption de chaque nouvelle technologie d'irrigation à la valeur moyenne de chaque variable explicative. On constate que cette méthode sous-estime très légèrement (différentiel de 3 % entre la valeur réelle et la valeur estimée) la probabilité d'adoption d'une nouvelle technologie d'irrigation sans automatismes et sur-estime assez fortement (différentiel de 14 %) la probabilité d'adoption d'une nouvelle technologie d'irrigation avec automatismes.

La deuxième méthode d'agrégation, donnée par l'équation (3.25), consiste à calculer la moyenne des probabilités individuelles d'adoption. On constate que cette méthode sous-estime légèrement (différentiel de 6 %) la probabilité d'adoption d'une nouvelle technologie d'irrigation sans automatismes et sur-estime légèrement (différentiel de 6 %) la probabilité d'adoption d'une nouvelle technologie d'irrigation avec automatismes. La différence des valeurs des probabilités entre chaque méthode utilisée pose la question épineuse de la meilleure méthode à utiliser pour agréger les préférences individuelles. A la lecture de ces résultats, il semblerait préférable de calculer la moyenne des probabilités individuelles. Cette méthode pourrait permettre de mieux

tenir compte de l'hétérogénéité des comportements individuels.

3.4.2.1 Les facteurs économiques

On détaille à présent le rôle de chaque variable explicative sur les probabilités d'adoption de chaque technologie d'irrigation, y compris la technologie d'irrigation de référence pour notre étude (l'aspersion en couverture totale ou mobile). On classe ces déterminants en trois axes : les facteurs économiques, qui concernent l'objectif de productivité en canne à sucre ainsi que le rapport surface par actif, les facteurs liés au risque, qui concernent le besoin en eau, l'intensité de la diversification ainsi que le bénéfice d'un revenu extérieur à l'agriculture, et un facteur lié au réseau social des agriculteurs, représenté par l'implication dans le réseau des associations d'irrigants.

Les caractéristiques économiques des agriculteurs jouent un rôle important dans la décision d'adopter une nouvelle technologie d'irrigation. La figure (3.1) montre que plus le rapport surface par actif des exploitations augmente, plus la probabilité d'adoption d'une nouvelle technologie d'irrigation augmente et plus la probabilité de conserver une technologie d'irrigation obsolète diminue. Cette figure montre aussi que la probabilité d'adoption d'une nouvelle technologie d'irrigation sans automatismes augmente puis diminue à mesure que le rapport surface par actif augmente, alors que la probabilité d'adoption d'une nouvelle technologie d'irrigation avec automatismes ne fait qu'augmenter.

D'après nos estimations, on constate deux seuils d'adoption liés au rapport surface par actif, toute chose égale par ailleurs. En deçà d'un hectare environ, la probabilité la plus élevée est celle de conserver une technologie d'irrigation obsolète. Entre un et cinq hectares environ, la probabilité la plus élevée devient l'adoption d'une nouvelle technologie d'irrigation sans automatismes. Enfin, au-delà d'un rapport surface par actif égal à cinq hectares environ, la probabilité d'adoption la plus élevée devient l'adoption d'une nouvelle technologie d'irrigation avec automatismes.

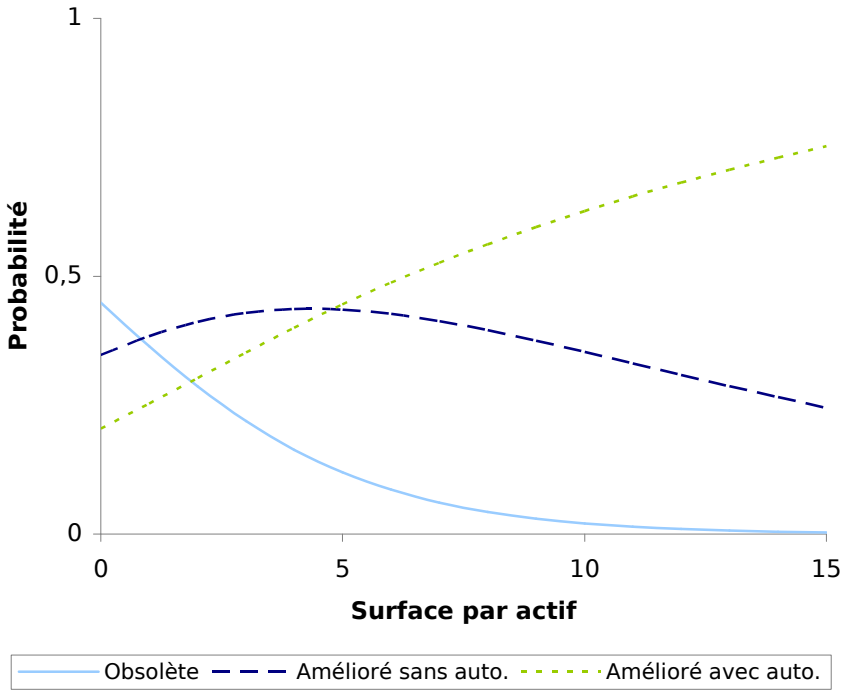


FIG. 3.1: Les probabilités d'adoption agrégée en fonction du rapport surface par actif

Ce résultat confirme que l'investissement dans une nouvelle technologie d'irrigation est motivé par les économies de main d'œuvre réalisables grâce à l'adoption. Cela semble complètement cohérent avec la réalité. De plus, cela confirme que l'adoption

d'une nouvelle technologie d'irrigation avec automatismes concerne les exploitations au rapport surface par actif le plus important. Dans ce cas-là, la capacité à financer les investissements, en plus des économies de main d'œuvre réalisables grâce à la mise en place de vannes automatiques, semble déterminante pour expliquer l'adoption d'une technologie d'irrigation plus sophistiquée.

La figure (3.2) montre que plus les agriculteurs intensifient leur productivité en canne à sucre, plus la probabilité d'adoption d'une nouvelle technologie d'irrigation augmente et plus la probabilité de conserver une technologie d'irrigation obsolète diminue. Cette figure montre aussi que la probabilité d'adoption d'une nouvelle technologie d'irrigation augmente à peu près dans les mêmes proportions que la probabilité d'adoption d'une technologie d'irrigation améliorée avec automatismes à mesure que les agriculteurs intensifient leur productivité en canne à sucre.

D'après nos estimations, on constate un seuil d'adoption lié à l'objectif de productivité en canne à sucre, toute chose égale par ailleurs. Lorsque l'objectif de productivité est peu intensif, la probabilité la plus élevée est celle de conserver une technologie d'irrigation obsolète. Lorsque l'objectif de productivité est intensif ou très intensif, la probabilité la plus élevée devient l'adoption d'une nouvelle technologie d'irrigation avec automatismes.

Ce résultat est cohérent avec la réalité. Sur les périmètres irrigués du sud de La Réunion, l'aspersion en couverture totale ou mobile est dominante parmi les agricul-

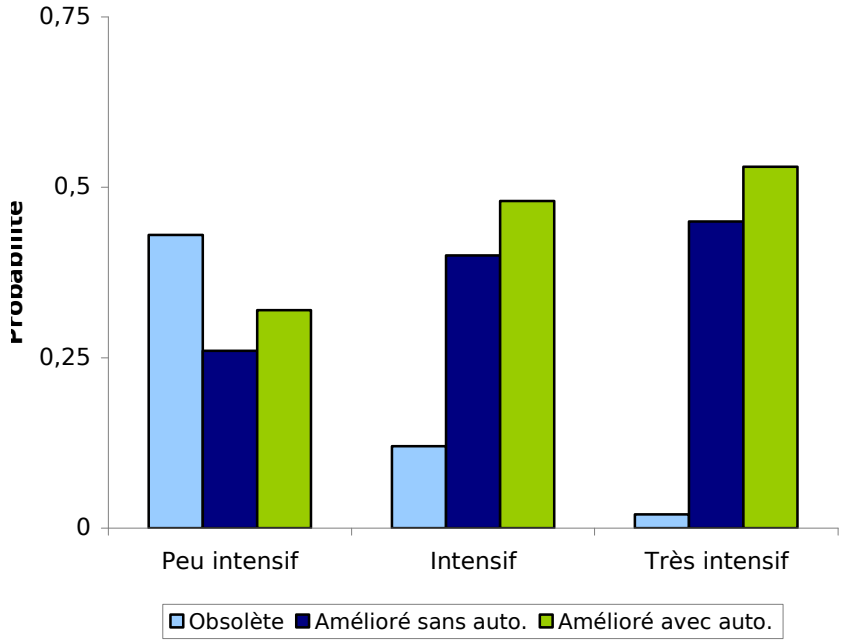


FIG. 3.2: Les probabilités d'adoption agrégée en fonction de l'objectif de productivité en canne à sucre

teurs qui intensifient peu leur culture de canne à sucre. De plus, les nouvelles technologies d'irrigation avec automatismes sont dominantes parmi les agriculteurs dont l'objectif de productivité est intensif ou très intensif. Conformément à nos estimations, l'aspersion en couverture intégrale sans automatismes n'est jamais dominante quel que soit l'objectif de productivité des agriculteurs. Cela confirme que cette variable explique bien les décisions de conserver une technologie d'irrigation obsolète ou d'adopter une technologie d'irrigation plus sophistiquée mais n'explique pas bien le choix de l'aspersion en couverture intégrale sans automatismes, à moins de considérer qu'il s'agit d'une situation transitoire précédant l'adoption d'une technologie d'irrigation améliorée avec automatismes.

3.4.2.2 Les facteurs liés au risque

On illustre à présent le rôle des facteurs explicatifs liés au risque : le besoin en eau, lié au risque climatique pesant sur la production, ainsi que le degré de diversification et la pluriactivité, liés au risque financier pesant sur le profit.

La figure (3.3) montre que plus le besoin en eau net de la canne à sucre au sein des exploitations augmente, plus la probabilité d'adoption d'une nouvelle technologie d'irrigation augmente. Cette figure montre aussi que la probabilité d'adoption d'une nouvelle technologie d'irrigation avec automatismes augmente puis diminue à mesure que le besoin en eau augmente, alors que la probabilité d'adoption d'une nouvelle technologie sans automatismes ne fait qu'augmenter. Il se pourrait ainsi qu'il existe un avantage à être plus efficient dans les zones à grosse consommation d'eau.

D'après nos estimations, on constate deux seuils d'adoption liés au besoin en eau, toute chose égale par ailleurs. En deçà de 5000 m^3/ha/an environ, la probabilité la plus élevée est celle de conserver une technologie d'irrigation obsolète. Entre 5000 et 7000 m^3/ha/an environ, la probabilité la plus élevée devient l'adoption d'une nouvelle technologie d'irrigation avec automatismes. Enfin, au-delà d'un besoin en eau égal à 7000 m^3/ha/an environ, la probabilité d'adoption la plus élevée devient l'adoption d'une nouvelle technologie d'irrigation sans automatismes.

Ce résultat confirme que l'investissement dans une nouvelle technologie d'irrigation dépend des conditions pédo-climatiques de l'exploitation. Ce résultat, qui dit que plus

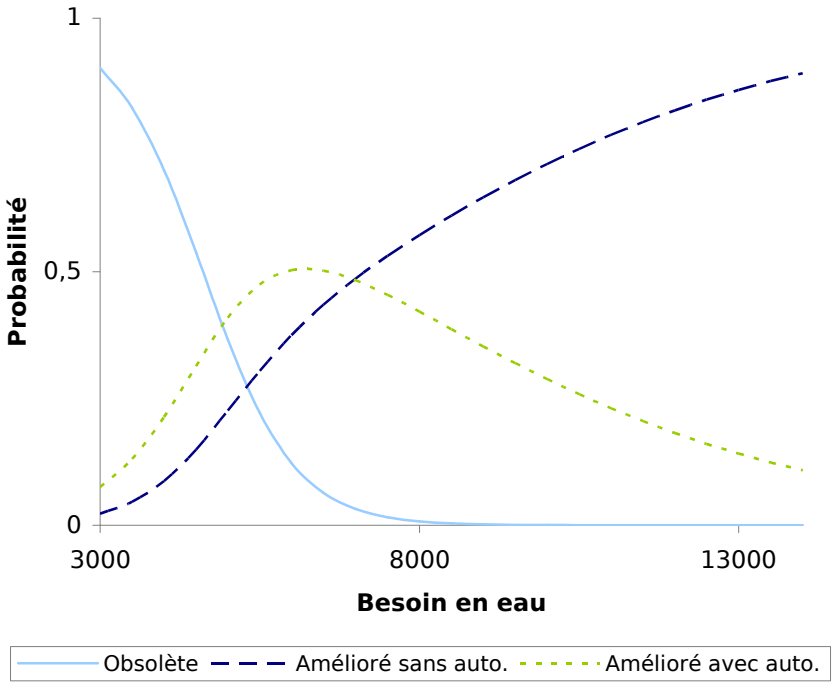


FIG. 3.3: Les probabilités d'adoption agrégée en fonction du besoin en eau

les conditions pédo-climatiques sont contraignantes, plus la probabilité d'adoption d'une nouvelle technologie augmente, est cohérent avec la littérature. Cela pourrait montrer, d'une part, que les agriculteurs sont averses au risque climatique. L'adoption d'une nouvelle technologie d'irrigation apparaît alors comme un moyen de minimiser le risque climatique. D'autre part, cela confirme l'idée que le choix en matière de technologie d'irrigation dépend de l'appui-conseil à l'irrigation (surtout concentré dans les zones sèches des périmètres). Finalement, il semblerait que les technologies d'irrigation les plus sophistiquées soient profitables jusqu'à un certain seuil du besoin en eau. Il se pourrait qu'au delà de cette valeur seuil, la quantité d'eau à appliquer aux cultures soit trop importante pour envisager une gestion plus fine des tours d'eau et des doses d'eau.

La figure (3.4) montre que plus le degré de diversification décidée par les agriculteurs est importante, plus la probabilité d'adoption d'une nouvelle technologie d'irrigation augmente et plus la probabilité de conserver une technologie d'irrigation obsolète diminue. Cette figure montre aussi que la probabilité d'adoption d'une technologie d'irrigation sans automatismes diminue et la probabilité d'adoption d'une nouvelle technologie d'irrigation avec automatismes augmente à mesure que les agriculteurs intensifient leur diversification.

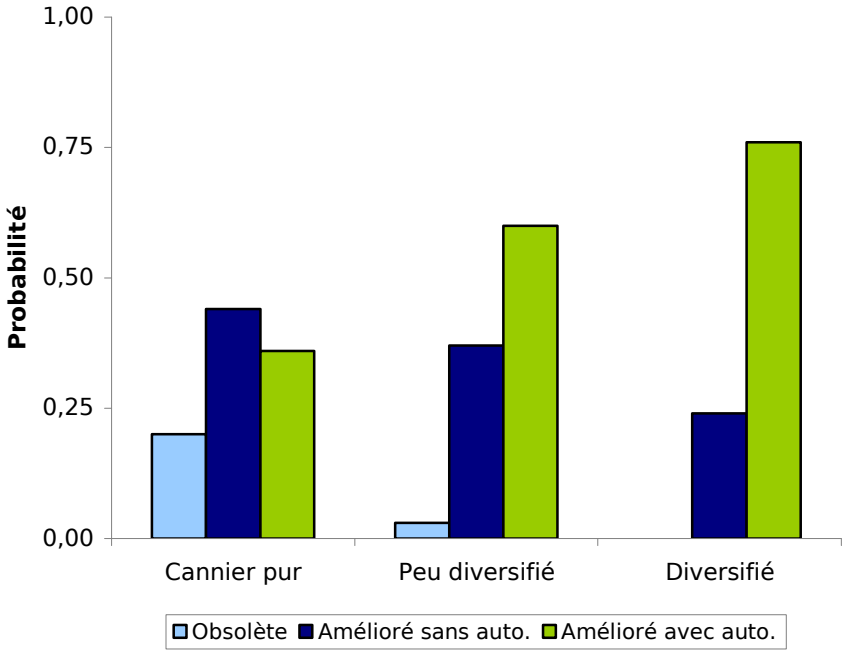


FIG. 3.4: Les probabilités d'adoption agrégée en fonction de l'intensité de la diversification

D'après nos estimations, on constate un seuil d'adoption lié à l'intensité de la diversification, toute chose égale par ailleurs. Lorsque la diversification est inexistante

au sein des exploitations cannières, la probabilité la plus élevée concerne l'adoption de l'aspersion en couverture intégrale sans automatismes. Lorsqu'une ou plusieurs cultures de diversification apparaissent au sein des exploitations, la probabilité la plus élevée devient l'adoption d'une nouvelle technologie d'irrigation avec automatismes.

Ce résultat, qui dit que les agriculteurs qui diversifient leur production adoptent plus rapidement une nouvelle technologie d'irrigation, est assez cohérent avec la réalité. Sur les périmètres irrigués du sud de La Réunion, l'aspersion en couverture intégrale sans automatismes est dominante parmi les agriculteurs en monoculture de canne à sucre. De plus, les nouvelles technologies d'irrigation avec automatismes sont dominantes parmi les planteurs de canne qui produisent au moins une culture de diversification. Conformément à nos estimations, l'aspersion en couverture totale ou mobile n'est jamais dominante quelle que soit l'intensité de la diversification décidée par l'agriculteur. Cela confirme que cette variable explique bien la décision d'adopter une nouvelle technologie d'irrigation donnée (i.e. en tenant compte du choix de s'équiper ou pas en vannes automatiques) mais n'explique pas bien le choix de conserver une technologie d'irrigation obsolète. Ce résultat nous permet de rejeter l'hypothèse de neutralité vis-à-vis du risque pesant sur le profit des agriculteurs.

La figure (3.5) montre que plus les agriculteurs bénéficient d'un revenu extérieur à l'agriculture, par l'intermédiaire notamment de l'exercice d'une activité non agricole rémunérée ou par un conjoint travaillant à l'extérieur de l'exploitation, plus la

probabilité d'adoption d'une nouvelle technologie d'irrigation augmente. Cette figure montre aussi que la probabilité d'adoption d'une technologie d'irrigation sans automatismes augmente et la probabilité d'adoption d'une nouvelle technologie d'irrigation avec automatismes diminue si les agriculteurs bénéficient d'un revenu extérieur.

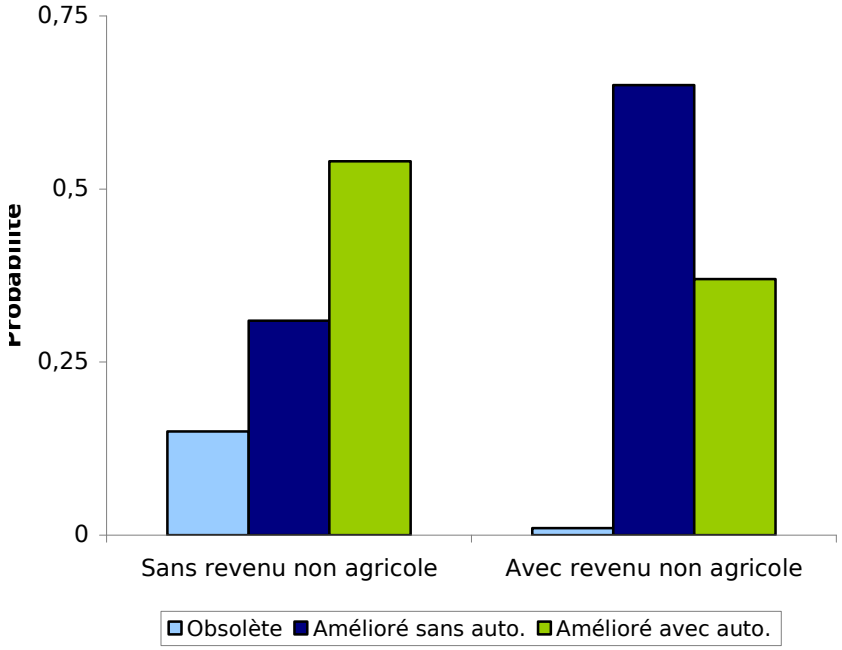


FIG. 3.5: Les probabilités d'adoption agrégée en fonction du bénéfice d'un revenu extérieur à l'agriculture

D'après nos estimations, on constate un seuil d'adoption lié au bénéfice d'un revenu extérieur à l'agriculture, toute chose égale par ailleurs. Lorsque les agriculteurs ne bénéficient pas de revenu extérieur, la probabilité la plus élevée concerne l'adoption d'une nouvelle technologie d'irrigation avec automatismes. Lorsque les agriculteurs bénéficient d'un revenu extérieur, la probabilité la plus élevée devient l'adoption d'une nouvelle technologie d'irrigation sans automatismes.

Ce résultat, qui dit que les agriculteurs qui bénéficient d'un revenu extérieur à l'agriculture adoptent plus rapidement une nouvelle technologie d'irrigation, est conforme à la réalité. Sur les périmètres irrigués du sud de La Réunion, l'aspersion en couverture intégrale avec automatismes est dominante parmi les agriculteurs qui ne bénéficient pas d'une source de revenu extérieur. De plus, l'aspersion en couverture intégrale sans automatismes est dominante parmi les planteurs de canne qui bénéficient d'une source de revenu extérieur. Conformément à nos estimations, l'aspersion en couverture totale ou mobile n'est jamais dominante sur les périmètres irrigués quel que soit le type de revenus (seulement agricole ou pas) dont bénéficie l'agriculteur. Cela confirme que cette variable explique bien le choix d'adopter une technologie d'irrigation donnée mais n'explique pas bien le choix de conserver une technologie d'irrigation obsolète. Ce résultat confirme le rejet de l'hypothèse de neutralité vis-à-vis du risque pesant sur le profit des agriculteurs.

3.4.2.3 Le réseau social des irrigants

On illustre à présent le rôle d'un facteur explicatif lié au réseau social des irrigants et à l'apprentissage qui en découle : l'implication dans les associations d'irrigants de la part des agriculteurs.

La figure (3.6) montre que plus les agriculteurs sont impliqués dans le réseau associatif, plus la probabilité d'adoption d'une nouvelle technologie d'irrigation augmente

et plus la probabilité de conserver une technologie d'irrigation obsolète diminue. Cette figure montre aussi que la probabilité d'adoption d'une nouvelle technologie d'irrigation sans automatismes diminue et la probabilité d'adoption d'une nouvelle technologie d'irrigation avec automatismes augmente si les agriculteurs sont impliqués dans le réseau associatif.

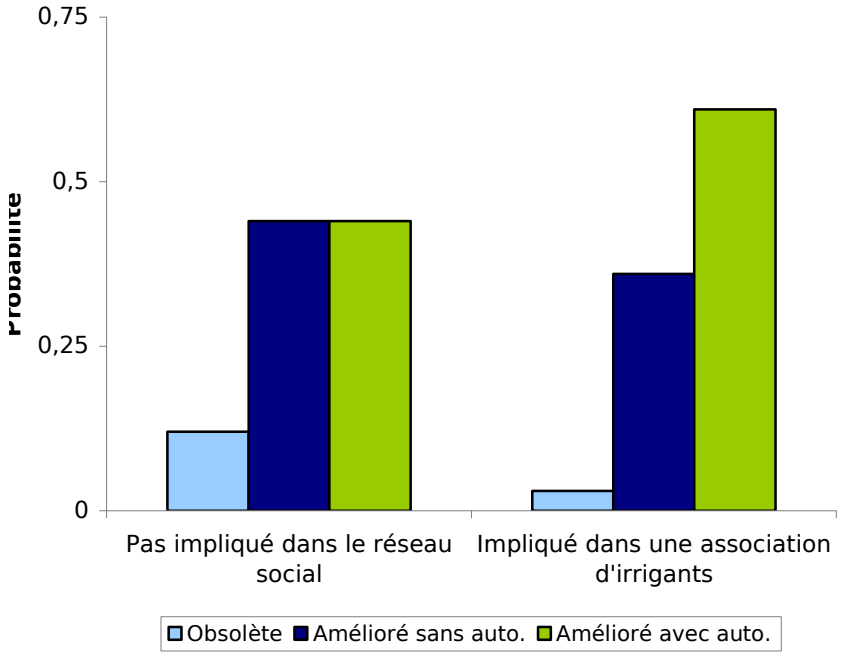


Fig. 3.6: Les probabilités d'adoption agrégée en fonction de l'appartenance à une association d'irrigants

D'après nos estimations, on constate un seuil d'adoption lié au réseau social des irrigants, toute chose égale par ailleurs. Lorsque les agriculteurs ne participent pas au réseau associatif, les probabilités concernant l'adoption d'une nouvelle technologie d'irrigation sans et avec automatismes sont équivalentes. Lorsque les agriculteurs participent au réseau associatif, la probabilité la plus élevée devient l'adoption d'une

nouvelle technologie d'irrigation avec automatismes.

Ce résultat, qui dit que les agriculteurs les mieux insérés socialement adoptent plus rapidement une nouvelle technologie d'irrigation plus sophistiquée, est conforme à la réalité. Sur les périmètres irrigués du sud de La Réunion, l'aspersion en couverture intégrale sans automatismes est dominante parmi les agriculteurs qui ne participent pas au réseau associatif. De plus, les nouvelles technologies d'irrigation avec automatismes sont dominantes parmi les agriculteurs qui participent au réseau associatif. Conformément à nos estimations, l'aspersion en couverture totale ou mobile n'est jamais dominante sur les périmètres irrigués quelle que soit l'implication des agriculteurs dans le réseau associatif. Cela confirme que cette variable explique bien le choix d'adopter une technologie d'irrigation sophistiquée (i.e. avec automatismes) mais n'explique pas bien les choix de conserver une technologie d'irrigation obsolète et d'adopter une nouvelle technologie d'irrigation sans automatismes.

Une interprétation possible de ce résultat est que les agriculteurs les mieux informés affectent une valeur plus faible à l'option d'attendre pour changer de matériel et pour cette raison, adoptent plus tôt que les autres une nouvelle technologie d'irrigation plus sophistiquée. Autrement dit, l'acquisition d'informations dans le réseau associatif de la part des agriculteurs réduirait la valeur d'option de l'adoption et accélèrerait le rythme de diffusion des nouvelles technologies d'irrigation avec automatismes.

3.5 Conclusion

Ce chapitre a développé un référentiel théorique permettant de comprendre comment un agriculteur acquiert l'information à propos de plusieurs nouvelles technologies d'irrigation, différenciées selon le type d'outils de pilotage accompagnant le matériel d'irrigation, et au final d'identifier les facteurs explicatifs de la sélection des technologies d'irrigation à l'échelle d'une exploitation agricole. Ce référentiel théorique met en évidence le rôle du risque et de l'apprentissage, par l'intermédiaire d'une fonction de production stochastique et d'une valeur d'option intégrée aux analyses coûts-bénéfices sous incertitude réalisées par l'agriculteur pour chaque technologie d'irrigation disponible.

Au niveau empirique, on estime un modèle logit multinomial à modalités non ordonnées sur un échantillon de 87 exploitants agricoles spécialisés dans la culture de la canne à sucre et localisés sur les périmètres du sud (Bras de la Plaine et Bras de Cilaos) de La Réunion. Trois types de facteurs sont pris en compte. D'une part, la complexité (corrélée au coût ainsi qu'à l'efficience de l'eau) des nouvelles technologies d'irrigation est prise en compte par l'intermédiaire de la variable dépendante qui tient compte à la fois du matériel d'irrigation et des outils de pilotage de l'irrigation sélectionnés par l'agriculteur. D'autre part, les caractéristiques des irrigants sont prises en compte par l'intermédiaire du rapport surface par actif, de l'objectif de productivité en canne à sucre et de l'intensité de la diversification. Enfin, les caractéristiques du

contexte d'adoption des agriculteurs sont prises en compte par l'intermédiaire du besoin en eau net de la canne à sucre au sein de l'exploitation, du bénéfice d'un revenu extérieur à l'agriculture ainsi que de l'implication dans le réseau associatif.

Le choix de conserver l'aspersion en couverture totale ou mobile sans automatismes dépend principalement de facteurs économiques (rapport surface par actif, objectif de productivité en canne à sucre) et d'un facteur lié au risque climatique (besoin en eau). Le choix d'adopter l'aspersion en couverture intégrale sans automatismes dépend principalement d'un facteur économique (rapport surface par actif), de facteurs liés au risque climatique (besoin en eau) et financier (intensité de la diversification, bénéfice d'un revenu extérieur à l'agriculture) ainsi que d'un facteur lié au réseau social des irrigants (implication dans une association d'irrigants). Le choix d'adopter une nouvelle technologie d'irrigation (aspersion en couverture intégrale ou goutte-à-goutte) avec automatismes dépend principalement de facteurs économiques (rapport surface par actif, objectif de productivité en canne à sucre), de facteurs liés au risque climatique (besoin en eau) et financier (intensité de la diversification) ainsi que d'un facteur lié au réseau social des irrigants (implication dans une association d'irrigants).

Les résultats de ce chapitre mettent en évidence que les coefficients de l'adoption technologique estimés sur des données en coupe doivent être interprétés avec le processus dynamique de diffusion à l'esprit. Ceci est particulièrement vrai pour l'aspersion en couverture intégrale, avec ou sans automatismes, dont les paramètres de diffusion

agrégée au sein du secteur de la canne à sucre irriguée de La Réunion ont été estimés au cours du deuxième chapitre. Le rôle de certaines variables explicatives peut effectivement dépendre de la période analysée concernant le processus de diffusion. Autrement dit, les variables explicatives de l'adoption technologique au début du processus de diffusion ne sont pas forcément les mêmes que celles expliquant l'adoption technologique à la fin du processus de diffusion.

Ces résultats nous conduisent à penser que les décisions économiques et les choix technologiques des adopteurs précoces sont guidés par un comportement rationnel, caractérisé par l'optimisation d'une fonction d'utilité, alors que les décisions économiques et les choix technologiques des adopteurs tardifs (les retardataires) sont guidés par les influences sociales (mimétisme) et l'apprentissage (endogène) qui en résulte. Cela nous permet de penser que certains coefficients estimés dans ce chapitre ne doivent pas être considérés comme des données mais comme des variables suceptibles d'évoluer dans le temps en fonction du processus dynamique de diffusion technologique.

Ces résultats présentent plusieurs intérêts pour les Pouvoirs Publics. Premièrement, si l'innovation est incrémentale et économiquement peu risquée (comme la couverture intégrale seule qui implique un changement relativement léger des pratiques d'irrigation par rapport à la couverture mobile ou totale), la diffusion suit spontanément une courbe en S et une hausse des subventions accélère le rythme d'adoption (cf. chapitre 2). Deuxièmement, si l'innovation est radicale et donc plus risquée (comme

le goutte-à-goutte et dans une moindre mesure la couverture intégrale avec automatismes qui impliquent un changement radical de pratiques), la dynamique d'adoption répond plus à une analyse coûts-bénéfices sous incertitude de la part des irrigants.

C'est pourquoi, lorsque les Pouvoirs Publics envisagent l'utilisation d'instruments économiques pour inciter les agriculteurs à adopter plus rapidement, ils doivent incorporer les bénéfices liés au changement de nature du risque engendré par l'adoption dans l'analyse coûts-bénéfices adéquate. En particulier, un effort insuffisant du coté de la formation pour le matériel le plus sophistiqué risquerait de conduire à des politiques publiques non optimales. Troisièmement, l'apprentissage des agriculteurs induit par leur degré d'implication dans le réseau social réduit la valeur de l'information à propos des nouvelles technologies d'irrigation plus sophistiquées, et accélère le rythme de diffusion des nouvelles technologies d'irrigation plus économes en eau.

Conclusion

Cette thèse examine la relation entre des incitations à l'adoption d'équipements plus économes en eau et la sélection des technologies d'irrigation par les agriculteurs. La manière dont les incitations à l'équipement influencent le changement technologique en agriculture irriguée est un critère important pour évaluer de telles politiques et un facteur clé pour parvenir à une gestion durable de l'eau.

Une meilleure compréhension de ce problème nécessite le développement d'études empiriques locales qui tiennent compte des caractéristiques des agriculteurs et de leurs exploitations, des caractéristiques du contexte local d'adoption et des caractéristiques des nouvelles technologies d'irrigation disponibles localement. Quelques études existent (Californie, Israël, Hawaï), mais ces études ont rarement cherché à tester statistiquement à la fois l'hypothèse de rationalité privée des agriculteurs à l'échelle d'une exploitation, et l'hypothèse d'imitation au sein du secteur agricole, pour expliquer la diffusion des nouvelles technologies d'irrigation.

Cette thèse, appliquée au secteur de la canne à sucre irriguée des périmètres du sud

de l'île de la Réunion, propose une telle étude. Les objectifs de l'étude sont doubles :

- analyser et expliquer les freins et motivations des irrigants à l'adoption de nouvelles techniques et pratiques d'irrigation économes en eau,
- analyser et expliquer le rôle des soutiens publics.

Ces problèmes sont examinés en appliquant différentes méthodes de recherche : enquête de terrain à l'île de la Réunion, construction d'une base de données agro-économiques, analyse économétrique d'une série temporelle et analyse économétrique d'un choix discret.

Quelques éléments liés, d'une part, à la dépendance potentielle entre la dynamique du sentier de diffusion d'une nouvelle technologie d'irrigation et l'évolution du contexte d'adoption des agriculteurs et, d'autre part, à la complexité des nouvelles technologies et à leur capacité à effectivement améliorer l'efficience de l'irrigation sont intégrés à l'analyse. Ce chapitre présente une synthèse des principaux résultats et propose quelques conclusions concernant l'utilité de différents instruments économiques visant à encourager l'adoption des nouvelles technologies d'irrigation à l'île de la Réunion.

Les effets d'une politique à l'économie d'eau sur la sélection collective des technologies d'irrigation par une population d'agriculteurs est le premier sujet empirique de cette étude. On développe un référentiel théorique original, jamais appliqué à la diffusion des technologies d'irrigation. Le référentiel développé inclut la possibilité d'évaluer simultanément l'impact de paramètres économiques sur la vitesse et le pla-

fond de diffusion d'une nouvelle technologie d'irrigation au sein d'un périmètre irrigué. Ce modèle est testé sur un échantillon de 111 agriculteurs dont on connaît les choix réalisés en matière d'irrigation de 1990 à 2006 et dont le contexte économique d'adoption a évolué suite à une hausse des taux de subvention à l'équipement de 2000 à 2006. Trois formes fonctionnelles sont utilisées : les fonctions logistique, de Gompertz et de Bass. L'estimation d'un modèle de Bass, notamment, permet de distinguer l'effet d'innovation de l'effet d'imitation.

Les résultats d'estimation montrent que l'effet d'imitation, généré par les interactions sociales, joue un rôle très important pour expliquer la forme du sentier de diffusion de l'aspersion en couverture intégrale à l'île de la Réunion. Cet effet peut prendre la forme de bouche-à-oreille entre les agriculteurs ou de phases d'entraînement collectif (" bandwagon effect "). Les résultats d'estimation montrent aussi que la forme caractéristique du sentier de diffusion ne produit pas une courbe en S parfaitement symétrique. L'effet d'innovation est beaucoup moins net que l'effet d'imitation. Les valeurs obtenues sont cohérentes avec la littérature empirique sur le sujet mais elles sont assez faiblement significatives. L'inclusion d'une non linéarité dans l'évolution du contexte économique des agriculteurs, par l'intermédiaire d'une hausse des taux de subvention à l'équipement, améliore significativement l'estimation. Cela revèle une dépendance du sentier de diffusion caractéristique à l'évolution du taux de subvention à l'équipement. Les résultats montrent que cette évolution affecte à la fois la vitesse et le plafond du sentier de diffusion de l'aspersion en couverture intégrale.

Les effets des incitations à l'adoption d'équipements plus économes en eau sur la sélection individuelle des technologies d'irrigation par un agriculteur représentatif est le deuxième sujet empirique de cette étude. On présente le référentiel théorique dans un cadre déterministe, pour une distribution climatique donnée, puis dans un cadre incertain, pour une distribution climatique aléatoire et en présence d'une valeur d'attente pour une meilleure information. Ce modèle est testé sur un échantillon de 87 exploitations agricoles dont on connaît les caractéristiques agroéconomiques et sociales en 2006. La capacité des choix technologiques à réellement améliorer l'efficience de l'eau est prise en compte car on estime le choix combiné de matériel d'irrigation et d'outils de pilotage pour l'irrigation. Un modèle logit multinomial à modalités non ordonnées est estimé.

Les résultats d'estimation montrent que l'effet lié à la rationalité privée des agriculteurs joue un rôle très important pour expliquer le choix d'une nouvelle technologie d'irrigation donnée. Le choix auquel fait face l'agriculteur est multiple. Il peut décider de conserver sa technologie actuelle, il peut décider d'adopter une technologie améliorant surtout la productivité du foncier avec un risque faible de ne pas y parvenir ou il peut décider d'adopter une technologie permettant à la fois d'améliorer la productivité du foncier et de l'eau avec un risque plus élevé de ne pas y parvenir à cause du manque d'information. Les résultats montrent que le seuil d'adoption des techniques et pratiques plus sophistiquées permettant d'améliorer de façon significative l'efficience de

l'eau dépend surtout :

- de la capacité des agriculteurs à investir,
- des gains potentiels de productivité permis grâce à l'adoption,
- du niveau de risque sur les profits futurs après l'adoption,
- de l'implication sociale des agriculteurs.

Il convient de noter que ce choix technologique sous-entend un changement important des pratiques d'irrigation dans la mesure où il correspond au choix combiné d'une nouvelle technologie d'irrigation avec des outils de pilotage automatique.

La qualité prédictive de chaque modèle est assez bonne et globalement identique, affichant des résultats cohérents avec la littérature. Cela montre que les préférénces des agriculteurs dépendent, dans des proportions variables, de deux composantes principales : une liée aux interactions sociales et une autre liée à la rationalité privée. Le poids de chaque composante peut varier en fonction des caractéristiques des nouvelles technologies d'irrigation à adopter. Lorsque la nouvelle technologie d'irrigation est facile à utiliser et à rentabiliser, les facteurs clés de la diffusion sont surtout endogènes. La part liée aux interactions sociales dans les préférences des agriculteurs est alors dominante. Lorsque la nouvelle technologie d'irrigation est un changement radical dans la manière de gérer techniquement et agronomiquement l'irrigation et qu'elle est complexe à utiliser, les facteurs clés de la diffusion sont surtout liés aux caractéristiques (exogènes) des agriculteurs et de leurs exploitations. Dans ce cas-là, la part liée à la rationalité privée dans les préférences des agriculteurs est dominante bien que la part

liée aux interactions sociales ne soit probablement pas négligeable.

Les subventions à l'équipement s'avèrent être un outil efficace pour accélérer la vitesse de diffusion des nouvelles technologies d'irrigation sous certaines conditions liées aux caractéristiques des agriculteurs et des nouvelles technologies. Le modèle de diffusion agrégée développé dans cette thèse montre que les subventions à l'équipement influencent les décisions d'adoption des agriculteurs à propos de l'aspersion en couverture intégrale. Lorsque le taux de subvention de cette technologie a été augmenté durant la période 2000-2006, le processus de diffusion en S s'est accéléré. Les résultats montrent aussi, de façon un peu moins nette cependant, que le changement de taux de subvention à permis d'accroître le nombre final d'agriculteurs adoptant l'aspersion en couverture intégrale. L'outil subvention semble donc efficace sous les conditions suivantes :

- la nouvelle technologie ne nécessite pas de modifications profondes des pratiques,
- la nouvelle technologie est très peu risquée et vite rentabilisée (bonne adaptabilité au contexte local),
- le processus de diffusion est dans une phase qui concerne une majorité d'agriculteurs.

Par contre, lorsque l'innovation est plus risquée et plus complexe à utiliser, l'outil subvention ne suffit pas. Dans ce cas-là, il est nécessaire, mais pas toujours suffisant, de le coupler à d'autres instruments.

Parmi ces instruments, le conseil à l'irrigation apparaît comme un outil complémentaire aux subventions à l'équipement. Le modèle de Bass, utilisé pour analyser la diffusion de l'aspersion en couverture intégrale à La Réunion, permet de tester le rôle de cet outil. Le distinction faite par ce modèle entre le coefficient d'influence interne et le coefficient d'influence externe pour expliquer la vitesse de diffusion technologique permet de tester une part de l'effet lié au conseil reçu par les agriculteurs, puisque dans le modèle de Bass, les adopteurs précoces ne sont pas influencés par les autres agriculteurs mais par une source d'information externe au processus de diffusion. Le modèle de Bass avec la vitesse de diffusion spécifiée comme une fonction du taux de subvention et le plafond de diffusion spécifié constant apparaît être un des deux meilleurs modèles estimés. Les estimations concernant le coefficient d'influence externe, censé capter l'effet lié au conseil et à la formation, sont cohérentes avec la littérature (positives et très faibles, de l'ordre de 0.01), et l'inclusion de ce paramètre améliore les estimations du modèle logistique. Ces résultats montrent qu'une combinaison conseil-subvention adaptée permet d'accélérer la vitesse de diffusion de l'aspersion en couverture intégrale au sein du secteur de la canne à sucre irriguée à La Réunion. Dans le troisième chapitre, on montre aussi que plus la quantité d'information détenue par un agriculteur à propos des nouvelles technologies d'irrigation est importante, plus la probabilité d'adoption des nouvelles technologies par cet agriculteur est grande.

Dans le premier chapitre de cette thèse, on montre qu'à l'île de la Réunion, le prix de l'eau d'irrigation est un outil qui n'a pas été destiné à accélérer la vitesse

de diffusion des nouvelles technologies d'irrigation. Il est maintenu à un niveau très faible afin d'aider un secteur agricole par ailleurs en grande difficulté et son impact sur la vitesse de diffusion des nouvelles technologies d'irrigation est insignifiant. L'inclusion de l'évolution du prix de l'eau pouvant affecter la dynamique de diffusion d'une nouvelle technologie d'irrigation dans le modèle de diffusion agrégée est possible, au même titre que l'évolution du taux de subvention. Des estimations permettant de tester l'évolution du prix de l'eau sur la vitesse et le plafond de diffusion de l'aspersion en couverture intégrale à La Réunion ont été réalisées, d'abord sur la période 1990-2006 au cours de laquelle le prix de l'eau augmente puis stagne, puis sur la période 1990-2000 au cours de laquelle le prix de l'eau augmente régulièrement de 6.5 % par an. Il n'a jamais été constaté d'amélioration des estimations suite à l'inclusion du facteur-prix, qui n'est par ailleurs jamais apparu significatif [6]. Le modèle théorique développé dans le troisième chapitre montre cependant que le timing et la nature des choix technologiques individuels peut dépendre en partie du prix de l'eau payé par chaque agriculteur [7].

Cette thèse révèle d'autres facteurs incitatifs que les subventions à l'équipement, le conseil à l'irrigation et le prix de l'eau d'irrigation. Dans le premier chapitre, on évoque le rôle des institutions sur la diffusion des nouvelles technologies d'irrigation à La Réunion. On développe notamment l'idée que le processus d'abandon du goutte-

[6] Le résultat de ces estimations n'est pas reporté dans cette thèse.

[7] Sur les périmètres irrigués du sud de La Réunion, cet aspect n'a pas pu être testé à cause de la constance du prix moyen payé par chaque agriculteur.

à-goutte constaté sur les périmètres irrigués du sud depuis quelques années fait suite à une période de *learning by using* caractérisée par des interactions entre les institutions, la R&D et les agriculteurs. Cela a permis d'identifier trois raisons génératrices de cette phase d'abandon : la mauvaise adaptabilité du goutte-à-goutte aux conditions locales, les difficultés rencontrées pour rentabiliser l'investissement, et le fait que l'aspersion soit le matériel historique sur les périmètres. Les interactions sociales au sein du secteur agricole sont la base du modèle de diffusion agrégée développé dans le deuxième chapitre de cette thèse. Les bons résultats obtenus concernant l'estimation de la proportion d'adoptions cumulées dans le temps de l'aspersion en couverture intégrale (R^2=0.98) confirment l'idée du rôle majeur joué par les interactions sociales. Dans le troisième chapitre, on montre que le réseau social d'un agriculteur peut influencer le timing et la nature de ses choix technologiques. On montre notamment que plus l'implication dans le réseau associatif de la part d'un agriculteur est importante, plus la probabilité que cet agriculteur adopte une technologie d'irrigation économe en eau est grande.

Cette thèse montre que les résultats du modèle microéconomique obtenus dans le troisième chapitre doivent être relativisés dans une dynamique globale, plus macroéconomique. Ce travail montre aussi l'intérêt de donner d'une part des fondements théoriques liés au comportement individuel des exploitations agricoles à l'approche à l'échelle d'un périmètre irrigué, et d'autre part des fondements théoriques liés aux interactions sociales à l'approche à l'échelle d'une exploitation agricole. La prise en

compte des décisions individuelles au sein d'un modèle de diffusion agrégée ainsi que la prise en compte des interactions au sein d'un modèle de décision microéconomique nécessitent des approfondissements théoriques. On distingue deux pistes : le modèle multi-agents issu des recherches en simulation sociale et l'analyse économétrique d'un choix discret avec interactions sociales.

La mise en place d'un modèle basé sur une approche multi-agents en utilisant des modèles d'exploitations agricoles hétérogènes et où les interactions spatiales seraient prises en compte de façon explicite semble promettre de bonnes améliorations pour expliquer la diffusion des nouvelles technologies d'irrigation au sein d'un périmètre irrigué. Les choix individuels des exploitations agricoles pourraient être représentés dans des modèles de programmation linéaire récursive (Berger, 2001). Ce genre d'approche permet d'analyser les phénomènes macroéconomiques à une échelle microéconomique. Elle permet de mettre en évidence la pluralité des équilibres que peut atteindre le système économique et explique notamment les raisons qui poussent parfois les agriculteurs, la R&D et/ou les institutions à faire des choix technologiques sous-optimaux (phénomènes de "path-dependancy" et de "lock-in") (Carillo-Hermosilla, 2005).

L'analyse économétrique d'un choix discret multiple avec interactions sociales est un sujet complexe et encore peu exploré (Brock et Durlauf, 2001). La mise en place d'une telle approche serait un approfondissement pertinent du modèle des choix rationnels développé dans le troisième chapitre de cette thèse. Le choix individuel d'une

exploitation agricole ne dépendrait plus seulement de ses propres caractéristiques mais serait aussi influencé par le comportement et les choix technologiques des autres exploitations. Le choix individuel d'un agriculteur dépendrait donc des paramètres et mécanismes composant sa rationalité privée ainsi que de ses croyances à propos du choix technologique des autres agriculteurs.

Annexe A

Technique d'enquête

A.1 Objectifs de l'enquête

Ancienne colonie française, l'île de la Réunion est depuis 1946 un département français d'Outre Mer. Sa population, estimée en 1999 par l'INSEE à 706300 habitants, est en forte croissance et il est prévu qu'un million de personnes peuplent l'île en 2020. Depuis quelques années, la surface agricole n'a cessé de diminuer au profit de l'urbanisation. Actuellement, la Surface Agricole Utile est d'environ 48000 hectares, ce qui fait que moins de 17 % de la surface du territoire est occupée par l'agriculture. Dans les années 1990, la Surface Agricole Utile a diminué de quasiment 12 % et le nombre d'exploitations a chuté de 35 %. Cette diminution de l'activité agricole s'est poursuivie au début des années 2000. En 2003, on ne dénombrait plus que 7600 exploitations, soit 1700 de moins que trois ans auparavant.

Marquée par une histoire coloniale qui a, dès 1814, destiné l'île à alimenter la métropole en sucre, la culture majoritaire est encore aujourd'hui largement la canne à sucre destinée à l'industrie de transformation de sucre. La filière canne bénéficie d'un important soutien et d'un système de prix garanti. Le quota de production a été fixé à 296000 tonnes de sucre par an dans le cadre de l'Organisation Communautaire du Marché du Sucre (OCM Sucre). La production actuelle est d'environ 220000 tonnes de sucre par an (soit environ 2 millions de tonne de canne à sucre). Cette situation confère une qualité de rente à la production de canne à sucre, puisque les agriculteurs et les usines sucrières sont assurés de vendre toute leur production à un prix garanti.

La mise en place de nouveaux périmètres dans l'Ouest répond à la stratégie d'intensification de la production de canne, la volonté affichée étant de se rapprocher du quota fixé par l'Europe. Le projet de transfert des eaux d'Est en Ouest conduit par les Pouvoirs Publics depuis une vingtaine d'années répond à cet objectif, en cherchant à valoriser par l'agriculture des zones de l'Ouest subissant un déficit hydrique chronique.

La figure (A.1) montre qu'actuellement, l'irrigation concerne surtout la partie Sud-Ouest de l'île où le manque d'eau limitait considérablement le développement agricole. Aménagés depuis les années 1970, deux périmètres adjacents mais indépendants ont été développés sur cette partie de l'île. De nos jours, ces périmètres couvrent une surface d'environ 8000 hectares. Ces deux périmètres sont des réseaux collectifs sous pression. Ils sont situés sur le littoral de la façade Sud-Ouest de l'île jusqu'à une

altitude de 400m.

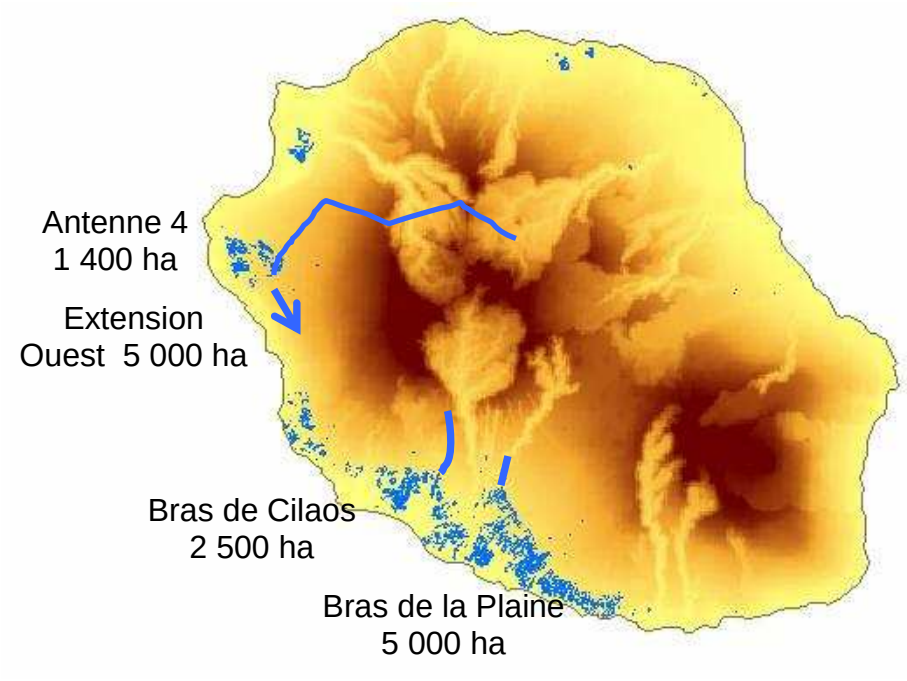


FIG. A.1: Les périmètres irrigués de l'île de la Réunion

Le Bras de la Plaine, aménagé dans les années 1970-1980, est le plus au sud et s'étend sur environ 5000 hectares équipés. Ce périmètre est alimenté par une seule prise d'eau gravitaire. Sur ce périmètre, il arrive que la ressource soit insuffisante en période d'étiage. Un système de tours d'eau est alors mis en place par le gestionnaire de la ressource. Le Bras de Cilaos, mis en place progressivement de 1985 à 1998, s'étale sur 2500 hectares équipés. Ce périmètre bénéficie d'une ressource en eau suffisamment abondante pour couvrir l'intégralité des besoins de la zone. Il est alimenté par une double source : captages sur le Bras de Cilaos et forages dans la Plaine du Gol. La

contrainte principale de ce périmètre concerne le risque de mise en péril de la nappe, qui présente un temps de rechargement limité et où on observe la formation d'un biseau salé en fin de saison. Cette enquête est consacrée aux agriculteurs de ces deux périmètres.

A.1.1 Axes de recherche

Les marges d'économies d'eau au niveau de la demande en eau sur les périmètres irrigués du Bras de la Plain et du Bras de Cilaos semblent importantes car on constate des niveaux de consommation très élevés. En irrigation, usage qui représente environ la moitié de la consommation globale d'eau à La Réunion, on observe fréquemment des consommations excessives par rapport aux besoins des cultures. L'investissement dans du matériel d'irrigation performant, la maîtrise technique et la disponibilité en main d'œuvre semblent en cause (Fusillier et Saque, 2003).

Les axes de recherche de cette enquête sont doubles :

- retracer l'historique des techniques d'irrigation détenues par les agriculteurs depuis l'installation jusqu'en 2006
- renseigner un ensemble de variables, quantitatives et qualitatives, relatives aux caractéristiques des agriculteurs, de leurs exploitations et de leurs pratiques d'irrigation.

Cette enquête doit permettre la mise en place de méthodes économétriques (série temporelle, choix discret) permettant de mieux comprendre les freins et motivations des agriculteurs à l'adoption de nouvelles techniques et pratiques d'irrigation plus

économes en eau.

A.1.2 Population étudiée et taille d'échantillon

La base de sondage utilisée pour cette enquête est une base construite par le CIRAD. Cette base de données comprenait 610 irrigants ayant un statut d'exploitant agricole, occupant une surface de 3868 hectares et structurés en 740 "exploitations" définies au sens de l'unité de production localisée sur une maille hydraulique. Notre base de sondage concerne donc 44 % des irrigants agriculteurs et 51 % de la surface irriguée totale des périmètres. La représentativité de l'échantillon que nous utilisons comme base de sondage est confortée par sa dispersion géographique, nécessaire pour prendre en compte les milieux physiques.

Le CIRAD a confronté les variations spatiales des pluies, de l'évapotranspiration potentielle et de la réserve utile dans les périmètres du Bras de Cilaos et du Bras de la Plaine. Cette analyse a permis de définir 26 unités spatiales, illustrées par la figure (A.2), dont les caractéristiques sont considérées comme relativement homogènes et suffisamment différentes de leur voisine pour être individualisées.

Les besoins théoriques en eau ont été simulés à partir d'un logiciel conçu à cet effet par le CIRAD. Cet outil permet une estimation fréquentielle des besoins théoriques en eau d'irrigation des cultures par zones agro-écologiques homogènes. Le modèle fonctionne au pas de temps de 1 jour. Les paramètres d'entrée du modèle sont liés au

pédoclimat, à la culture (ici la canne à sucre, largement majoritaire, est privilégiée) et au taux de remplissage de la réserve utile. Les consommations réelles d'eau sont issues des relevés de compteur aux bornes d'irrigation faits par le gestionnaire des périmètres irrigués comme base de facturation de l'eau. L'analyse comparative entre les consommations réelles et les besoins théoriques a été réalisée à l'échelle annuelle d'une campagne sucrière allant du 1er juillet d'une année au 30 juin de l'année suivante (Chopart et al., 2006). Les valeurs moyennes et spatialisées des écarts observés entre la consommation réelle et le besoin en eau théorique au cours des campagnes 1997/98, 1998/99, 1999/00 sont illustrées dans le tableau (A.1).

FIG. A.2: La localisation des micro-zones sur les périmètres irrigués du Bras de Cilaos et du Bras de la Plaine

Dans le périmètre du Bras de la Plaine, la grande majorité des micro-zones présentent des besoins théoriques proches des consommations réelles (à +/- 20 % près). Les sur-consommations apparentes se situent dans deux micro-zones voisines (A3-9-10 Terre-Rouge haut et A4-14 Bassin Plat) situées à l'Est de la commune de Saint-Pierre. Les micro-zones de Grand Bois (A5-10, A5-10-14) présentent des besoins théoriques supérieurs aux consommations réelles. Le faible niveau retenu pour la réserve utile (60 mm) peut avoir entraîné une légère surestimation des besoins théoriques en eau (Chopart et al., 2006). La micro-zone A6-10-14, située entre Grand Bois et Petite Ile, présente aussi des besoins théoriques légèrement inférieurs aux consommations réelles, malgré une RU du sol estimée plus grande.

Dans le périmètre du Bras de Cilaos, deux micro-zones ont des consommations réelles inférieures à celles modélisées. Il s'agit de la Plaine du Gol (B3-13) et de la zone de La Pointe au Sel - Les Avirons (B4), dont la surface apparente est très vaste mais en fait peu cultivée (SAPHIR). Concernant la Plaine du Gol, la consommation réelle plus faible que les besoins théoriques est due, très probablement, à la présence d'une nappe à faible profondeur, participant notablement à l'alimentation hydrique de la culture. Les agriculteurs en tiennent compte, à juste titre, pour l'alimentation hydrique de la culture. Le modèle utilisé pour simuler les besoins théoriques ne prend pas en compte les remontées capillaires. Pour l'autre micro-zone (B4), il n'y pas d'explication claire qui se dégage à partir des facteurs de type pédoclimatique. Deux micro-zones ont des consommations réelles supérieures aux besoins avec des écarts de

l'ordre de 20 %. Dans la micro-zone de Maduran (B6), la sur-consommation apparente tient à un effet de bordure du périmètre. Les agriculteurs disposent d'un débit limité qui satisfait environ la moitié de leur surface. Ce débit est utilisé au maximum et la surface réellement irriguée est supérieure à la surface souscrite à l'irrigation. La micro-zone de Bellevue (B2-13-5) a, elle aussi, une consommation réelle supérieure au besoin avec un écart de l'ordre de 20 %. Les raisons de cette sur-consommation sont floues.

Les données moyennes de consommations réelles par zone masquent d'importantes disparités de consommation entre les exploitations cannières d'une même zone, comme le montre le tableau (A.2) qui reporte les écart-types et coefficients de variation des consommations individuelles. Parmi les 24 zones considérées [1], 19 ont un coefficient de variation supérieur à 0.3, ce qui exprime une importante disparité des consommations d'eau autour de la moyenne. Chaque zone est considérée comme une entité pédoclimatique plus ou moins homogène et caractérisée par un besoin théorique en eau d'irrigation pour la canne qui varie sensiblement entre les zones et influence vraisemblablement les consommations. En raisonnant sur l'écart de la consommation individuelle au besoin (ce qui est assimilable à une notion d'efficience de l'irrigation), on peut appréhender les disparités entre exploitations de façon plus globale pour l'ensemble de la base de sondage sur les deux périmètres irrigués, l'effet de localisation

[1] La zone B6 de Maduran est exclue car les exploitations ne disposent pas de débits suffisants pour irriguer toute leur surface. La surface souscrite à l'irrigation, qui se trouve ainsi restreinte, ne correspond pas à la surface réellement irriguée, généralement plsu importante.

Tab. A.1: Moyenne des consommations en eau et des besoins en eau par micro-zone sur les périmètres du sud de La Réunion

Nom de la micro-zone		Conso d'eau moyenne[a]	Besoin en eau moyen[a]
A1-6	*Rideau*	9452	10128
A1-6-9	*Ravine des Cabris*	10923	9346
A2a-7	*Pierrefonds bas*	12139	11128
A2a-7 haut	*Pierrefonds haut*	11147	10619
A2b-6-8	*Ravine des Cabris bas*	11004	10552
A2b-7-14	*Monrepos bas*	10713	10367
A2b-7-8	*Monrepos haut*	11100	10720
A2b-8	*Ligne Paradis*	9962	10774
A2b-8 haut	*Ligne des Bambous*	10932	9803
A3-8-9	*Bassin Plat haut*	8720	7489
A3-9	*Bassin Martin*	7964	7636
A3-9-10	*Terre Rouge haut*	10381	6895
A4-14	*Bassin Plat bas*	10689	8604
A5-10	*Grand Bois haut*	6915	8694
A5-10-14	*Grand Bois*	7312	8861
A6-10-14	*Anse les bas*	4381	6036
A6-11	*Petite Ile*	5153	5278
B1a-5-7	*St Louis les Aloes*	10228	10422
B1b-5	*Gol les Hauts*	6190	7881
B2-13	*Maniron - Le Lambert*	8819	8295
B2-13-5	*Bellevue*	9045	7596
B3-13	*Le Gol*	6727	10318
B5	*Pointe au Sel - Les Avirons*	5961	10605
B6	*Maduran*	11444	9490

Source : Chopart et al. (2006).
[a] moyenne des campagnes 1997-98, 1998/99 et 1999/00, en m^3/ha/an

de l'exploitation dans une zone particulière étant plus ou moins neutralisé.

On s'interroge souvent a priori sur la taille d'échantillon à constituer au cours d'une enquête par sondage. La réponse dépend de la précision que l'on fixe aux estimations, du niveau de confiance auquel on souhaite réaliser les estimations et du niveau de

Tab. A.2: Aperçu de la variabilité des consommations d'eau inter-exploitations sur les périmètres du sud de La Réunion

Nom de la micro-zone		Conso d'eau moyenne[a]	Ecart-type conso.	Coef. de variation
A1-6	*Rideau*	9762	2727	0.28
A1-6-9	*Ravine des Cabris*	10846	4561	0.42
A2a-7	*Pierrefonds bas*	12483	4092	0.33
A2a-7 haut	*Pierrefonds haut*	11234	3524	0.31
A2b-6-8	*Ravine des Cabris bas*	8867	3903	0.44
A2b-7-14	*Monrepos bas*	11190	3425	0.31
A2b-7-8	*Monrepos haut*	12073	4305	0.36
A2b-8	*Ligne Paradis*	10262	4177	0.41
A2b-8 haut	*Ligne des Bambous*	10973	2702	0.25
A2b-8-9	*4 voies*	10104	1949	0.19
A3-8-9	*Bassin Plat haut*	8980	3937	0.44
A3-9	*Bassin Martin*	8414	3735	0.44
A3-9-10	*Terre Rouge haut*	10259	3065	0.30
A4-14	*Bassin Plat bas*	9377	3991	0.43
A5-10	*Grand Bois haut*	7428	2309	0.31
A5-10-14	*Grand Bois*	7475	2366	0.32
A6-10-14	*Anse les bas*	4847	1863	0.38
A6-11	*Petite Ile*	5197	2609	0.50
B1a-5-7	*St Louis les Aloes*	10111	3983	0.39
B1b-5	*Gol les Hauts*	6738	2494	0.37
B2-13	*Maniron - Le Lambert*	9276	2946	0.32
B2-13-5	*Bellevue*	9452	1784	0.19
B3-13	*Le Gol*	7007	2716	0.39
B5	*Pointe au Sel - Les Avirons*	6908	1731	0.25

Source : Chopart et al. (2006).
[a] moyenne des campagnes 1998/99 et 1999/00, en m^3/ha/an

valeur des paramètres observables dans la population ou mesurés sur l'échantillon. Un nombre minimal d'informations, allant de 30 à 50, est néanmoins toujours nécessaire afin de pouvoir appliquer le théorème central limite.

Si on imagine légitimes les approximations liées à la taille de l'échantillon ($n >> 0$

et $n << N$), si on décide par avance de calculer des estimations au niveau de confiance (1-α), et si on se fixe l'amplitude maximale tolérée pour les intervalles de confiance (précision requise) on constate dans les formules des indicateurs statistiques usuels que l'on doit pouvoir estimer que : pour l'estimation d'une moyenne, la taille d'échantillon recherchée dépend encore de la moyenne et de l'écart-type qui seront mesurés sur l'échantillon, pour l'estimation d'une proportion, la taille d'échantillon recherchée ne dépend plus que de la proportion mesurée sur l'échantillon, et que dans les deux cas, l'échantillon n'étant pas constitué, on ne dispose pas de ces éléments.

Pour notre enquête, on fixe une taille d'échantillon *supérieure à 100 observations* pour des raisons à la fois de représentativité statistique ($n >> 50$) et de contraintes de coût et de temps d'enquête (2 enquêtes/jour pour deux enquêteurs pendant deux mois). Cela correspond à 20 % de la base de sondage, soit un peu moins de 10 % de la population totale d'agriculteurs.

A.2 Stratégie d'échantillonnage

En théorie, deux méthodes d'échantillonnage sont possibles : aléatoire ou empirique. Le recours à la méthode aléatoire suppose que chaque exploitation agricole peut avoir une probabilité non nulle et connue (avant ou après l'enquête) d'appartenir à l'échantillon. La méthode d'échantillonnage à employer dépend donc de la qualité de la base de sondage. Dans l'idéal, la base de sondage doit être exhaustive. Dans notre

cas d'étude, cette condition n'est pas remplie et on privilégie la mise en œuvre d'une méthode empirique.

En effet, la base de sondage n'étant pas exhaustive, une méthode empirique est préférable pour construire l'échantillon et s'assurer ainsi de sa représentativité en fonction de quelques critères. La méthode des quotas est la méthode empirique la plus répandue [2].

La méthode des quotas consiste à construire l'échantillon sur la base des données disponibles en se posant les deux questions suivantes. Doit-on s'appuyer sur toutes les données disponibles ? Sur quelles données s'appuyer ? On suppose que si les variables étudiées sont corrélées aux critères de contrôle, alors le fait d'être représentatif sur les critères de contrôle va entraîner la représentativité sur les variables étudiées. Les critères de contrôle doivent donc être le plus possible corrélés aux variables étudiées. Il faut s'interroger sur les données disponibles. Sont-elles fiables ? Sont-elles non contestables ? Sont-elles récentes ? Généralement, les enquêtes ayant recours à la méthode des quotas n'utilisent pas plus de cinq critères de contrôle. Les critères de contrôle constituent généralement des strates [3]. Si le tirage de l'échantillon s'effectue par stra-

[2] Comme alternative à la méthode des quotas, on peut citer la méthode des itinéraires et la méthode des unités-types. La méthode des itinéraires consiste à choisir physiquement un certain nombre de points de départ du trajet que l'enquêteur doit effectuer. On lui impose ensuite son itinéraire. Pour chaque itinéraire, on donne des consignes très précises sur le sens de déplacement. Cette méthode fonctionne bien en milieu urbain, mais se révèle beaucoup plus dure à mettre en place en milieu rural. La méthode des unités-types consiste à interroger des individus qui sont supposés être caractéristiques de groupes d'individus. Cette méthode se prête mal à une analyse économétrique nécessitant un nombre assez important d'observations.

[3] Les critères de contrôle peuvent aussi être des grappes. Si le tirage de l'échantillon s'effectue

tification, alors on s'impose de tirer un échantillon dans chaque strate. Le choix des critères de stratification est fondamental et doit être le plus possible corrélé aux variables étudiées.

Pour notre enquête, nous choisissons la méthode des quotas avec un tirage par stratification. Deux stratifications sont envisagées : la première consiste à tenir compte de la dispersion géographique des exploitations au sein des périmètres et la deuxième consiste à tenir compte de l'écart relatif de la consommation d'eau au besoin théorique de l'exploitation.

Tab. A.3: Répartition des exploitations cannières irriguées par zone sur les périmètres du sud de la Réunion

Périmètre	Nombre d'exploitations	Proportion d'exploitations	Nb. de micro-zones concernées
Bras de la Plaine	376	0.73	18
Bras de Cilaos	139	0.27	6

Source : Chopart et al. (2006).

La variabilité des consommations réelles d'eau et des besoins sur les périmètres irrigués nous conduit à retenir un premier critère de stratification, lié à la dispersion géographique des exploitations, pour l'élaboration de notre échantillon. D'après le

en grappes, dans une grappe retenue, toutes les unités statistiques seront observées. Cette méthode pose des problèmes d'effet de grappe, d'homogénéité de la grappe, etc. Il est possible, lorsque cela est souhaitable, de combiner le tirage par stratification et le tirage en grappes.

tableau (A.3), les exploitations présentes dans la base de sondage sont environ 2.5 fois plus nombreuses sur le périmètre du Bras de la Plaine que le Bras de Cilaos. La base de sondage utilisée contient 515 exploitations, dont 376 (73 %) qui appartiennent au Bras de la Plaine et 139 (27 %) qui appartiennent au Bras de Cilaos. La dispersion géographique au sein de chaque périmètre est assez grande. Sur le Bras de la Plaine, les 376 exploitations se répartissent dans 18 micro-zones et sur le Bras de Cilaos, les 139 exploitations se répartissent dans 6 micro-zones.

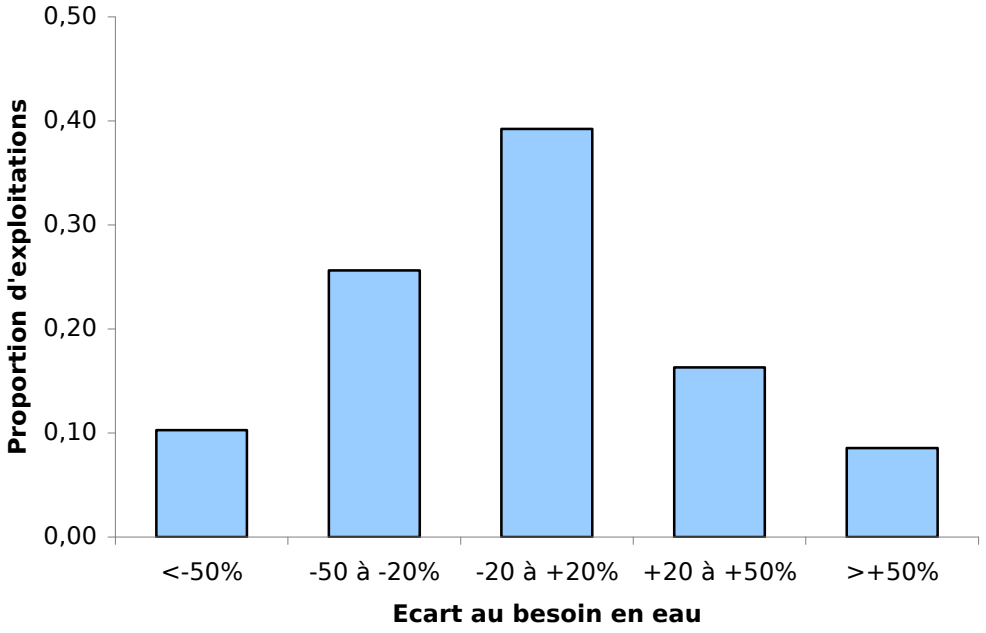


FIG. A.3: La fréquence des exploitations cannières irriguées en sous-consommation et sur-consommation d'eau

Les incertitudes sur le besoin théorique en eau d'irrigation, liées notamment aux approximations des paramètres d'entrée de l'outil de simulation des besoins et à la possible variabilité intra-zone de la RU, nous conduisent à retenir un deuxième cri-

tère de stratification pour la confection de notre échantillon lié à l'écart relatif de la consommation d'eau au besoin théorique des exploitations. D'après la figure (A.3), on relève ainsi que près de 40 % des exploitations ont une consommation d'eau conforme au besoin théorique, 36 % ont une sous-consommation apparente et un quart une consommation excessive.

Le tableau (A.4) confirme la bonne représentativité de l'échantillon concernant la dispersion géographique des exploitations. Notre échantillon est composé de 111 observations, dont 81 appartiennent au Bras de la Plaine (soit 73 % du nombre total) et 30 appartiennent au Bras de Cilaos (soit 27 % du nombre total). De plus, les exploitations de l'échantillon se répartissent dans 16 micro-zones (sur 18) appartenant au Bras de Plaine et 6 micro-zones (sur 6) appartenant au Bras de Cilaos.

Tab. A.4: Répartition des exploitations cannières enquêtées par zone sur les périmètres du sud de la Réunion

Périmètre	Nombre d'exploitations	Proportion d'exploitations	Nb. de micro-zones concernées
Bras de la Plaine	81	0.73	16
Bras de Cilaos	30	0.27	6

La figure (A.4) confirme la bonne représentativité de l'échantillon concernant l'écart relatif de la consommation d'eau au besoin théorique des exploitations. On relève ainsi que près de 40 % des exploitations ont une consommation d'eau conforme

au besoin thérique, plus de 30 % ont une sous-consommation apparente et un quart ont une consommation excessive. L'obtention de cette figure a cependant nécessité le déplacement du seuil de sur-consommation de +20 % à +30 % de l'écart relatif consommation-besoin. Il se pourrait alors que les sur-consommateurs d'eau soit légèrement sur-représentés dans notre échantillon.

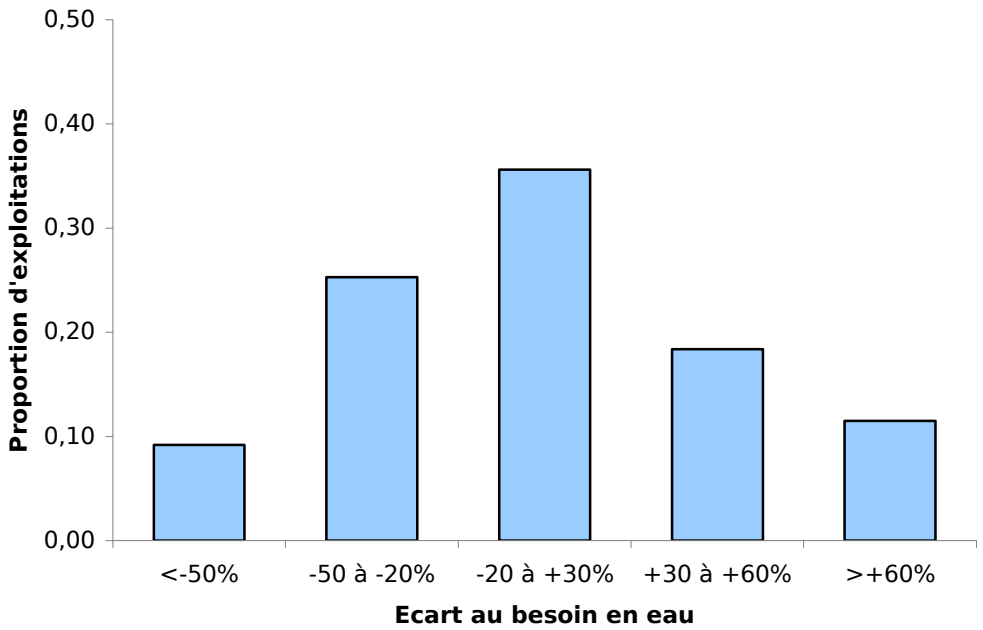


FIG. A.4: La fréquence des exploitations cannières enquêtées en sous-consommation et sur-consommation d'eau

Notons finalement que l'échantillonnage que nous avons réalisé a été contraint par l'accès aux coordonnées téléphoniques des irrigants, leur souhait de nous recevoir et leur disponibilité en période de coupe de la canne à sucre. L'accès aux coordonnées téléphoniques des agriculteurs de la base de sondage a contribué à réduire considérablement la base de sondage initiale. Quelques refus, parfois sans raison, de participer

à l'enquête ont été constatés parmi les agriculteurs contactés par téléphone. De plus, l'enquête s'est déroulée entre octobre et décembre 2006 et quelques agriculteurs n'ont pas pu se libérer à cause de la coupe de leurs cannes.

A.3 Recueil des données

A.3.1 Questionnaire

L'élaboration du questionnaire est une étape très importante. Les types d'erreur majeurs sont liés à la mémoire des individus interrogés et aux confusions possibles. Il existe plusieurs règles à suivre pour élaborer un questionnaire d'enquête. Il s'agit d'une part de poser les questions nécessaires et suffisantes et d'autre part de poser des questions auxquelles le répondant peut répondre. Le respect de ces règles dépend avant tout de la précision des axes de recherche. Au final, il ressort qu'il faut privilégier des questions précises, neutres et simples. Il s'agit alors de faire attention à la longueur du questionnaire, à l'ordre des questions, à la présentation du questionnaire, etc.

Le recueil des données peut être déclaratif ou observé (en situation). S'il est déclaratif, ce qui est le cas pour notre enquête, il peut être administré par un enquêteur ou auto-administré. Dans la mesure où l'enquêteur joue un rôle majeur dans l'incitation des gens à répondre, nous privilégions un questionnaire administré par un enquêteur. Les effets psycho-sociologiques sur les réponses liés à la présence d'un enquêteur peuvent parfois être considérés. Un questionnaire peut être administré par

un enquêteur de différentes façons : sur place, par téléphone, dans la rue, etc. Nous privilégions un questionnaire administré au sein même des exploitations pour deux raisons principales : environnement propice au recueil de réponses fiables et sincères ainsi que plus grande disponibilité des agriculteurs.

Nous avons privilégié des entretiens semi-directifs (combinaison de questions ouvertes et fermées) d'une heure environ afin de mettre l'agriculteur en confiance au moment de l'entretien. Cela nécessitait une connaissance parfaite du questionnaire et des variables attendues de la part des enquêteurs.

Le guide d'entretien se décompose en trois parties : une première partie consacrée aux caractéristiques de l'agriculteur et de son exploitation, une deuxième partie consacrée aux choix de matériel d'irrigation et une dernière partie consacrée au choix d'automatismes et aux pratiques d'irrigation. La figure (A.6) montre l'ensemble des questions abordées au cours de la première partie de l'entretien qui devait durer généralement de 15 à 20 minutes. Parmi ces questions, les questions relatives à la santé financière de l'agriculteur et de son exploitation (profitabilité de la canne à sucre, contraintes financières) n'ont en général pas reçu de réponses. La figure (A.7) illustre la deuxième partie du guide d'entretien consacrée au choix de matériel d'irrigation. Cette partie devait durer à peu près 30 minutes afin de répondre de manière très détaillée aux questions relatives au changement de matériel. Ce type de questions sollicite la mémoire des agriculteurs de façon assez importante, et une attention par-

ticulière a été donnée à la qualité de l'information concernant les différentes dates de changement. La figure (A.8) illustre la dernière partie du guide d'entretien consacrée au choix d'automatismes et aux pratiques d'irrigation. Cette partie devait durer à peu près 15 minutes et conclure l'entretien. On notera que les données concernant les doses d'eau apportées par les agriculteurs n'ont pas pu être exploitées car trop volatiles pour un même agriculteur.

A.3.2 Mise en œuvre

Le temps consacré à l'enquête, depuis sa conception jusqu'à la réalisation des premières analyses, fut d'environ neuf mois. Trois à quatre mois ont été nécessaires pour définir les axes de recherche, la taille d'échantillon et la stratégie d'échantillonnage. Trois mois ont ensuite été consacrés aux entretiens sur le terrain, et deux à trois mois ont été nécessaires pour le dépouillement des entretiens et la construction des variables.

L'enquête a été mise en œuvre d'octobre à décembre 2006. Deux enquêteurs (le concepteur de l'enquête et un élève ingénieur-agronome) ont administré le questionnaire aux agriculteurs. Une petite période de formation au questionnaire et à la conduite d'un entretien auprès des agriculteurs réunionnais fut nécessaire. Les moyens matériels nécessaires à cette enquête (frais de déplacement, frais de téléphone, outils mobilisés pour le recueil) ont été fournis par le CIRAD.

A.3.3 Variables récoltées

Les variables récoltées se décomposent en deux catégories. On a pu récolter, d'une part, les informations nécessaires à la construction de la figure (A.5) à partir de données individuelles. Elles concernent les choix réalisés par les agriculteurs concernant le matériel d'irrigation de 1990 à 2006. L'évolution du taux d'adoption agrégée des technologies d'irrigation a été analysée au cours du premier chapitre de cette thèse. L'évolution du taux d'adoption agrégée de l'aspersion en couverture intégrale a été analysée grâce à des méthodes économétriques au cours du deuxième chapitre.

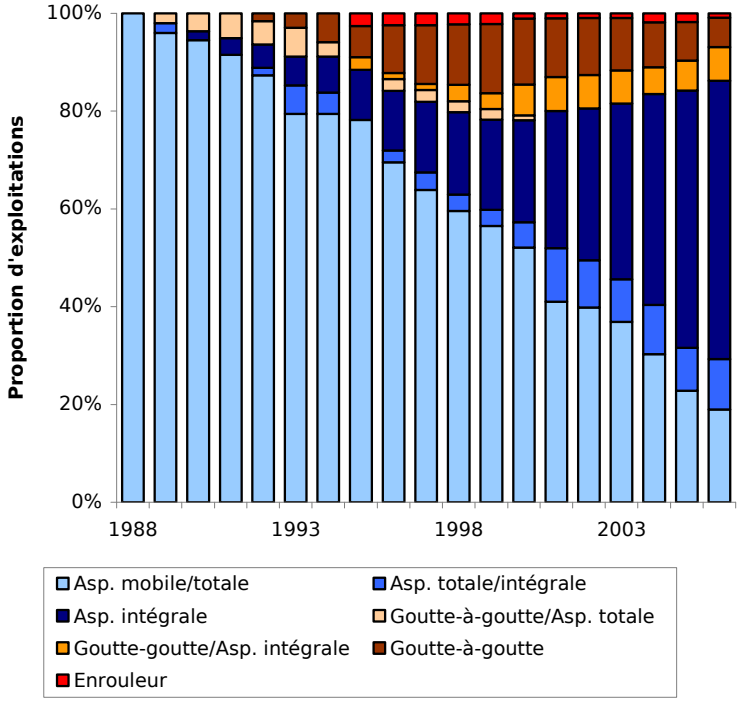


FIG. A.5: Les taux d'adoption des technologies d'irrigation sur les périmètres irrigués du sud, 1990-2006

D'autre part, cette enquête a permis de récolter les informations nécessaires à l'analyse du choix discret multiple concernant les technologies d'irrigation (matériel combiné aux outils de pilotage) à l'échelle d'une exploitation agricole et pour une année. Les variables utilisées dans le troisième chapitre de cette thèse, en plus des consommations d'eau individuelles fournies par la SAPHIR et des besoins en eau théoriques fournis par le CIRAD, sont regroupées dans le tableau (A.5) :

Tab. A.5: Aperçu des variables individuelles récoltées

Variable récoltée	*Nature de l'information*
Type de matériel d'irrigation	Qualitative
Type de vannes	Qualitative
Tour d'eau moyen	Quantitative
Surface de l'exploitation	Quantitative
Nombre d'actifs au sein de l'exploitation	Quantitative
Intensité de la diversification	Qualitative
Degré d'intensification de la canne	Qualitative
Appartenance à assoc. d'irrigants	Qualitative
Bénéfice d'un revenu extérieur	Qualitative

D'autres variables, qui n'ont pas été intégrées au modèle empirique estimé dans le troisième chapitre de cette thèse (après des tests économétriques ou à cause d'une trop forte corrélation avec la variable à expliquer) étaient néanmoins disponibles et ont servi à l'analyse des déterminants de la diffusion des technologies d'irrigation à l'île de la Réunion développée dans le premier chapitre. Parmi ces variables, sont

notamment disponibles : le niveau de formation initiale et continue des agriculteurs, le type de conseil à l'irrigation reçu, l'appartenance à un syndicat et le statut foncier de l'exploitation.

- Guide d'entretien -
Freins et motivations des agriculteurs à l'adoption de nouvelles techniques et pratiques d'irrigation (CIRAD / SAFER / SAPHIR / CA)

Date d'enquête :
Zone pédoclimatique de l'exploitation :
Bornes SAPHIR de l'exploitation :

Partie 1 (15 min): Caractéristiques de l'agriculteur et de son exploitation

- Nom, prénom
- Année de naissance
- Année d'installation
- Mode(s) d'accès au foncier (SAFER, héritage, autres)
- Surface irriguée (évolution en hectares)
- Surface en pluvial (évolution en hectares)
- Surface en canne à sucre (irriguée / non irriguée en hectares)
- Surface en maraîchage (en hectares)
- Surface en arboriculture (en hectares)
- Elevage (bœufs, cabris, poulets, porcs, autres)
- Autres activités agricoles de diversification (foin, autres)
- Nombre d'actifs permanents
- Nombre d'actifs temporaires (y compris les aides familiales)
- Productivité en canne à sucre (en tonne par hectare)
- Quantité d'engrais utilisé (en tonne par hectare)
- Profitabilité de la culture de la canne à sucre
- Contraintes financières (fermage, crédits divers)
- Revenu extérieur à l'agriculture (pour la famille)
- Formation initiale
- Réseau social (associations, syndicats, autres)

- 1 -

FIG. A.6: Guide d'entretien, partie 1

- Guide d'entretien -
Freins et motivations des agriculteurs à l'adoption de nouvelles techniques et pratiques d'irrigation (CIRAD / SAFER / SAPHIR / CA)

Partie 2 (30 min) : Choix d'équipements pour l'irrigation

- Matériel d'irrigation à l'origine
- Evolution du matériel

	Matériel adopté	Matériel abandonné	Surface + culture	Fournisseur	Mode de financement	Motivation principale au changement
1er changement (date)						
2ème changement (date)						
3ème changement (date)						

- Situation au moment de l'enquête (type de matériel / surface / culture)
- Contrainte principale en cas d'aucun changement
- Observations (prescripteurs du changement)

- 2 -

FIG. A.7: Guide d'entretien, partie 2

- Guide d'entretien -
Freins et motivations des agriculteurs à l'adoption de nouvelles techniques et pratiques d'irrigation (CIRAD / SAFER / SAPHIR / CA)

Partie 3 (15 min): Choix d'automatismes et pratiques d'irrigation

	Nb de vannes manuelles	Nb de vannes volumétriques
Matériel 1		
Matériel 2		

- Système de programmation centralisé
- Mode de financement des automatismes

	Période
Conseil sophistiqué Irricanne-Osiri	
Conseil simplifié à l'ETM	

- Formation aux techniques de l'irrigation (BEPA, stages)

	Nb de positions d'irrigation par jour	Durée de la position (en heures)	Durée du tour d'eau (en jours)
Matériel 1			
Matériel 2			

- Nombre d'heures / jour consacrées à l'irrigation
- Sevrage moyen (en mois)
- Observations (critères de déclenchement de l'irrigation)

- 3 -

FIG. A.8: Guide d'entretien, partie 3

Bibliographie

1. Amemiya T., 1981. "Qualitative Response Models : A Survey", *Journal of Economic Literature*, vol 19, pp. 1483-1536.

2. Amigues J-P., Debaeke P., Itier B., Lemaire G., Seguin B., Tardieu F. et Thomas A., 2006. "Sécheresse et agriculture. Réduire la vulnérabilité de l'agriculture à un risque accru de manque d'eau", Expertise scientifique collective, synthèse du rapport, INRA, 72 p.

3. Bass F. M., 1969. "A New Product Growth for Model Consumer Durables", *Management Science*, vol. 15, pp. 215-227.

4. Bass F. M., 1980. "The Relationship Between Diffusion Rates, Experience Curves, and Demand Elasticities for Consumer Durable Technological Innovations", *Journal of Businness*, vol. 53, pp. 551-567.

5. Beers C. V., Van Den Bergh J. C, De Moor A. and Oosterhuis F., 2007. "Determining the Environmental Effects of Indirect Subsidies : Integrated Method and Application to the Netherlands", *Applied Economics*, vol. 39, pp. 2465-2482.

6. Berg S. and Lin C., 2007.“Consistency in Performance Rankings : The Peru Water Sector”, *Applied Economics*, vol. 40, pp. 793-805.

7. Berger T., 2001. “Agent-Based Spatial Models Applied to Agriculture : A Simulation Tool for Technology Diffusion, Resource Use Changes and Policy Analysis”, *Agricultural Economics*, vol. 25, pp. 245-260.

8. Besley T. and Case A., 1993. “Modeling Technology Adoption in Developing Countries”, *The American Economic Review*, vol. 83, pp. 396-402.

9. Binet M-E., Carlevaro F., Durand S. et Paul M., 2006. “Estimation de la demande d’eau potable à La Réunion sur données d’enquête”, Papier présenté au 55ème congrès de l’AFSE, Paris, France.

10. Boussard J-M., 1987. *Economie de l’agriculture*, Economica, Paris.

11. Brock W. A. and Durlauf S. N., 2001. “Interactions-Based Models”, Chapter 54 in *Handbook of Econometrics*, vol. 5, pp. 3297-3380, Heckman J. J. and Leamer E., eds, North Holland.

12. Bromley D. W., 1982. “Land and Water Problems : An Institutional Perspective”, *American Journal of Agricultural Economics*, vol. 64, pp. 834-844.

13. Carey J. M. and Zilberman D., 2002. “A Model of Investment under Uncertainty : Modern Irrigation Technology and Emerging Markets in Water”, *American Journal of Agricultural Economics*, vol. 84, pp. 171-183.

14. Carrillo-Hermosilla J., 2005. “A Policy Approach to the Environmental Impacts of Technological Lock-in”, *Ecological Economics*, vol. 58, pp. 717-742.

15. Caswell M. and Zilberman D., 1985. “The Choices of Irrigation Technologies in California”, *American Journal of Agricultural Economics*, vol. 67, pp. 224-234.

16. Caswell M. and Zilberman D., 1986. “The Effects of Well Depth and Land Quality on the Choice of Irrigation Technology”, *American Journal of Agricultural Economics*, vol. 68, pp. 798-811.

17. Caswell M., Lichtenberg E. and Zilberman D., 1990. “The Effects of Pricing Policies on Water Conservation and Drainage”, *American Journal of Agricultural Economics*, vol. 72, pp. 883-890.

18. Chastel J-M., 1969. “Choix du matériel d’irrigation - Aspects économiques”, Document de travail CIRAD – IRAT, 6 p.

19. Chatterjee R. and Eliashberg J., 1990. “The Innovation Diffusion Process in a Heterogeneous Population : A Micromodeling Approach”, *Management Science*, vol. 36, pp. 1057-1079.

20. Chopart J-L., Fusillier J-L., Le Mézo L., Mézino M., Richefort L. et Cornu C., 2006. “Variabilité des consommations en eau d’irrigation en culture de canne à sucre dans les périmètres du sud de la Réunion (Bras de la Plaine, Bras de Cilaos) - Rôle des facteurs pédo-climatiques et des modes d’irrigation”, Rapport scientifique CIRAD, 36 p.

21. Chow G. C., 1967. “Technological Change and the Demand for Computers”, *American Economic Review*, vol. 57, pp. 1117-1130.

22. Couture S., 2000. “Aspects dynamiques et aléatoires de la demande en eau d’irrigation”, Thèse de Doctorat, Université des Sciences Sociales de Toulouse.

23. Cramer J. S., 2003. “The Origins and Development of the Logit Model”, Chapter 9 of *Logit Models from Economics and Other Fields*, Cramer J. S., Cambridge University Press, London.

24. David P. A., 1969. “A Contribution to the Theory of Diffusion”, Stanford Center for Research in Economic Growth, Memorandum 71.

25. David P. A., 1985. “Clio and the Economics of QWERTY”, *American Economic Review*, vol. 75, pp. 332-337.

26. Davies S., 1979. *The Diffusion of Process Innovations*, Cambridge University Press, London.

27. Dinar A. and Yaron D., 1992. “Adoption and Abandonment of Irrigation Technologies”, *Agricultural Economics*, vol. 6, pp. 315-332.

28. Dixit A. K. and Pindyck R. S., 1994. *Investment under Uncertainty*, Princeton University Press, Princeton.

29. Dixon R., 1980. “Hybrid Corn Revisited”, *Econometrica*, vol. 48, pp. 1451-1461.

30. Dodson J. A., Muller J. and Muller E., 1978. “Models of New Product Diffusion through Advertising and Word-of-Mouth”, *Management Science*, vol. 24, pp. 1568-1578.

31. Domencich T. A. and McFadden D., 1975. *Urban Travel Demand : A Behavioural Analysis*, North Holland.

32. Dosi G., 1988. "Sources, Procedures, and Microeconomic Effects of Innovation", *Journal of Economic Literature*, vol. 26, pp. 1120-1171.

33. Dumanois J., 2003. "Utilisation d'un modèle d'offre agricole pour évaluer des alternatives de gestion de l'eau sur les périmètres irrigués du sud de l'île de la Réunion", Mémoire de DAA, INA Paris-Grignon – CIRAD – CEMAGREF, 54 p.

34. Easingwood C. J., Mahajan V. and Muller E., 1983. "A Nonuniform Influence Innovation Diffusion Model of New Product Acceptance", *Marketing Science*, vol. 2, pp. 273-295.

35. Farolfi S. et Montaigne E., 2001. "La politique environnementale dans l'industrie viti-vinicole méridionale : le cas de la pollution des eaux résiduaires", *Revue d'Économie Industrielle*, vol. 96, pp. 1-24.

36. Farolfi S. et Tidball M., 2002. "Instruments économiques de politique environnementale et choix technique du pollueur : le traitement des eaux résiduaires dans l'industrie de vinification", *Cahiers d'Économie et Sociologie Rurales*, vol. 64, pp. 84-109.

37. Feder G., 1980. "Farm Size, Risk Aversion and the Adoption of New Technology under Uncertainty", *Oxford Economic Papers*, vol. 32, pp. 263-283.

38. Feder G., Just R. E. and Zilberman D., 1985. “Adoption of Agricultural Innovations in Developing Countries : A Survey”, *Economic Development and Cultural Change*, vol. 33, pp. 255-298.

39. Feder G. and Umali D. L., 1993. “The Adoption of Agricultural Innovations : A Review”, *Technological Forecasting and Social Change*, vol. 43, pp. 255-298.

40. Ferraris S., 2002. “Construction d’un modèle d’offre agricole”, Mémoire de DAA, ENSA Rennes – CIRAD – CEMAGREF, 67 p.

41. Fishelson G. and Rymon D., 1989. “Adoption of Agricultural Innovation : The Case of Drip Irrigation of Cotton in Israel”, *Technological Forecasting and Social Change*, vol. 35, pp. 375-382.

42. Fusillier J-L., 2006. “Les systèmes de production agricole et leurs fonctions de demande en eau sur les périmètres irrigués du sud de la Réunion (Bras de la Plaine et Bras de Cilaos) – Approche par la modélisation économique des exploitations”, Rapport scientifique CIRAD, 33 p.

43. Fusillier J-L. and Laffond J-M., 2004. “Institutional Change in Water Management in Reunion Island. The Implementation of a Negociation Procedure - the *SAGE* Tool - to Design a Local Policy at Basin Level”, Proceeding of the International Workshop on Water Resource Management for Local Development, 8-11 November, Loskop Dam, South Africa, 10 p.

44. Fusillier J-L. et Saqué C., 2003. “Stratégies de production agricole et

demande en eau d'irrigation – Une approche de la diversité des irrigants du sud de l'île de la Réunion", In *Eau et littoral : Préservation et valorisation de la ressource dans les espaces insulaires*, pp 129-145, Ferraris S. et Point P., eds, Karthala, Paris.

45. García-Valiñas M. A and Muñiz M. A., 2007. "Is DEA Useful in the Regulation of Water Utilities ? A Dynamic Efficiency Evaluation of Water Utilities", *Applied Economics*, vol. 39, pp. 245-252.

46. Gaudin S., 2006. "Effect of Price Information on Residential Water Demand", *Applied Economics*, vol. 38, pp. 383-393.

47. Geroski P. A., 2000. "Models of Technology Diffusion", *Research Policy*, vol. 29, pp. 603-625.

48. Glaister S., 1974. "Advertising Policy and Returns to Scale in Markets where Information is Passed between Individuals", *Economica*, vol. 41, pp. 139-156.

49. Green G., Sunding D., Zilberman D. and *Parker D.*, 1996. "Explaining Irrigation Technology Choices : A Microparameter Approach", *American Journal of Agricultural Economics*, vol. 78, pp. 1064-1072.

50. Greene W. H., 2000. *Econometric Analysis*, Fourth Edition, Prentice Hall International, New Jersey.

51. Griliches Z., 1957. "Hybrid Corn : An Exploration in the Economics of Technological Change", *Econometrica*, vol. 25, pp. 501-522.

52. Griliches Z., 1980, "Hybrid Corn Revisited : A Reply", *Econometrica*, vol. 48, pp. 1463-1465.

53. Groom B., Koundouri P., Nauges C. and Thomas A., 2008. "The Story of the Moment : Risk Averse Cypriot Farmers Respond to Drought Management", *Applied Economics*, vol. 40, pp. 315-26.

54. He X-F., Cao H. and Li F-M., 2007. "Econometric Analysis of the Determinants of Adoption of Rainwater Harvesting and Supplementary Irrigation Technology (RHSIT) in the semiarid Loess Plateau of China", *Agricultural Water Management*, vol. 89, pp. 243-250.

55. Hernes G., 1976. "Diffusion and Growth - The Non-Homogeneous Case", *The Scandinavian Journal of Economics*, vol. 78, pp. 427-436.

56. Hewitt J. A. et Hanemann W. M., 1995. "A Discrete/Continuous Choice Approach to Residential Water Demand under Block Rate Pricing", *Land Economics*, vol. 71, pp. 173-192.

57. Horsky D., 1990, "A Diffusion Model Incorporating Product Benefits, Price, Income and Information", *Marketing Science*, vol. 9, pp. 342-365.

58. Horsky D. and Simon L. S., 1983. "Advertising and the Diffusion of New Products", *Marketing Science*, vol. 2, pp. 1-17.

59. Jaffe A. B. and Stavins R. N., 1991. "Evaluating the Relative Effectiveness of Economic Incentives and Direct Regulation for Environmental Protection : Impacts on the Diffusion of Technology", Center for Science and Internatio-

nal Affairs, Discussion Paper 91-1, Kennedy School of Government, Harvard University, 24 p.

60. Jaffe A. B., Newell R. G. and Stavins R. N., 2003. "Technological Change and the Environment", Chapter 11 in *Handbook of Environmental Economics*, vol. 1, pp. 461-516, Mäler K. G. and Vincent J. R., eds, North Holland.

61. Jarvis L. S., 1981. "Predicting the Diffusion of Improved Pastures in Uruguay", *American Journal of Agricultural Economics*, vol. 63, pp. 495-502.

62. Jensen R., 1982. "Adoption and Diffusion of an Innovation of Uncertain Profitability", *Journal of Economic Theory*, vol. 27, pp. 182-192.

63. Just R. E., 1973. "An Investigation of the Importance of Risk in Farmers' Decisions", *Amerian Journal of Agricultural Economics*, vol. 56, pp. 14-25.

64. Just R. E. and Zilberman D., 1983. "Stochastic Structure, Farm Size and Technology Adoption in Developing Agriculture", *Oxford Economic Papers*, vol. 35, pp. 307-328.

65. Kalish S., 1985. "A New Product Adoption Model with Price, Advertising, and Uncertainty", *Management Science*, vol. 31, pp. 1569-1585.

66. Kalish S. and Lilien G. L., 1983. "Optimal Price Subsidy Policy for Accelerating the Diffusion of Innovation", *Marketing Science*, vol. 2, pp. 407-420.

67. Karshenas M. and Stoneman P., 1992. "A Flexible Model of Technological Diffusion Incorporating Economic Factors with an Application to the Spread

of Colour Television Ownership in the UK", *Journal of Forecasting*, vol. 11, pp. 577-601.

68. Kemp R., 1997. *Environmental Policy and Technical Change - A Comparison of the Technological Impact of Policy Instruments*, Edward Elgar Publishing Limited, Cheltenham.

69. Khanna M., Isik M. and Zilberman D., 2002. " Cost-Effectiveness of Alternative Green Payment Policies for Conservation Technology Adoption with Heterogeneous Land Quality", *Agricultural Economics*, vol. 27, pp. 157-174.

70. Khanna M. and Zilberman D., 1997. "Incentives, Precision Technology and Environmental Protection", *Ecological Economics*, vol. 23, pp. 25-43.

71. Koundouri P., Nauges C. and Tzouvelekas V., 2006. "Technology Adoption under Production Uncertainty : Theory and Application to Irrigation Technology", *American Journal of Agricultural Economics*, vol. 88, pp. 657-670.

72. Lakhani H., 1975. "Diffusion of Environment-Saving Technological Change - A Petroleum Refining Case Study", *Technological Forecasting and Social Change*, vol. 7, pp. 33-55.

73. Lamy M-L., 2004. "Efficacité des politiques environnementales d'incitation à l'adoption de nouvelles techniques : le cas des énergies renouvelables", Thèse de Doctorat, Université de Grenoble.

74. Lekvall P. and Wahlbin C., 1973. "A Study of Some Assumptions Underlying Innovation Diffusion Functions", *The Swedish Journal of Economics*,

vol. 75, pp. 362-377.

75. Loehman E. and Dinar A., 1994. “Cooperative Solution of Local Externality Problems : A Case of Mechanism Design Applied to Irrigation”, *Journal of Environmental Economics and Management*, vol. 26, pp. 235-256.

76. Mahajan V., Sharma S. and Bettis R. A., 1988. “The Adoption of the M-Form Organizational Structure : A Test of Imitation Hypothesis”, *Management Science*, vol. 34, pp. 1188-1201.

77. Mansfield E., 1961. “Technological Changes and the Rate of Imitation”, *Econometrica*, vol. 29, pp. 741-766.

78. Margat J. et Tiercelin J-R. (coordonnateurs), 1998. *L'eau en questions*, Editions Romillat, Paris.

79. Marshall G. R., 2004. “Farmers Cooperating in the Commons ? A Study of Collective Action in Salinity Management”, *Ecological Economics*, vol. 51, pp. 271-286.

80. Montaigne E., 1997. “Théorie évolutionniste, dynamique technologique et SADA”, Programme FAO Approvisionnement et distribution alimentaires des villes, Série Aliments dans les villes, DT/20-97, FAO – INRA, 23 p.

81. Montginoul M., 1997. “Une approche économique de la gestion de l'eau d'irrigation : des instruments, de l'information et des acteurs”, Thèse de Doctorat, Université de Montpellier I.

82. Moore M. R., Gollehon N. R. and Carey M. B., 1994. "Multicrop Production Decisions in Western Irrigated Agriculture : The Role of Water Price", *American Journal of Agricultural Economics*, vol. 76, pp. 859-874.

83. Nauges C., 1999. "La consommation d'eau potable en France : Analyse économétrique de la demande domestique", Thèse de Doctorat, Université des Sciences Sociales de Toulouse.

84. Nauges C et Reynaud A., 2001. "Estimation de la demande domestique d'eau potable en France", *Revue Economique*, vol. 52, pp. 167-185.

85. Nelson R. R. and Winter S. G., 1974. "Neoclassical vs. Evolutionary Theories of Economic Growth : Critique and Prospectus", *The Economic Journal*, vol. 84, pp. 886-905.

86. Nelson R. R. and Winter S. G., 1982. *An Evolutionary Theory of Economic Change*, The Belknap Press of Harvard University Press, Cambridge.

87. Perret S. R. and Stevens J. B., 2006. "Socio-Economic Reasons for the Low Adoption of Water Conservation Technologies by Smallholder Farmers in Southern Africa : A Review of the Literature", *Development Southern Africa*, vol. 23, pp. 461-476.

88. Richefort L., 2008. "La diffusion de technologies d'irrigation économes en eau à l'île de la Réunion", *Revue d'Économie Regionale et Urbaine*, vol. 1, pp. 109-130.

89. Richefort L., Farolfi S. and Fusillier J-L., 2007. "Diffusion of Modern Irrigation Technologies in Reunion Island : An Evolutionary Approach", In Papers of Sustainable Innovation 07, pp. 164-174, The Center for Sustainable Design, 29th-30th October, Farnham, UK.

90. Rieul L., 1997. "Techniques d'irrigation de l'avenir et leur coût", CIHEAM - Options Méditerranéennes, Sér. A/n°31, pp. 233-251.

91. Rogers E. M., 1962. *Diffusion of Innovations*, The Free Press, New York.

92. Ryan B. and Gross N. C., 1943. "The Diffusion of Hybrid Seed Corn In Two Iowa Communities", *Rural Sociology*, vol. 8, pp. 15-24.

93. Schmittlein D. C. and Mahajan V., 1982. "Maximum Likelihood Estimation for an Innovation Diffusion Model of New Product Acceptance", *Marketing Science*, vol. 1, pp. 57-78.

94. Schoengold K., Sunding D. L. and Moreno G., 2005. "Price Elasticity Reconsidered : Panel Estimation of an Agricultural Water Demand Function", *Water Resources Research*, vol. 42, pp. 411-421.

95. Schuck E. C., Marshall Frasier W., Webb R. S., Ellingson L. J. and Umberger W. J., 2005. "Adoption of More Technically Efficient Irrigation Systems as a Drought Response", *Water Resources Development*, vol. 21, pp. 651-662.

96. Shresta R. B. and Gopalakrishnan C., 1993. "Adoption and Diffusion of Drip Irrigation Technology : An Econometric Analysis", *Economic Develop-*

ment and Cultural Change, vol. 41, pp. 407-418.

97. Simon H. A., 1959. "Theories of Decision-Making in Economics and Behavioral Science", *American Economic Review*, vol. 49, pp. 253-283.

98. Srinivasan V. and Mason C. H., 1986. "Nonlinear Least Squares Estimation of New Product Diffusion Models", *Marketing Science*, vol. 5, pp. 169-178.

99. Sumpsi J. M., Amador F. and Romero C., 1996. "On Farmers' Objectives : A Multi-Criteria Approach", *European Journal of Operational Research*, vol. 96, pp. 64-71.

100. Sunding D., 2002. "The Economics of Agricultural Water Use and the Role of Prices", Paper Prepared for the National Academy of Sciences, Washington, 38 p.

101. Sunding D. and Zilberman D., 2001. "The Agricultural Innovation Process : Research and Technology Adoption in a Changing Agricultural Sector", Chapter 4 in *Handbook of Agricultural Economics*, vol. 1, pp. 207-261, Gardner B. L. and Rausser G. C., eds, North Holland.

102. Tarde G., 1890. *Les lois de l'imitation*, Editions Kimé, Paris.

103. Tsur Y., Sternberg M. and Hochman E., 1990. "Dynamic Modelling of Innovation Process Adoption with Risk Aversion and Learning", *Oxford Economic Papers*, vol. 42, pp. 336-355.

104. Tzouvelekas V., Giannakas K., Midmore P. and Mattas K., 1999. "Decomposition of Olive Oil Production Growth into Productivity and Size

Effects : A Frontier Production Function Approach ", *Cahiers d'Économie et Sociologie Rurales*, vol. 51, pp. 5-21.

105. Vatn A., 2005. " Rationality, Institutions and Environmental Policy ", *Ecological Economics*, vol. 55, pp. 203-217.

106. Yaron D., Dinar A. and Voet H., 1992. " Innovations on Family Farms : the Nazareth Region in Israel ", *American Journal of Agricultural Economics*, vol. 74, pp. 361-370.