



**Les systèmes de production agricoles 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**

J-L. Fusillier CIRAD UMR G-Eau
T. Rieu ENGREF UMR G-Eau
J. Dumanois Stagiaire INAPG
S. Ferraris Stagiaire ENSAR

Décembre 2006

Avant propos

Le présent document constitue la synthèse d'une partie des activités réalisées au sein du projet de recherche « Approche économique de l'irrigation à l'île de la Réunion », projet AD603 de la convention pluriannuelle 2000-2006 entre le CIRAD, la Région Réunion et l'Etat. Outre ces trois partenaires, ce projet a bénéficié d'un soutien financier de l'Union européenne (Mesure Feoga K6-01)

Cette synthèse porte sur le volet concernant la modélisation économique des exploitations agricoles des périmètres irrigués du sud qui a reçu un appui technique et financier du Programme Commun Systèmes Irrigués CIRAD-CEMAGREF-IRD. Elle complète la synthèse d'un volet agro-technique et climatique réalisé en collaboration avec le projet « Amélioration de l'efficacité de l'eau en culture de canne à sucre » et qui porte sur la « Variabilité des consommations d'eau d'irrigation en culture de canne à sucre dans les périmètres du sud de la Réunion - Rôle des facteurs pédo-climatiques et des modes d'irrigation ».

Sommaire

Les systèmes de production agricoles 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

	page
Introduction.....	1
1. Le contexte de la gestion de l'eau dans les périmètres irrigués du sud.....	2
1.1 Un fragile équilibre entre les besoins et ressources en eau dans le bassin hydrographique du Sud, avec des risques de pénurie dans l'avenir	2
1.2 Les conditions de distribution de l'eau d'irrigation: un système « à la demande » sauf en période limitante sur le périmètre du Bras de la Plaine (système « de tour d'eau »)	4
1.3 La tarification de l'eau d'irrigation, un instrument de gestion de la ressource négocié	5
2. Caractérisation du principal usage de l'eau : Les systèmes de culture en canne à sucre irriguée.....	8
2.1 Une grande diversité des milieux et des besoins en eau de la canne	8
2.2 Place de la canne à sucre dans l'assolement des périmètres irrigués et facteurs de différenciation au sein des systèmes canniers	10
2.3 Aperçu des pratiques d'irrigation	12
2.4 Estimation de l'impact des modes d'irrigation et des coupures sur la consommation en eau et la satisfaction des besoins de la canne par le modèle Five-Core	13
2.5 Estimation de l'impact des modes d'irrigation et des rationnements en eau sur le rendement de la canne par le modèle Mosaic	19
2.6 Synthèse de la diversité des systèmes canniers et référentiel économique	21
3. Les usagers irrigants et leurs systèmes de production à l'échelle de l'exploitation.....	24
3.1 De fortes disparités entre les irrigants	24
3.2 Typologie des systèmes de production irrigués d'après les structures et stratégies des exploitations	25
4. Formalisation des comportements des irrigants par un modèle d'offre au niveau de l'exploitation agricole.....	30
4.1 Objectif et principes de la modélisation de l'exploitation	30
4.2 Le champ de la modélisation : les systèmes de type canniers en monoculture et diversifiés en production végétale	30
4.3 Les opportunités de productions du modèle d'exploitation	31
4.4 Les contraintes sur les ressources du système et l'achat de facteurs de production	32
4.5 Prise en compte du risque	33
5 Résultats des modèles: bases optimales de production et fonctions de demande en eau des exploitations.....	34
5.1 Pertinence et limites du modèle générique d'exploitation décrivant les types canniers monoculteurs et diversifiés	34
5.2 Bases optimales de production : assolement et allocation des ressources	35
5.3 La sensibilité des modèles par système- type au prix de l'eau: les fonctions de demande en eau	41
Conclusion Synthèse sur l'impact de variations du prix de l'eau sur les systèmes de production irrigués.....	46

INTRODUCTION Des périmètres irrigués confrontés à un double défi : améliorer la valorisation de la ressource en eau tout en préservant les petites exploitations cannières

L'aménagement de périmètres irrigués sur la côte sous le vent constitue depuis trois décennies une priorité du développement agricole à la Réunion. Cette extension de l'irrigation a permis d'une part, l'intensification de la culture de la canne, indispensable à la survie de la filière sucre menacée par l'urbanisation qui capte progressivement ses surfaces. D'autre part, elle a conforté la diversification dans le maraîchage et l'arboriculture dans les bas, contribuant à améliorer l'autoapprovisionnement de l'île. L'intensification des systèmes de culture, notamment par l'irrigation dans les zones sèches paraît la seule voie pour consolider des petites exploitations sans possibilité d'extension foncière. L'agriculture irriguée couvre ainsi actuellement 10.000 ha et à terme 15.000 ha ce qui représentera alors un tiers de la surface agricole de l'île et environ 40% de la production de canne. Avec près de 100 Mm³/an mobilisés, l'agriculture représente près de la moitié des prélèvements d'eau.

Aujourd'hui les rapports entre agriculture et ressource en eau sont questionnés par la montée des concurrences inter et intra sectorielles entre usages agricoles, urbains et industriels, ainsi que par l'intérêt renouvelé pour la protection des milieux aquatiques. L'apparente abondance de la ressource en eau liée à la forte pluviométrie à la Réunion est trompeuse car cette ressource est mal répartie dans l'espace et dans le temps et sa mobilisation, par transfert vu les obstacles physiques au stockage, présente un coût très lourd. L'intérêt porté à la gestion de l'eau est renforcé par deux éléments de contexte nouveaux. D'une part la prochaine mise en œuvre de la Directive Cadre Européenne sur l'Eau qui fait obligation aux Etats d'assurer un bon état écologique des masses d'eau aura des répercussions sur la gestion quantitative puisqu'elle contribuera à redéfinir les débits d'étiage des rivières. D'autre part, l'hypothèse qui semble se confirmer d'un changement climatique, fait craindre une variabilité croissante du climat avec une fréquence accrue des épisodes de sécheresse pouvant induire des pénuries d'eau.

Le bassin Sud de la Réunion est particulièrement concerné par ces interrogations sur les risques de pénurie d'eau et l'agriculture, principal usage, est questionnée sur sa capacité à valoriser au mieux la ressource. L'usage agricole de l'eau présente aussi un enjeu social important dans le sud car l'irrigation constitue un facteur de production vital pour plus d'un millier de petits agriculteurs ainsi que pour la pérennité de l'usine sucrière, donc du bassin cannier du sud dans sa globalité.

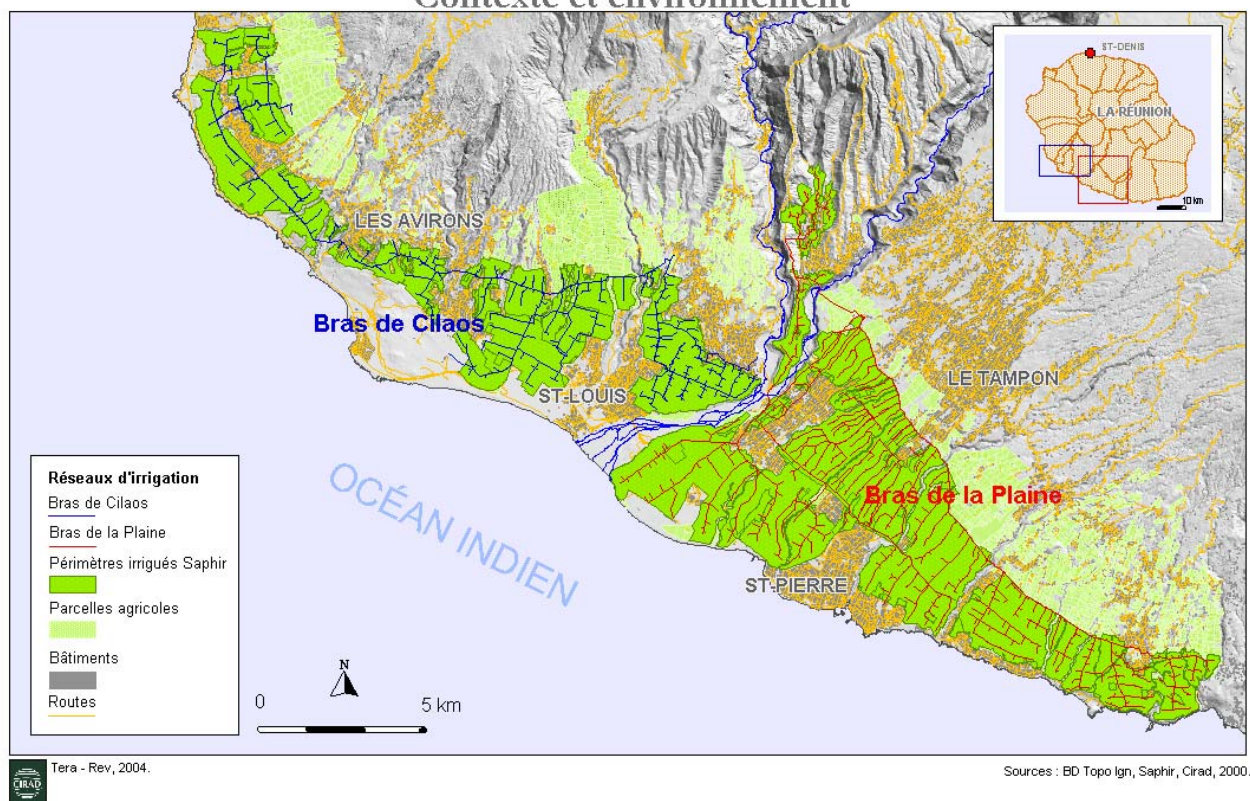
La présente synthèse porte sur les déterminants et les impacts du comportement des usagers irrigants dans un contexte complexe de tension entre des objectifs de croissance de la production agricole (canne à sucre) et des incitations à la modération des consommations d'eau. Plus précisément, notre objet est d'évaluer l'incidence des instruments de régulation de l'usage de l'eau que sont la tarification et les restrictions de volume en saison chaude, sur les exploitations agricoles des périmètres irrigués. Cette question nous conduit à caractériser les systèmes de production, leurs stratégies et leurs besoins en eau, puis à explorer leurs réponses possibles à des changements des conditions d'offre en eau. Les fonctions de demande en eau des irrigants par rapport au prix seront notamment estimées en recourant à un modèle économique d'optimisation.

I LE CONTEXTE DE GESTION DE LA RESSOURCE EN EAU DANS LES PERIMETRES IRRIGUES DU SUD

1.1 Un fragile équilibre entre les besoins et ressources en eau dans le bassin hydrographique du Sud, avec des risques de pénurie dans l'avenir

Les périmètres irrigués du Bras de la Plaine et du Bras de Cilaos couvrent, sur 7000 ha, la plus grande partie de la bande littorale (jusqu'à une altitude de 400 m) du bassin hydrographique du Sud, tel que délimité par le SAGE. Dans ce bassin, l'agriculture est le principal usage de l'eau ; l'irrigation mobilise autour de 70 Mm³/an (pertes sur réseau comprises) ce qui représente les deux tiers de l'ensemble des prélèvements (SAGE, 2001 – hydroélectricité non comprise car cet usage restitue l'eau au milieu en aval). L'alimentation en eau potable constitue l'autre usage important du bassin avec un prélèvement d'environ 40 Mm³/an.

Situation des périmètres irrigués du sud de l'île de la Réunion
Contexte et environnement



Carte 1 Situation des périmètres irrigués du Bras de la Plaine et du Bras de Cilaos

La satisfaction de ces usages est confrontée à deux problèmes : la ressource en eau est actuellement tout juste suffisante pour couvrir les besoins de pointe en période d'été (de novembre à mai) ce qui conduit lors des années sèches à des ruptures d'approvisionnement pour l'irrigation (cf figure 1). La ressource mobilisée est à 70% de l'eau de surface ce qui peut causer des problèmes de qualité et entraîne notamment des ruptures de service en période de crues des rivières.

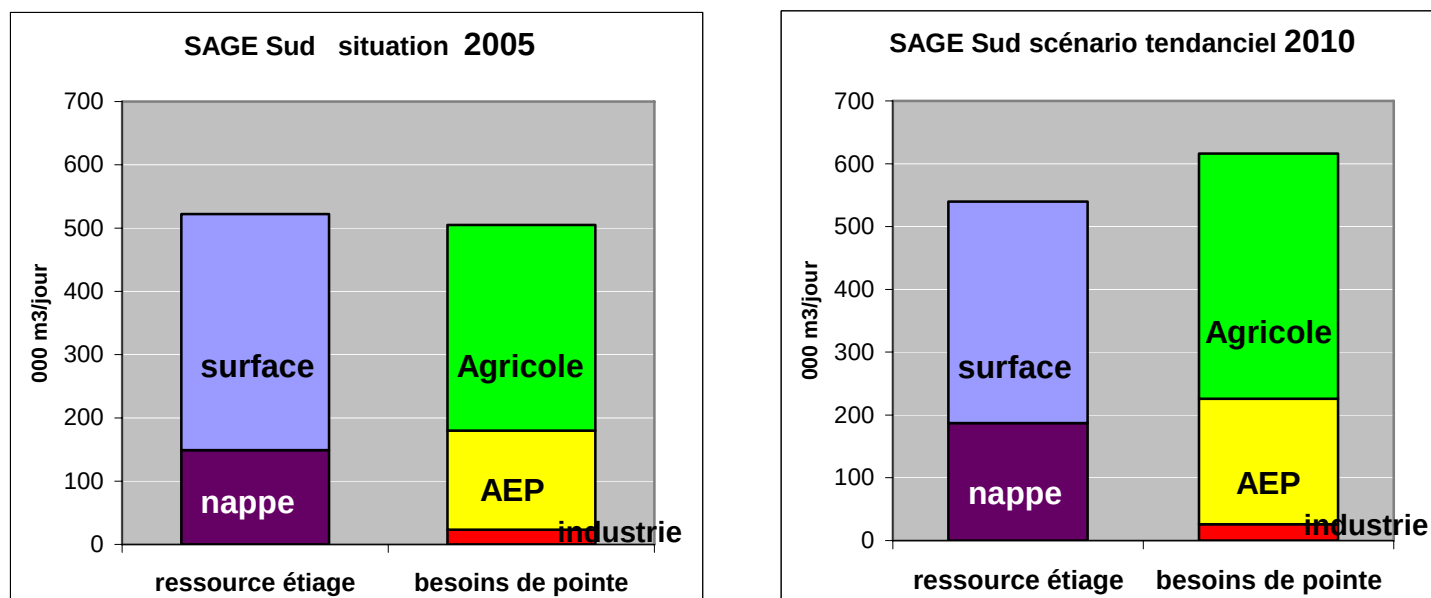


Figure 1 Adéquation Ressources-besoins en eau dans le bassin hydrographique du Sud en période limitante (novembre à avril)
Source : SAGE Sud synthèse 2001

Dans un proche avenir, l'adéquation des besoins et des ressources en eau sera de plus en plus tendue du fait de la croissance prévue des usages urbains et agricoles alors que la ressource en eau est déjà très sollicitée et que la protection des milieux aquatique devrait être renforcée. En effet, il est attendu dans la région Sud, d'une part, une forte poussée démographique qui va stimuler la consommation d'eau potable. D'autre part une extension des périmètres irrigués sur 1500 ha, réclamée de longue date par la profession agricole et justifiée par des gains de productivité potentiels élevés pour la canne à sucre. Face à cette pression des besoins, les marges de manœuvre apparaissent étroites avec les ressources actuellement exploitées. Les eaux de surface sur les deux rivières pérennes captées sont déjà à un niveau d'exploitation maximal et les prélèvements pourraient même diminuer si des débits réservés sont mis en place pour améliorer la qualité de ces milieux actuellement dégradés. L'essentiel des futurs prélèvements devrait donc venir des eaux souterraines mais là encore, certaines nappes apparaissent déjà très sollicitées et encourent un risque de remontée du biseau salé. De fortes incertitudes existent sur la capacité de l'ensemble des nappes littorales à supporter les niveaux de prélèvements actuels sur le long terme. La perspective d'exploiter de nouvelles ressources souterraines probablement très abondantes, sous le massif du Piton de la fournaise, se heurte à un problème de coût.

Le scénario tendanciel du SAGE Sud prévoit donc pour 2010 malgré une légère croissance des prélèvements sur nappe, un déficit de ressource de l'ordre de 15 % (cf figure 1). Les besoins de pointe pour l'agriculture ne pourront donc être couverts et les projets d'extension de l'irrigation devront probablement être revus à la baisse.

1.2 Les conditions de distribution de l'eau d'irrigation: un système « à la demande » sauf en période limitante sur le périmètre du Bras de la Plaine (système « de tour d'eau »)

Les périmètres irrigués du Bras de la Plaine et du Bras de Cilaos gérés par la Saphir se caractérisent par le déploiement de réseaux sous pression alimentés par des captages en rivière¹ et ponctuellement par quelques forages, et fonctionnant en flux tendus, sans stockage de la ressource². Ils sont dimensionnés pour délivrer l'eau aux bornes d'irrigation des agriculteurs avec un débit continu de 0,75 l/s/ha soit 6,5 mm d'eau par jour. Ce débit est uniforme sur la quasi totalité de la zone³.

La forte variabilité spatiale et saisonnière du climat et des besoins en eau des cultures sur les deux périmètres (cf Chopart, Fusillier, 2006) entraîne des situations très contrastées pour la satisfaction de la demande en eau agricole. Pendant la plus grande partie de l'année (d'avril à novembre), la quantité d'eau offerte est très supérieure aux besoins des cultures. Le réseau d'irrigation fonctionne alors comme un système à la demande. Pendant la saison chaude en revanche (décembre à mars), le débit disponible à la borne est à peine suffisant pour couvrir les besoins de pointe de la canne à sucre dans les zones les plus sèches où ils atteignent jusqu'à 7 mm/ jour. On distingue alors deux situations, les deux périmètres n'étant pas interconnectés :

- (i) sur le périmètre du Bras de Cilaos, des forages permettent de combler le déficit causé par la ressource gravitaire insuffisante, le réseau continue à fonctionner à la demande.
- (ii) sur le périmètre du Bras de la Plaine où la demande globale en eau est plus élevée, l'absence de possibilité de recours aux forages en période d'étiage jusqu'à une période récente⁴, impliquait des restrictions quantitatives et le passage à un système de tour d'eau.

Organisation du tour d'eau

La mise en place des tours d'eau est généralement déclenchée par l'accroissement de la demande en eau au delà du débit capté en rivière, lors du besoin de pointe de la canne en saison chaude, de décembre à avril. Le tour d'eau se caractérise par le rythme des coupures imposées aux irrigants. Le rythme de base est d'opérer des coupures 2 jours sur 6 (« rythme 48/96 »), ce qui signifie une alternance de deux jours sans eau et quatre jours avec le débit disponible habituel de 0.75 l/s/ha. Fréquemment pendant la période de pointe, la tension sur la ressource s'accroît et on passe à la fréquence plus contraignante de coupures 2 jours sur 4 (« rythme 48/48 »).

¹ Captage du Bras de la Plaine avec un débit moyen de 2,9 m³/s et un débit maximum de 6 m³/s, la quasi totalité du débit de la rivière se trouve ainsi mobilisée à l'étiage.

Captage du Bras de Cilaos avec un débit maximum de 2,6 m³/s complété par deux forages dans la plaine du Gol apportant un complément d'environ 1,2 m³/s.

² Le réservoir de tête du périmètre du Bras de la Plaine a une capacité de 10.000 m³, soit une autonomie de moins d'une heure de consommation.

³ A l'exception des dernières zones aménagées où les débits ont été différenciés selon le déficit hydrique (Pointe au Sel à 0,8 l/s/ha et Maduran à 0,6 l/s/ha)

⁴ La mise en service de forages à Pierrefonds et St Joseph est autorisée depuis 2004 pour pallier la pénurie saisonnière mais des incertitudes demeurent sur la possibilité d'exploiter à long terme ces nouvelles ressources pour l'agriculture alors que l'usage AEP, prioritaire, compte sur ces mêmes ressources souterraines pour faire face à la croissance de ses besoins

Le réseau est fermé au niveau des antennes ce qui permet d'isoler des blocs géographiques de manière indépendante et d'instaurer un tour d'eau à l'échelle du périmètre.

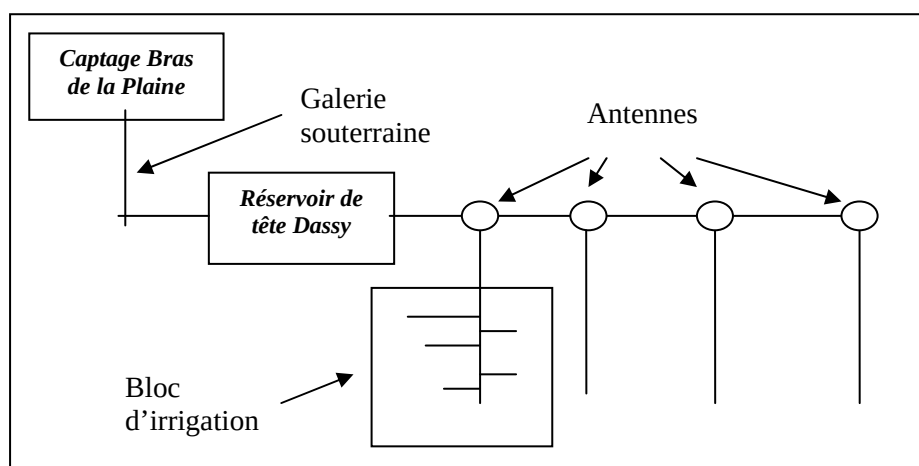


Figure 2 : Structuration du réseau sur le périmètre irrigué du Bras de la Plaine

Par exemple, lorsqu'on est en régime de coupure 2 jours sur 6, le périmètre est divisé en trois blocs d'irrigation qui subissent les coupures successivement selon la représentation schématique suivante :

	6 jours			Les 6 jours suivants		
	2 jours	2 jours	2 jours	2 jours	2 jours	2 jours
BLOC 1	Fermé	Ouvert		Fermé	Ouvert	
BLOC 2	Ouvert	Fermé	Ouvert		Fermé	Ouvert
BLOC 3	Ouvert		Fermé	Ouvert		Fermé

En « rythme 48/48 », les blocs sont modifiés. La zone de Pierrefonds constitue un bloc unique et le reste du périmètre est divisé en deux autres blocs. Cette nouvelle répartition permet de traiter la zone de Pierrefonds à part et de lui imposer le moins de coupures possible car l'absence de capacité de stockage de son sol la rend très vulnérable à ce type de restrictions. Les deux autres blocs ont un tour d'eau similaire au schéma précédent mais sur 4 jours au lieu de 6. Ce système de tour d'eau introduit une certaine équité entre les irrigants dans le sens où il assure à tous une même durée totale et une même fréquence de coupure, Pierrefonds excepté. Cette zone bénéficie d'un traitement privilégié car la nature de ses sols la rend particulièrement vulnérable au risque de stress hydrique induit par les coupures.

La fréquence des coupures pour les années 1997 à 2002 est précisée en annexe 1

1.3 La tarification de l'eau d'irrigation, un instrument de gestion de la ressource négocié

La gestion des périmètres irrigués a reposé dès l'origine sur le principe d'une tarification de l'eau au volume consommé dans un double objectif : (i) couvrir autant que possible les charges de fonctionnement du gestionnaire; (ii) inciter les irrigants à optimiser leur consommation d'eau et éviter les gaspillages. Le prix de l'eau est fixé par négociation entre

le gestionnaire, ses tutelles publiques et les associations d'irrigants. La décision finale revient au Conseil Général, actionnaire principal de la Saphir et propriétaire des ouvrages pour l'irrigation.

Une tarification progressive par tranche de consommation d'eau par unité de surface souscrite est appliquée depuis 1991, elle compte actuellement les deux tranches suivantes :

	Volume en m ³ /ha/semestre	Tarif Saphir 1999 à 2006 en €/ m ³	Redevance Office de l'eau depuis 2005 en €/ m ³
Tranche A	< 6000	0,0625	0,0013
Tranche B	> 6000	0,0915	0,0013

La seconde tranche est censée pénaliser les fortes consommations par ha et inciter l'ensemble des usagers à économiser l'eau. Elle s'applique en fait à partir d'un seuil élevé qui correspond à une consommation excédentaire par rapport aux besoins en eau de la canne à sucre en année moyenne (11.000 m³/ha/an dans la zone la plus sèche). Ainsi la tranche majorée a une portée limitée, elle ne touche en 1999/2000 que 360 irrigants parmi les 2435 abonnés soit 1/7^e. De plus la progressivité de la seconde tranche est atténuée par des remises sur les factures d'eau appliquées au volume total (moins 15% accordé pour la période 1999-2003 suite à une forte croissance des volumes d'eau vendus).

On notera que le choix d'une tarification basée sur la consommation unitaire par hectare, donc neutre par rapport à la taille de l'exploitation, permet de ne pas freiner l'agrandissement des exploitations en accord avec la politique des structures agricoles.

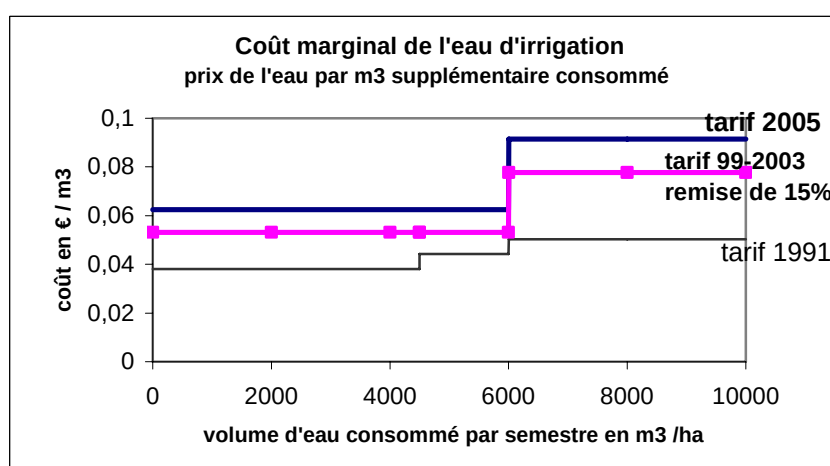
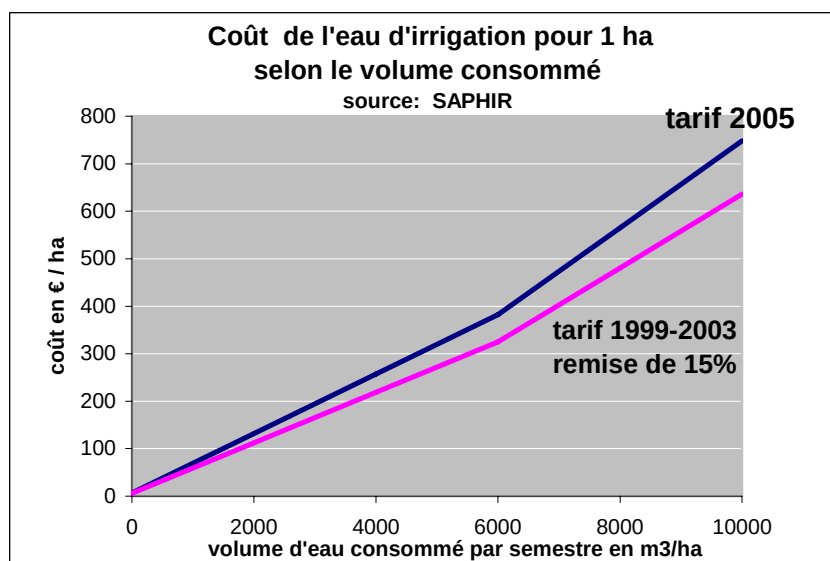


Figure 3 Structure de tarification de l'eau d'irrigation Saphir

La tarification a évolué depuis 1990 dans le sens d'une simplification avec l'uniformisation des tarifs des deux périmètres, le passage de trois à deux tranches et l'abandon d'une partie fixe par hectare souscrit⁵ qui contribue à favoriser l'agrandissement des exploitations. Elle a aussi connu une augmentation sensible du prix de l'eau entre 1990 et 1998 avec une tendance de +6,5 % par an en valeur courante, puis une stabilisation de 1999 à 2004. La nouvelle hausse de prix qui intervient en 2004 et 2005 correspond à la fin de l'application d'une remise négociée en 1999. A la tarification Saphir s'ajoute également depuis 2005 la redevance pour l'office de l'eau introduit par la loi sur l'eau. Le taux de 0,0013 €/m³ retenu par le comité de bassin correspond au minimum requis par la législation ce qui traduit un consensus politique pour pénaliser le moins possible l'agriculture, et tout particulièrement la production de canne exigeante en eau d'irrigation, dans un contexte économique difficile pour ce secteur.

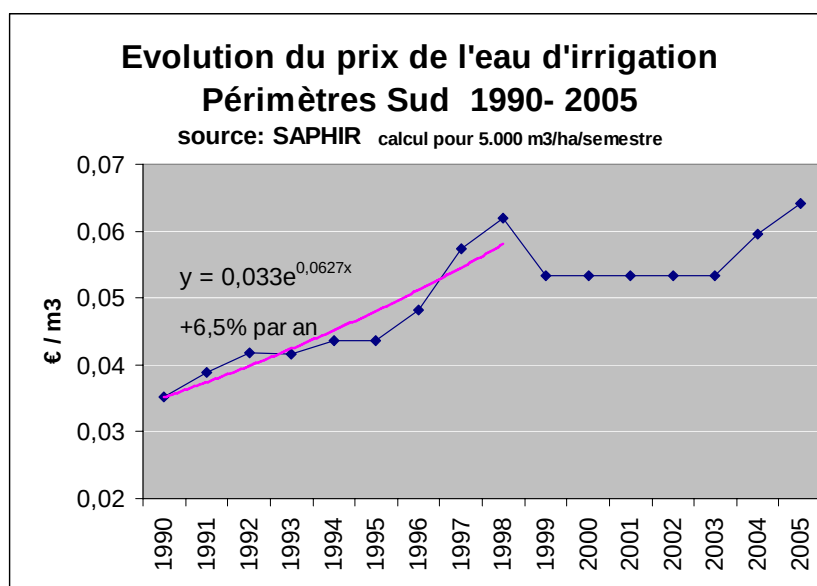


Figure 4 Evolution du prix de l'eau d'irrigation sur les périmètres Saphir

Cette tarification ne permet pas au gestionnaire des périmètres d'assurer son équilibre financier, surtout lors des années humides pendant lesquelles le volume d'eau vendu qui conditionne à lui seul la recette (pas de part fixe), diminue. Le réseau d'irrigation est rentabilisé et le budget du gestionnaire est équilibré grâce à la fourniture d'eau brute aux communes pour l'AEP. L'eau destinée à l'AEP représente actuellement autour de 20 % du volume distribué par la Saphir et sa contribution financière est décisive car le prix est deux fois plus élevé que l'eau agricole. Ainsi la péréquation réalisée par la Saphir revient à une forme de subvention de l'eau agricole par les usagers urbains.

⁵ il demeure comme partie fixe une redevance d'entretien du compteur de 7 €/ semestre

II CARACTERISATION DU PRINCIPAL USAGE DE L'EAU : LES SYSTEMES DE CULTURE EN CANNE A SUCRE IRRIGUEE

2.1 Une grande diversité des milieux et des besoins en eau de la canne

La variabilité des conditions pédologiques et climatiques qui influencent les potentialités et l'orientation productives des exploitations agricoles, est importante sur le bassin irrigué du Sud. Les deux périmètres irrigués présentent des situations contrastées résumées dans le tableau suivant :

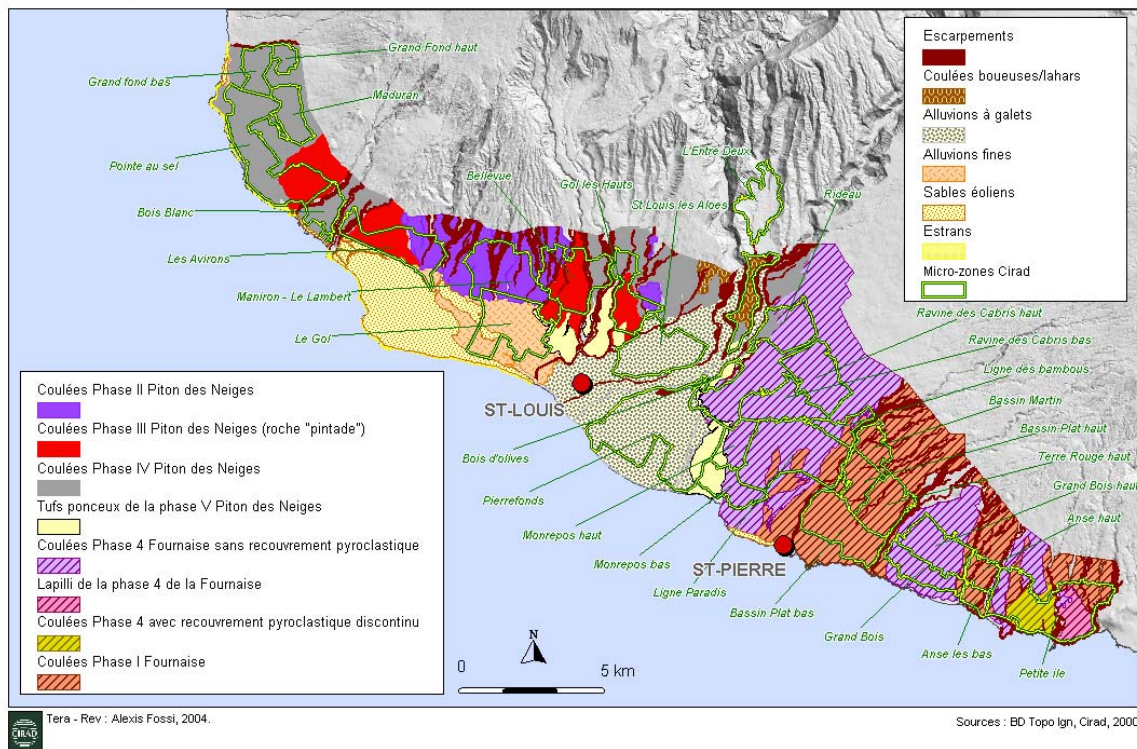
	BRAS DE LA PLAINE	BRAS DE CILAOIS
Emprise & mise en valeur des périmètres irrigués en 2000	Surface irrigable 4960 ha Surface irriguée 2000 4680 ha (94%) abonnés à l'irrigation 1347 exploitants > 1 ha 884 (66%)	Surface irrigable 2600 ha Surface irriguée 2000 2420 ha (93%) abonnés à l'irrigation 1104 exploitants > 1 ha 517 (47%)
Conditions climatiques	Gradient latitudinal des températures et précipitations. trois tranches de précipitations : P annuelles < 1m 1m < P annuelles < 1,5m 1,5m < P annuelles < 2m	Gradient altitudinal des températures et précipitations. P annuelles < 1m dans presque toute la zone.
Nature géologique du sol	façade sud occidentale du Piton de la Fournaise	façade sud occidentale du Piton des Neiges.
Origine et caractéristiques de l'alimentation en eau d'irrigation	Réseau ancien, mis en place à partir de 1969. Alimentation en eau essentiellement gravitaire par une prise d'eau sur le Bras de Plaine	Réseau plus récent, mis en place de 1986 à 1996. Alimenté en eau par une ressource gravitaire (2 barrages dit « au fil de l'eau » sur 2 bras de la rivière Bras de Cilaos) et complétée par deux forages
Contraintes principales	Pression croissante de l'urbanisation sur le foncier et la ressource en eau	
	Ressource en eau souvent insuffisante en période d'été. Equipement en matériel d'irrigation des exploitations parfois obsolète entraînant des fortes consommations en eau. Prévision de la perte de 300 à 400ha par les extensions urbaines (dont l'aéroport) au cours des 10 prochaines années.	Risque de surexploitation de la nappe (temps de rechargement limité, formation d'un biseau salé en fin de saison). Mitage urbain important

Tableau 1 Caractéristiques des deux périmètres irrigués

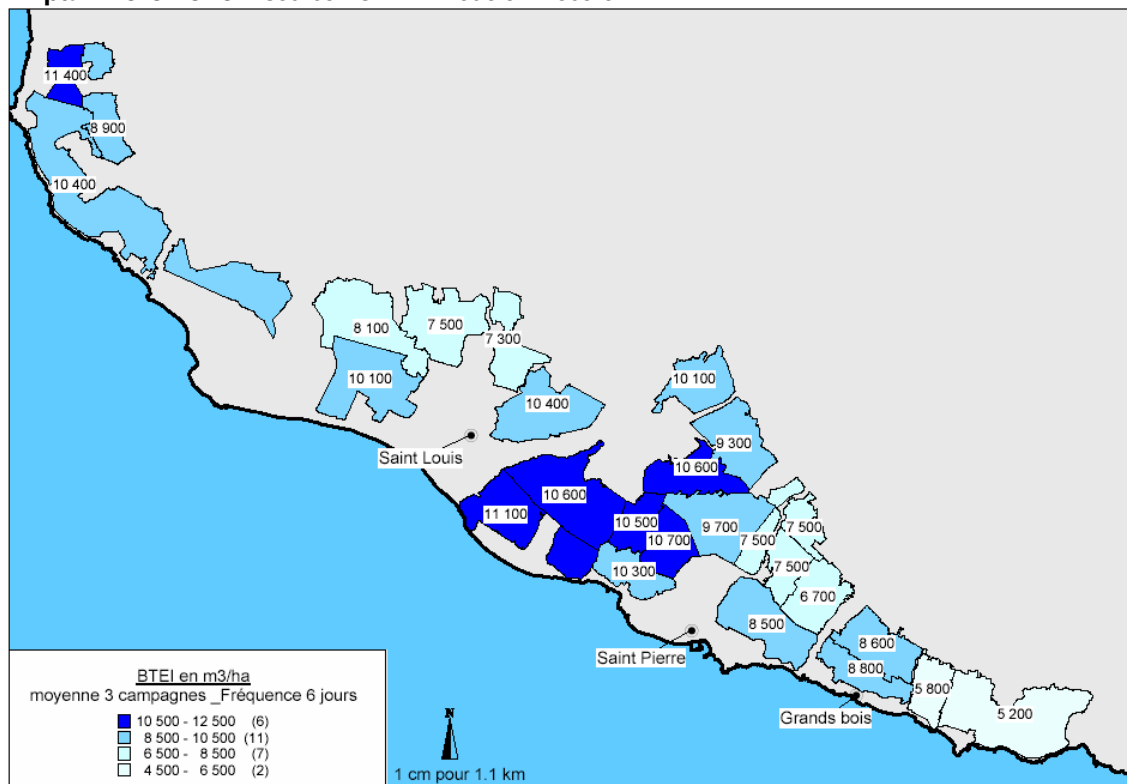
En approfondissant les critères climatiques (pluviométrie et évapotranspiration potentielle) et pédologiques (réserve utile des sols pour stocker l'eau, pierrosité et fertilité), l'étude Chopart, Fusillier et al. (2006) aboutit à un zonage des périmètres irrigués en 26 unités physiques homogènes.

Carte 2

Types de sols au sud de l'île de La Réunion et micro-zones CIRAD



Carte 3 **Besoins théoriques en eau d'irrigation canne à sucre moyenne 1998-1999-2000 par micro-zone** source : CIRAD modèle Fivecore



La carte 3 montre la variabilité spatiale des besoins en eau d'irrigation pour la canne (estimés par le modèle de bilan hydrique Five-core) qui vont de 500 mm par an dans la zone la plus pluvieuse (Petite île) où une irrigation d'appoint est suffisante, à plus de 1000 mm dans les zones les plus sèches de la frange littorale (Pointe au Sel, Pierrefonds).

De façon schématique, on peut simplifier cette diversité des milieux du point de vue des besoins en eau d'irrigation en différenciant deux grands secteurs et trois zones spécifiques dans les périmètres irrigués :

- Partie centrale du périmètre du bras de la Plaine et partie haute du bras de Cilaos avec un besoin en eau d'irrigation pour la canne estimé de 700 à 900 mm.
- Partie littorale des périmètres à Pierrefonds, Plaine des Aloes et Pointe au sel avec un besoin de 1000 à 1100 mm dû à un déficit climatique élevé avec une forte exposition au vent et à de faibles réserves utiles des sols (40 à 70 mm)

Les trois zones spécifiques sont La Petite Ile (besoin de 500 mm), L'Entre-Deux (plateau orienté vers le maraîchage) et la plaine du Gol, zone plus ou moins hydromorphe où interviennent des remontées de nappe qui réduisent les besoins en irrigation⁶.

2.2 Place de la canne à sucre dans l'assolement des périmètres irrigués et facteurs de différenciation au sein des systèmes canniers

Les systèmes de culture basés sur la canne à sucre sont prépondérants au sein des périmètres irrigués, conformément à la vocation cannière assignée à cette zone à forte potentialité productive par les institutions d'appui à l'agriculture. La canne à sucre couvre 4500 ha sur la zone irriguée soit un peu plus de 80% de l'ensemble des surfaces cultivées d'après la Bd parcellaire DAF et le RGA 2000⁷. Elle est présente dans les trois quarts des exploitations et sous la forme d'un système de monoculture dans près de 40% de l'ensemble des exploitations irriguées.

Les cultures de diversification se répartissent en trois groupes principaux ayant chacun une emprise réduite et fragmentée à l'échelle du périmètre (données RGA 2000):

- les systèmes maraîchers : 250 ha (5% de la SAU irriguée) dont 55 ha dans le bassin spécialisé de l'Entre-Deux
- les systèmes d'arboriculture fruitière 360 ha (7%) essentiellement en mangues et agrumes
- les systèmes de culture fourragère 180 ha (3,6%) essentiellement chloris

⁶ or, le modèle de bilan hydrique utilisé pour l'estimation des besoins en eau ne prend pas en compte ce processus d'alimentation par la nappe.

⁷ On note à propos de l'évaluation des surfaces irriguées de fortes divergences entre les sources. Les surfaces souscrites à l'irrigation auprès de la Saphir atteignent plus de 7000 ha alors que les surfaces cultivées déclarées au recensement de l'agriculture, convergentes avec la Bd parcellaire, sont de 5200 ha. Cet écart de 25% peut résulter de plusieurs biais : une sous estimation du RGA due à une définition trop restrictive de l'exploitation agricole (non prise en compte des micro-exploitations) ou à une sous déclaration des surfaces maraîchères (informelles); d'autre part, une inclusion par la Saphir de surfaces ayant perdu leur vocation agricole. On gagnerait notamment à mieux caractériser les abonnés sur micro-parcelles de moins de 1 ha, qui détiennent au total près de 500 ha (7% du total). Néanmoins ces derniers n'expliquent pas à eux seuls l'écart dans les estimations de surface.

Les autres systèmes (banane, ananas, horticulture florale) comptent moins d'une trentaine d'hectares chacun.

A l'exception du bassin maraîcher de l'Entre-Deux, on ne relève pas de spécialisation géographique par culture, la canne est partout dominante (70 à 90 % de la SAU). On note tout de même une place plus importante de la diversification (maraîchage et arboriculture) sur la partie haute du périmètre du Bras de Cilaos.

Les systèmes canniers mobilisent vraisemblablement près de 90% de la ressource en eau à usage agricole dans la mesure où, au delà de sa prépondérance dans l'assolement, il s'agit de la culture au plus fort besoin en eau. Les consommations d'eau relevées par la Saphir en témoignent. Sur un échantillon de parcelles de la Ravine des cabris, zone de besoin moyen du périmètre (9000 à 10.000 m³/ha/an pour la canne), suivies lors d'une année sèche (1997) les consommations par hectare sont inférieures à celle de la canne, de 10% en arboriculture, de 27% en maraîchage et de 34% en culture fourragère (source : statistique Saphir pour la préparation du SAGE Sud).

L'omniprésence de la canne dans le bassin irrigué ne signifie pas une uniformité du système de culture. Les enquêtes auprès des exploitations (Fusillier, Saque, 2002) montrent en effet une diversité dans les conduites de la culture de la canne et les niveaux de productivité, relativement importante, pour une zone d'étendue limitée comme les périmètres irrigués du sud. Trois facteurs principaux contribuent à cette diversité :

- *Le degré de mécanisation* de la culture : les deux modalités manuelles ou mécaniques coexistent pour les opérations de coupe (la plus exigeante en main d'œuvre), d'entretien de la culture (désherbage, épandage d'engrais) et de replantation. Ce facteur est lié à l'équipement de l'exploitation, souvent corrélé à sa taille. Un premier clivage intervient à ce niveau entre les exploitations équipées de tracteur où les opérations d'entretien sont mécanisées et les exploitations non équipées où l'entretien est manuel, le chargement et transport des cannes, et éventuellement la coupe, sont confiés à des prestataires. La possibilité de mécaniser la coupe dépend du milieu (pente) et de ses aménagements (épierrage, parcellaire adapté).
- *La conduite du désherbage et de la fertilisation* : on distingue d'une part un itinéraire technique sous optimal (rendement pénalisé) où les opérations d'entretien de la canne sont reportées après la période de coupe en raison d'une saturation de la capacité de travail de l'exploitant par l'activité de coupe. Il s'agit d'exploitations peu équipées privilégiant le recours à la main d'œuvre familiale. D'autre part, un itinéraire technique optimisé avec un entretien au fur et à mesure de la repousse de la canne, durant la campagne de coupe.
- *Le matériel et la pratique d'irrigation* le recours à l'irrigation pour la canne est bien généralisé sur les périmètres mais les modalités d'irrigation se différencient selon le type de matériel et son ancienneté, la technicité du pilotage des irrigations et notamment la précision de l'adéquation au besoin de la canne. Cette composante irrigation du système de culture, essentielle par rapport à notre objet sur l'usage de l'eau, est développée dans le prochain paragraphe.

La combinaison des trois composantes mécanisation, stratégie d'entretien de la culture et stratégie d'irrigation permet d'identifier des systèmes de culture cohérents qui correspondent à des niveaux et modes d'intensification contrastés. Par rapport à notre objet

sur l'usage de l'eau, il convient de caractériser cette composante irrigation du système de culture.

2.3 Aperçu des pratiques d'irrigation

Le recours à l'irrigation répond, pour la quasi totalité des irrigants enquêtés, à un *objectif de satisfaction des besoins en eau de la canne pour maximiser le rendement* dans la mesure où le débit disponible à la borne n'est pas limitant. Dans le cas contraire en période de coupure, une stratégie de rationnement de la canne peut intervenir lorsque l'assolement contient des cultures de diversification comme le maraîchage. Ces dernières sont toujours prioritaires sur la canne pour l'eau vu leur sensibilité au stress hydrique. Même si les exploitants poursuivent un même objectif d'utilisation de l'eau, les pratiques mises en œuvre sont multiples. Elles peuvent être regroupées en *trois grands types caractérisés par la durée du tour d'eau et le matériel associé*. Ces critères conditionnent l'efficacité de l'utilisation l'eau et apparaissent aussi un bon indicateur du niveau de technicité des irrigants.

Les modes d'irrigation sont présentés de façon stylisée, par ordre d'efficacité croissante :

- **Mode d'irrigation n°1 :**

Le tour d'eau dure au moins 10 jours. Les parcelles sont équipées en matériel d'aspersion en couverture mobile (rare) ou totale, c'est à dire avec déplacement des tuyaux pour le premier et des asperseurs pour le second système. La même dose d'eau est appliquée sur toutes les cannes de la sole, alors que les cannes sont à des stades différents avec des besoins en eau différents. Cette gestion « simplifiée » s'explique par le souci d'alléger le travail exigé pour déplacer les asperseurs, la prise en compte du stade de croissance des cannes étant considérée comme trop contraignante. Chaque position peut durer jusqu'à 24 heures. En période de coupure, les positions peuvent être ramenées à 12 heures pour accélérer le tour d'eau qui garde en fait la même durée compte tenu des jours de coupure (en régime 48/48 soit 2 jours coupés /4). Ce mode d'irrigation ne permet pas de faire un tour d'eau complet, donc d'irriguer toute la sole, dans l'intervalle entre deux coupures.

La principale contrainte pour aller vers une optimisation de l'utilisation de l'eau est technique. Ce type de matériel est désuet avec une faible efficacité intrinsèque, et d'utilisation trop rigide : il permet difficilement d'adapter les apports à la variabilité de l'environnement (particularité du régime des pluies, brèves mais intenses, hétérogénéité de la réserve utile du sol), et au stade physiologique des cannes. Ces matériels sont encore employés dans les petites exploitations à faible capacité d'investissement. Notamment celles en monoculture en canne connaissent souvent des difficultés financières qui entravent le changement de matériel, malgré les possibilités de subventions. D'autre part, le maintien de ces matériels obsolètes semble aussi tenir chez nombre de ces exploitants, à des perspectives de déprise agricole encouragées par la pression de l'urbanisation sur le foncier.

- **Mode d'irrigation n°2 :**

Le tour d'eau est réalisé sur une durée voisine de 4 jours. La sole irriguée bénéficie d'un matériel d'aspersion en couverture intégrale qui permet de s'affranchir du déplacement des asperseurs. Les parcelles ne sont pas équipées d'automatisme ou programmeur pour les irrigations (faute de moyens financiers suffisants) et le changement de position correspond à une tâche d'ouverture/fermeture de vanne d'arrivée d'eau. Chaque position dure de 6 à 8 heures et en période de coupure, un irrigant peut raccourcir la durée des positions pour

atteindre 4 ou 5 positions par jour (une position longue la nuit et 3 ou 4 positions pendant la journée. Ainsi, il est possible d'irriguer la totalité des parcelles entre deux coupures, même en régime 48/48.

L'efficacité intrinsèque de ce type de matériel est intermédiaire, entre la couverture totale et le goutte à goutte. Un pilotage de l'irrigation plus fin et notamment une différenciation des apports selon le stade de croissance de la canne est facilité par un temps de manipulation du matériel réduit, mais tout de même non négligeable. Ainsi, ce système est plus ou moins efficace selon le temps dégagé pour se déplacer et manipuler les vannes.

- **Mode d'irrigation n°3 :**

La sole irriguée est équipée d'automatismes pour le déclenchement et l'arrêt des irrigations ce qui permet d'ajuster la durée du tour d'eau en fonction des volumes à distribuer et notamment de passer à un tour d'eau de un jour. La distribution est faite par couverture intégrale ou par goutte à goutte. Les cannes peuvent être pilotées à l'ETM toute l'année sauf en cas de coupures prolongées. L'efficacité du matériel est maximale dans le cas du goutte à goutte. Les pratiques d'irrigation sont souvent proches de l'optimum agronomique avec un suivi quotidien du climat. Ces pratiques d'irrigation s'insèrent généralement dans un itinéraire technique maîtrisé et performant. Toutefois ces exploitants peuvent rencontrer des difficultés pour renouveler les matériels dans la mesure où la subvention accordée pour un premier équipement n'est pas reconduite pour les renouvellements. On observe ainsi des retours en arrière des pratiques : les automatismes hors d'usage ne sont pas renouvelés et on en revient à une manipulation des vannes à la main, donc des positions de durée fixes non optimales.

Une absence d'anticipation des coupures

Concernant la gestion de la période de coupure, il convient de noter qu'aucun des modes d'irrigation ne fait une anticipation en remplissant préventivement la réserve utile. En effet la profondeur des sols ne le permettrait que dans certaines zones ; d'autre part, les besoins de la canne montent progressivement en puissance et à l'approche de la période de stress, le débit disponible à la borne suffit à peine à satisfaire les besoins. Enfin le régime très irrégulier des pluies peut aussi laisser l'espoir de valoriser une pluie future.

La question qu'il convient maintenant d'aborder est celle des effets différenciés de ces trois modes d'irrigation en termes de consommation en eau, de stress induit pour la canne à sucre dans des situations de rationnement, et de rendement en canne associés. L'objectif de cette approche est de construire des standards de production de la canne qui seront ensuite utilisés dans les modèles d'offre agricole.

2.4 Estimation de l'impact des modes d'irrigation et des coupures sur la consommation en eau et la satisfaction des besoins de la canne par le modèle Five-Core

- **Paramétrage du modèle Five-Core**

Le modèle Five-Core⁸ est un outil de simulation de plannings d'irrigation qui calcule des demandes en eau journalières à partir d'un bilan hydrique à réservoir (RU du sol), en intégrant des variables de pilotage relatives à (i) la conduite de l'irrigation définie par l'agriculteur : durée du tour d'eau, priorité à la diversification en cas de débit limitant, déclenchement et arrêt (sevrage) de la campagne d'irrigation, seuils de remplissage de la RU pour le déclenchement et l'arrêt de chaque irrigation; et (ii) les contraintes de débit maximum à la borne et de coupures saisonnières du réseau. Le modèle calcule également les valeurs d'ETR et ETM journalières à partir desquels est estimé le stress de la culture ETR/ETM. Enfin le modèle est « forcé » avec des doses d'eau fixes en saison chaude (besoin de pointe) pour les systèmes sans automatismes qui ne sont pas en mesure d'ajuster finement leurs apports d'eau aux besoins de la plante.

Les trois modes d'irrigation types identifiés précédemment ont ainsi été traduits en planning-doses d'irrigation avec le modèle paramétré comme ci-dessous. On considère notamment pour les modes sans automatismes que la totalité du débit disponible est mobilisée de façon fixe sur une seule (mode 1) ou deux positions par jour (mode 2) durant la saison de pointe⁹.

N° Mode irrigation	Type de matériel	Efficienc e du matériel	Durée du tour d'eau (jours)	Nb positions par jour x Dose par position	Taux de remplissage de la RU	Seuil de déclenchement des irrigations (%)
3	Goutte à goutte ou intégrale + programmeur	0.9	1	variable	80	80
2	Intégrale sans programmeur	0.8	4	2 x 37 m ³ /ha	100	60
1	Totale sans programmeur	0.7	10	1 x 65m ³ /ha	100	50

Tableau 2 : Paramétrage du modèle Five-Core pour les trois modes d'irrigation

Le taux de remplissage et le seuil de déclenchement sont associés à des choix de pilotage de l'irrigation et notamment à l'aversion au risque de stress hydrique. Mais ce ne sont pas des critères directement mesurés et explicités par les exploitants qui conduisent généralement leurs irrigations en fonction d'un état visuel des plantes et de la surface du sol. Ainsi le modèle a été paramétré à partir d'une analyse de sensibilité des consommations et du stress subi par les cannes à ces paramètres. Pour traduire le fait que la sole cannière d'une exploitation se compose de parcelles à divers stades de croissance, nous avons distingué des cannes de début, milieu et fin de campagne par des dates de début de cycle différentes : 1^{er} août ; 1^{er} octobre ; et 1^{er} décembre. Cependant, distinguer trois dates de début de cycle nous oblige à conduire des simulations indépendantes pour les cannes de début, milieu et fin de campagne, ce qui interdit de reporter de l'eau en cas de pénurie, d'une parcelle où les

⁸ Farm irrigation volume estimates according to constraints and Requirements. Modèle mis au point par le CIRAD, issu d'un développement de l'outil MCIDER. Basé sur un Bilan hydrique avec réservoir sol, utilisé au pas de temps journalier

⁹ La différence de consommation d'eau annuelle avec ou sans fixation de doses normalisées reste faible. Le forçage du modèle a donc un effet limité sur la consommation globale de l'année car pour des tours d'eau longs, il est rare que la réserve soit suffisamment remplie pour que le modèle ne mette pas tout le volume d'eau disponible.

cannes (jeunes) sont moins sensibles vers une autre parcelle où le stress hydrique est plus fort. Cela amène donc à surestimer le stress hydrique subi par les cannes par rapport aux pratiques observées chez certains planteurs qui répartissent l'eau en tenant compte du stade de croissance.

- **Scénarios simulés avec différentes intensités dans le rationnement en eau de la canne**

Pour cerner les impacts différenciés des trois modes d'irrigation, nous avons considéré trois scénarios d'« offre en eau » correspondant à des situations de rationnement croissant de la canne. Ces scénarios intègrent l'effet du climat (choix d'une année climatique), des coupures du réseau et de la priorité donnée à la diversification.

- (i) Une année climatique médiane sans coupure. La seule contrainte est le débit disponible fixe à la borne ($65 \text{ m}^3/\text{ha}/\text{jour}$)
- (ii) Une année climatique médiane avec des coupures fortes : la campagne 1998/99¹⁰
- (iii) Une année climatique médiane avec des coupures fortes et une stratégie des irrigants qui consiste à rationner beaucoup la canne pour reporter l'eau sur les cultures de diversification prioritaires. Pendant la période de coupures, une partie du débit total disponible est mis en réserve pour pouvoir arroser en continu les parcelles de diversification. Cela revient à limiter le débit disponible pour la canne à moins de $65 \text{ m}^3/\text{ha}$ pendant la période de coupure.

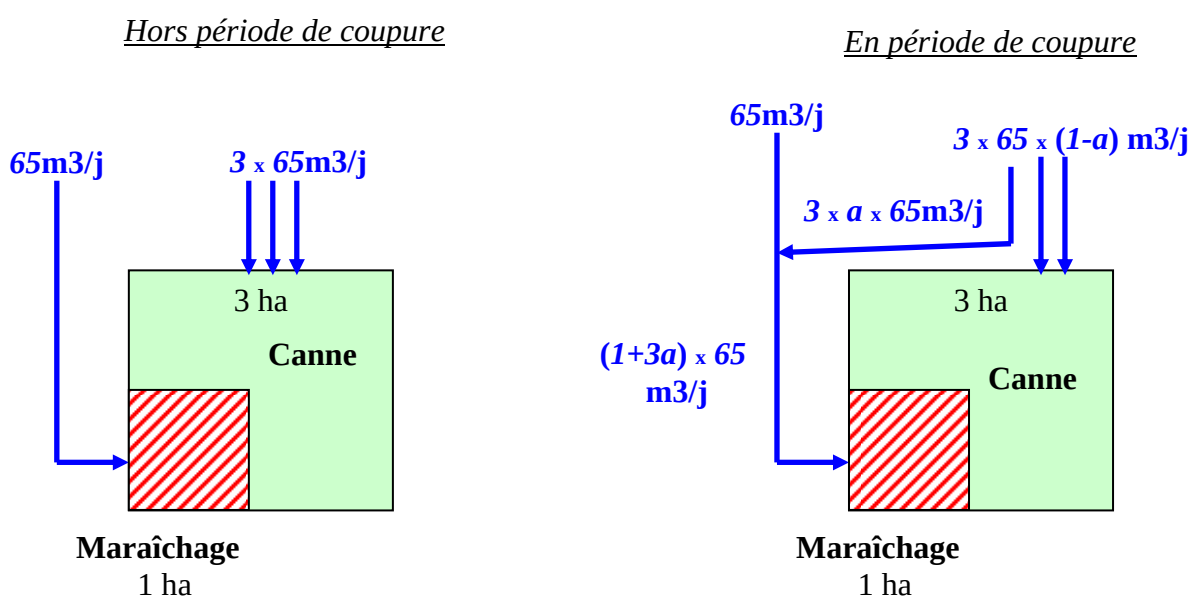


Figure 5 Scénario de priorité aux cultures de diversification, fort rationnement de la canne Exemple d'une exploitation de 4 ha

¹⁰ Parmi les cinq campagnes sur lesquelles on disposait d'un calendrier des coupures (1997/98 à 2001/02), la campagne 1998/99 est celle qui a connu le plus grand nombre de jours de coupures (46 jours, contre une moyenne de 32 jours) mais c'est aussi celle qui se rapproche le plus de la médiane climatique (pluies) des 20 dernières années. Elle a donc été retenue comme référence. On ne relève pas de relation entre l'intensité des coupures et le climat de l'année.

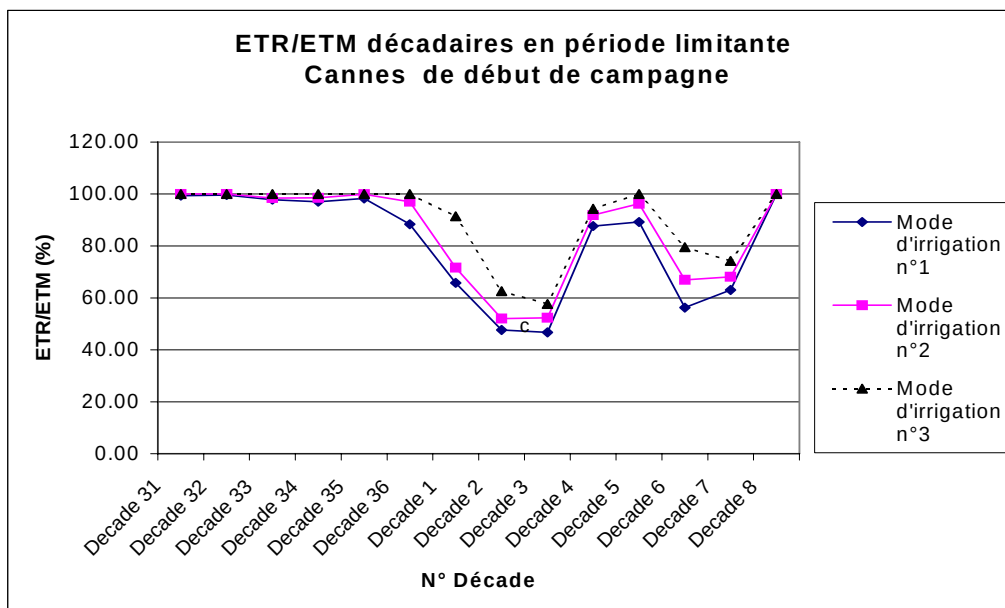
Le débit de réserve « a » alloué au maraîchage est évalué à 30% du débit disponible pour pallier un régime de coupure 48/48 (eau disponible deux jours sur quatre), avec un assolement composé aux $\frac{3}{4}$ de canne à sucre et $\frac{1}{4}$ de maraîchage.

La zone prise comme référence pour les simulations est la partie centrale du Bras de la Plaine, qui reflète une situation pédo-climatique « moyenne » des périmètres irrigués (RU de 80 mm, pluviométrie de 600 à 800 mm) et se trouve affectée par le régime de coupures le plus sévère (48/48).

- **Niveau de satisfaction des besoins en eau de la canne pendant la période limitante**

La période limitante intervient pendant la saison chaude lorsque le besoin de pointe de la canne est à peine satisfait par le débit disponible et que peuvent survenir des coupures du réseau. On l'a délimitée en considérant la période à laquelle les coupures sont les plus fréquentes. D'après les statistiques Saphir de coupures des années 1997 à 2002, il s'agit de la période allant de début décembre (décade 34) à mi mars (décade 8).

Le stress hydrique de la canne exprimé par ETR/ETM est présenté ci-dessous pour le scénario de climat et régime de coupures 1998/99



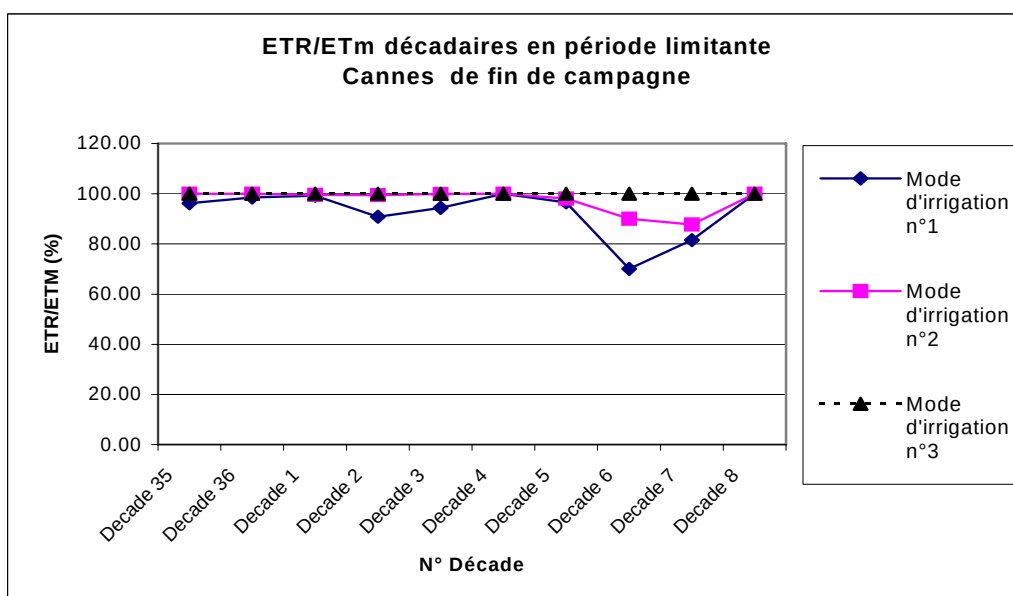
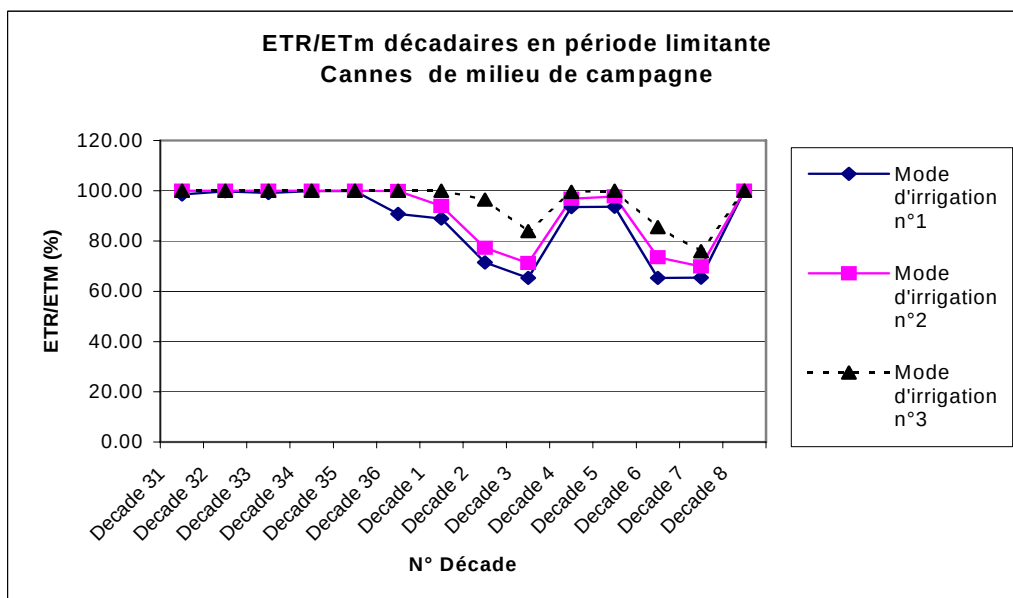


Figure 6 Stress hydrique des cannes dans le scénario climatique et coupures 1998/99 par type (date de coupe) de canne

Toutes choses égales par ailleurs, ce sont les cannes de début de campagne qui souffrent le plus du manque d'eau en période de coupure. Même un tour d'eau de 1 jour ne permet pas d'apporter suffisamment d'eau pour satisfaire les besoins des cannes de début de campagne. D'autre part, un tour d'eau de 1 jour permet de retarder le début du rationnement des cannes et permet de ralentir l'augmentation progressive du rationnement pour des épisodes secs de longue durée.

La figure suivante dresse un bilan du niveau de satisfaction des besoins à l'échelle de la sole cannière entière pour cette période limitante pendant laquelle la totalité du débit disponible est utilisé.

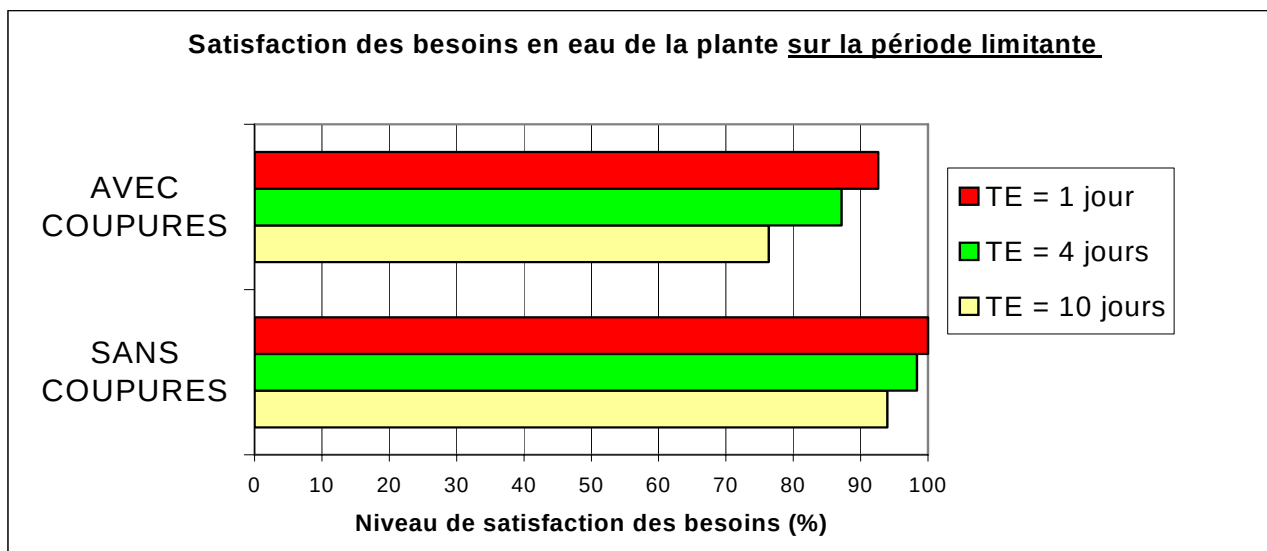


Figure 7 Niveau de satisfaction des besoins en eau de la canne dans les scénarios avec et sans coupures

En l'absence de coupure, les besoins en eau de la canne (ETM) ne sont pas complètement satisfaits pour les tours d'eau de 4 jours et plus.

Les coupures provoquent une augmentation du stress hydrique subi par les cannes sur la période où l'eau est limitante. Ce stress est d'autant plus prononcé que le tour d'eau est long. En effet, un tour d'eau de 1 jour permet de limiter largement l'impression de pénurie en eau. Pour un tour d'eau de 10 jours, les coupures font passer le stress de 94% à 76% (ETR/ETM).

- **Effet sur les volumes d'eau consommés à l'échelle de la campagne**

Alors qu'on aurait pu s'attendre à des consommations beaucoup moins fortes pour les modes d'irrigation avec un tour d'eau plus court, les sorties du modèle Five-Core indiquent des écarts de consommations somme toute limités. Cela semble tenir à la capacité des systèmes d'irrigation en aspersion à long tour d'eau à mieux valoriser les pluies. En effet dans ces systèmes, le volume d'eau disponible dans le sol connaît de fortes variations et l'irrigant peut davantage tirer parti des pluies irrégulières mais d'une intensité suffisante pour remplir la réserve utile du sol. Le contexte pédo-climatique autorise une irrigation d'appoint sur une grande partie des périmètres du Sud.

On constate que les coupures occasionnent une diminution des consommations à l'échelle de la campagne de l'ordre de 10%, quelque soit de la durée du tour d'eau.

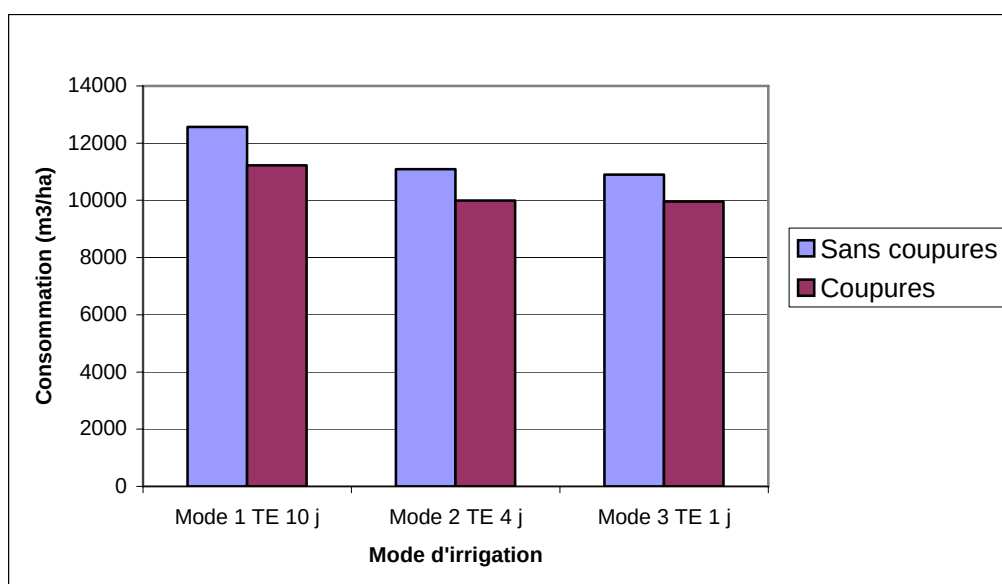


Figure 8 Consommation annuelle théorique en eau de la sole cannière par mode d'irrigation Scénarios 1998/99 avec / sans coupures (modèle Fivecore) zone centrale du périmètre du Bras de la Plaine

2.5 Estimation de l'impact des modes d'irrigation et des rationnements en eau sur le rendement de la canne par le modèle Mosicas

Le modèle de croissance de la canne Mosicas (Martine, 2003) a été utilisé pour évaluer l'effet des stress hydriques mis en évidence précédemment dans les scénarios de rationnement, sur le rendement de la canne à sucre. Le modèle a ainsi été implémenté avec les plannings-doses d'irrigation issus du modèle Five-Core et caractéristiques des trois modes d'irrigation. Les sorties fournies par Mosicas sont des rendements potentiels à l'optimum agronomique c'est à dire pour des facteurs de production, autres que l'eau, non limitants. Ces rendements potentiels sont évidemment beaucoup plus élevés que ceux constatés dans la réalité et l'apport du modèle est de mettre en relation un niveau de rationnement compte tenu des contraintes d'irrigation, avec une perte de rendement.

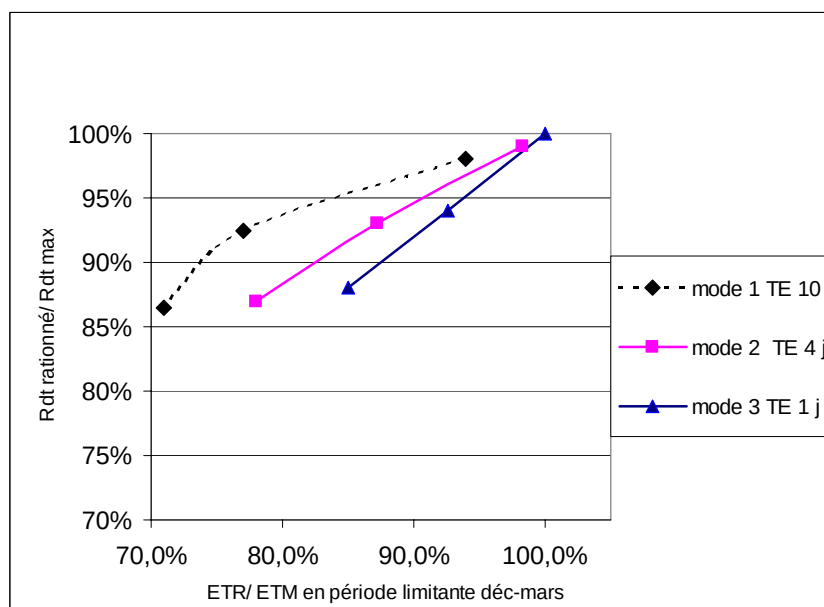


Figure 9 Impacts de 3 niveaux de rationnement sur le rendement en canne par mode d'irrigation : scénario 1998/99 sans coupure/ avec coupure / avec coupure et priorité à la diversification. Estimations par le modèle Mosaic zone centrale du périmètre du Bras de la Plaine

Les trois points des courbes de réponse à l'eau correspondent aux trois scénarios testés. L'impact des coupures est sensiblement le même pour les trois modes d'irrigation, on relève une perte de rendement de 5 à 7% avec le premier niveau de rationnement puis de 10 à 12% avec le second.

Dans la perspective d'élaborer des référentiels technico-économiques de canne incluant des rationnements pour les modèles économiques, nous avons extrapolé ces résultats pour les traduire en niveaux absolus de rendements et consommations d'eau. L'hypothèse est que la relation entre le stress hydrique et la perte de rendement mise à en évidence à partir d'un optimum agronomique, est stable et s'applique également lorsque d'autres facteurs limitants sont en interaction avec la disponibilité en eau. Les rendements associés à chacun des trois modes d'irrigation en l'absence de rationnement hydrique sont issus de références à dire d'experts, confirmés par les statistiques de production cannières disponibles sur la zone (cf paragraphe suivant). Par niveau de technicité croissant, ces rendements sont estimés à 90 t/ha, 100 t/ha et 115 t/ha en situation non rationnée. La fonction de production ébauchée en intégrant les deux situations rationnées (coupures 1998/99 / coupures et débit réservé pour la diversification) est présentée sur le graphe suivant.

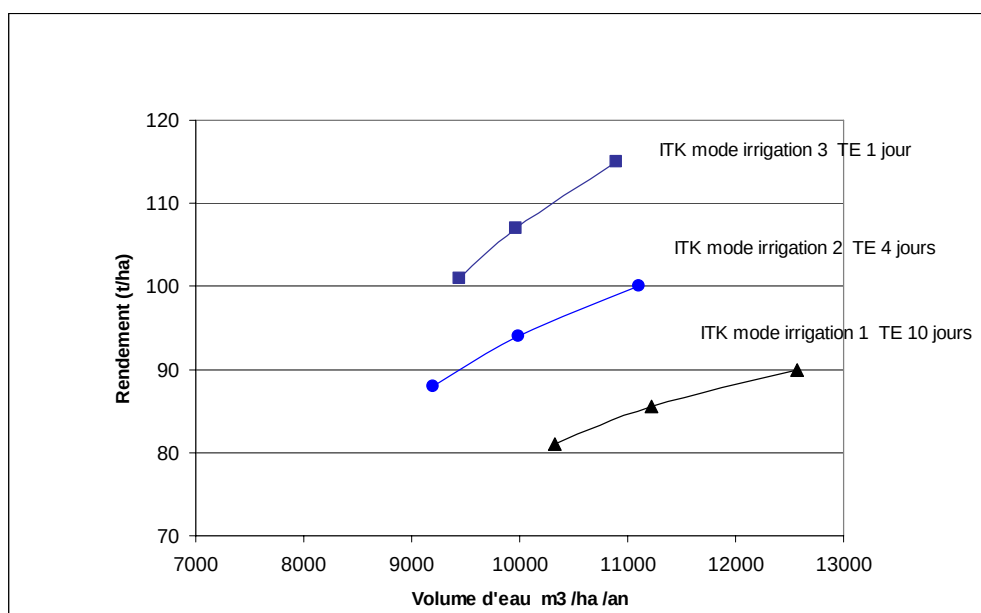


Figure 10 Relation entre le rendement en canne et le volume d'eau d'irrigation consommé sur la campagne pour trois itinéraires techniques associés au mode d'irrigation Zone centrale du Périmètre du Bras de la Plaine

Dans les trois itinéraires techniques modélisés, la réponse du rendement en canne à l'eau apportée (productivité marginale brute de l'eau traduite par la pente des courbes de la figure 10) est relativement élevée.

Une première approche économique de l'utilisation optimale de l'eau sur un système cannier, du point de vu privé de l'agriculteur, peut être ébauchée par un budget partiel prenant en compte le rapport entre le prix de la canne et le prix de l'eau. Selon la théorie économique standard, l'optimum économique pour l'usage d'un facteur de production (en l'occurrence l'eau) est atteint lorsque la productivité marginale du facteur est égale à son coût marginal, c'est-à-dire son prix. Actuellement, une tonne de canne dégage un produit marginal (net des charges de récolte liées au tonnage produit) de 50 € pour les systèmes d'exploitation les plus courants, soit une valeur équivalente à 783 m³ d'eau. Le revenu de la canne est donc maximisé, pour l'agriculteur, pour un volume d'eau tel que le m³ d'eau supplémentaire apporte un gain de rendement de 1,27 kg de canne. Avec un rapport de prix aussi favorable à la production de canne et des courbes de réponse à l'apport d'eau telles que calculées par le modèle Mosicas (cf figure 10), l'optimum économique en système de monoculture cannière, se confond quasiment avec l'optimum technique.

Cette approche présente une limite importante, elle ne reflète pas le coût social de l'irrigation. Ce coût social est lié, d'une part à l'existence de transferts publics pour l'aménagement et le fonctionnement des périmètres irrigués, d'autre part à la valeur des usages alternatifs de l'eau, y compris sa préservation dans le milieu naturel. A l'échelle même de l'exploitation, il convient de tenir compte de valorisations de l'eau alternatives à la canne avec les cultures de diversification. Ce sera l'objet de la modélisation économique au niveau de l'irrigant. Un préalable à cette modélisation est l'élaboration de référentiels technico-économiques sur les systèmes de culture.

2.6 Synthèse sur la diversité des systèmes canniers irrigués et référentiel économique

La technicité du système d'irrigation mis en œuvre par l'exploitant peut être considérée comme un indicateur de technicité de l'ensemble du système de culture cannier de l'exploitation. Cela nous conduit à raisonner la diversité des systèmes canniers irrigués en associant chacun des modes d'irrigation présentés à un niveau d'intensification de la canne à sucre. En schématisant les systèmes en trois niveaux d'intensification, on peut s'appuyer sur la distribution des rendements en canne observés sur la zone des périmètres irrigués, pour définir des rendements de référence. Le graphe suivant présente les rendements moyens des trois campagnes 1998-1999-2000 réalisés par un échantillon représentatif d'exploitations cannières des lotissements SAFER¹¹.

¹¹ L'échantillon compte 364 exploitants sur les 680 installés sur les lotissements aménagés par la SAFER. Ces lotissements couvrent environ la moitié de la surface totale des périmètres irrigués du Sud.

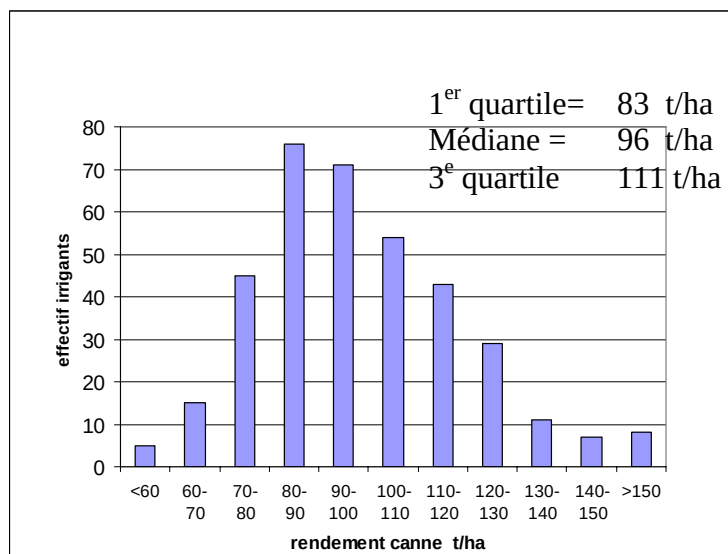


Figure 11 Distribution des irrigants selon les rendements en canne moyens 1998-1999-2000
Périmètres du Bras de la Plaine et du Bras de Cilaos source : SAFER

Les rendements en canne irriguée sont concentrés dans les classes de 80 à 110 t/ha. Ils sont probablement affectés par un léger rationnement en eau puisque ces trois années sont marquées par des coupures du réseau d'irrigation. On considérera donc qu'en situation non limitante pour l'eau, les rendements de référence associés aux trois niveaux d'intensification (itinéraires techniques CAS1, CAS2, CAS3) sont arrondis respectivement à 90 t/ha, 100 t/ha et 115 t/ha.

En combinant ces niveaux d'intensification avec les modalités d'équipement des exploitations et de coupe, on peut caractériser cinq systèmes de culture canniers représentatifs d'une diversité de situations au sein des périmètres irrigués.

Système	CAS1	CAS2	CAS2 bis	CAS3	CAS3 bis
Rendement t/ha à 100% ETM	90	100		115	
Mode irrigation	Couv totale TE 10 j	Couv intégrale TE 4 j		Intégrale/ gag+automatismes TE flexible 1 à 2 j	
Conso eau 1998/99 m3/ha/an Modélisée 100%ETM Réelle saphir Enquête Richefort ¹²	12 000 12 460	11 000 12 170		10 500 11 310	
Equipement	Véhicule utilitaire	Véhicule utilitaire	Tracteur +chargeur	Tracteur +chargeur	Tracteur
Coupe	Manuelle 40% salarié	Manuelle 50% salarié	Manuelle 80% salarié	Manuelle 100% salarié	Mécanique Prestataire

Tableau 3 Caractérisation de 5 systèmes de culture canniers irrigués -types des périmètres
du Bras de la Plaine & Bras de Cilaos (zone centrale)

¹² Enquête sur les pratiques d'irrigation réalisée en 2006. Données de consommation 1998/99 de 50 irrigants des zones à fort besoin en eau et équipement hétérogène (Pierrefonds, Ravine des Cabris, St Louis), classés par mode d'irrigation

Les caractéristiques économiques de ces systèmes canniers sont révélées par la comparaison des structures de produit brut en coûts et revenu. Le référentiel technico-économique mobilisé à cette fin est basé sur les données d'enquête des pratiques culturales et d'irrigation 2001 et 2003 et sur le référentiel canne CIRAD-DAF-Chambre d'agriculture 2006 (Masson, 2006). L'année de référence pour les prix et coûts est 2005. Concernant la canne à sucre, le renouvellement du régime d'aide à la production en 2006 ne modifie pas substantiellement le référentiel puisque les aides restent essentiellement couplées au volume de production et compensent la baisse programmée du prix marchand de la canne¹³

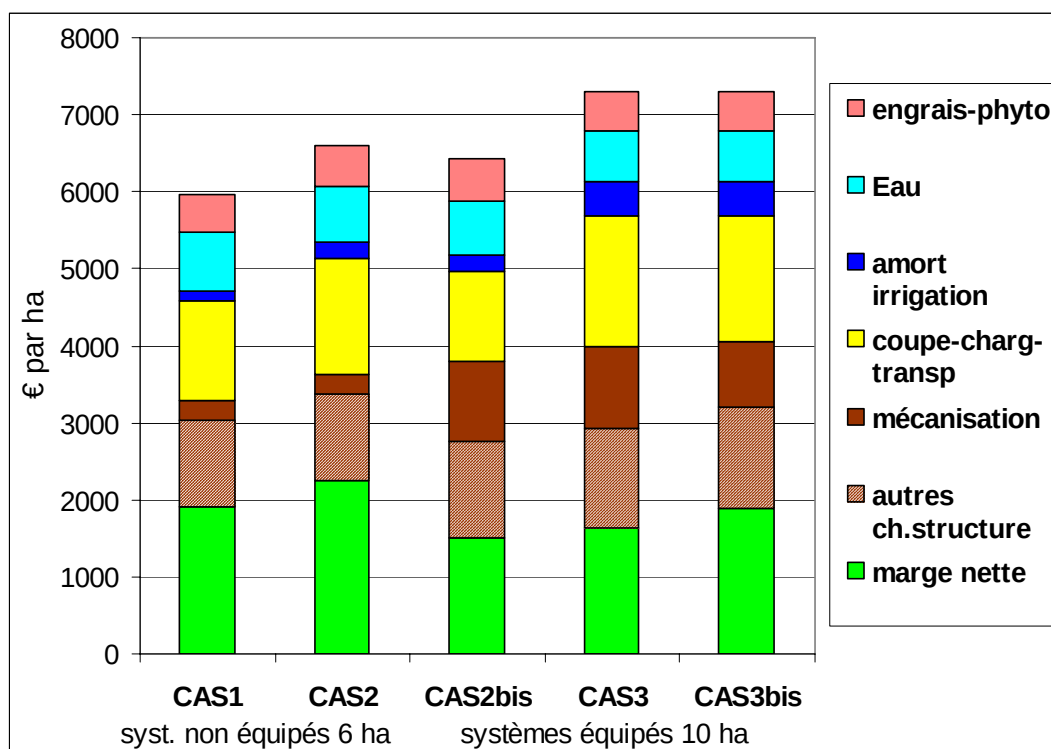


Figure 12 Structure du produit brut pour 5 systèmes canniers irrigués Périmètres du Sud
Source : Enquête CIRAD 2003 & Référentiel CIRAD-DAF-Ch.Agriculture 2006

Les divers systèmes canniers-types dégagent un produit brut de 6000 à 7300 €/ha et une marge nette (revenu net) de 1500 à 2200 €/ha. Ces indicateurs expriment une productivité de la terre, qui est souvent le facteur le plus limitant. CAS1 et CAS2 obtiennent la meilleure marge par hectare car ils ont moins recours à la main d'œuvre salariée pour la coupe. En revanche, pour le critère de productivité du travail, ce sont les systèmes équipés CAS2bis, CAS3 et surtout CAS3 bis (coupe mécanisée) qui dégagent des performances nettement supérieures car ils peuvent se déployer sur de plus grandes surfaces en économisant de la main d'oeuvre.

Les principaux postes de charges sont l'opération de coupe-chargement-transport et, pour les exploitations équipées, la mécanisation, elle-même liée essentiellement au chantier de

¹³ Le prix moyen de la canne, toutes aides incluses, passe pour une production de 700 tonnes de 66 €/t dans la convention 2001-2005 à 69 €/t dans la convention 2006-2009.

récolte. Les charges variables en intrants sont secondaires dans le coût de production. L'eau d'irrigation est l'intrant le plus coûteux. En année médiane, avec pleine satisfaction des besoins de la canne, l'eau représente de 12% (CAS3) à 20% (CAS1) du coût complet de production. L'amortissement du matériel d'irrigation compte pour 3 % (couverture totale) à 8% (goutte à goutte) du coût total. La main d'œuvre mobilisée pour l'irrigation n'est pas comptabilisée dans les coûts car cette tâche est généralement assurée par l'exploitant ou un aide familial. Ce référentiel économique est détaillé en annexe 2.

3 LES USAGERS IRRIGANTS ET LEURS SYSTEMES DE PRODUCTION A L'ECHELLE DE L'EXPLOITATION

3.1 De fortes disparités foncières entre les irrigants

Les périmètres irrigués du Sud se caractérisent par une demande en eau agricole très atomisée. Sur un effectif total de 2430 abonnés à l'irrigation en 2000 (Statistique Saphir Bras de la Plaine & Bras de Cilaos) on en dénombre 1034 soit 42% avec une surface irriguée inférieure à 1 ha. Ces « micro-irrigants » ne sont vraisemblablement pas ou plus des agriculteurs comme le laisse penser leur localisation concentrée dans des secteurs en voie d'urbanisation¹⁴. En considérant seulement les irrigants de plus de 1 ha, les données Saphir convergent avec l'effectif des exploitants recensés par le RGA 2000, estimé à environ 1400. Parmi ces irrigants exerçant une activité agricole, on note également des disparités de structure importantes, comme le montrent les graphes ci-dessous.

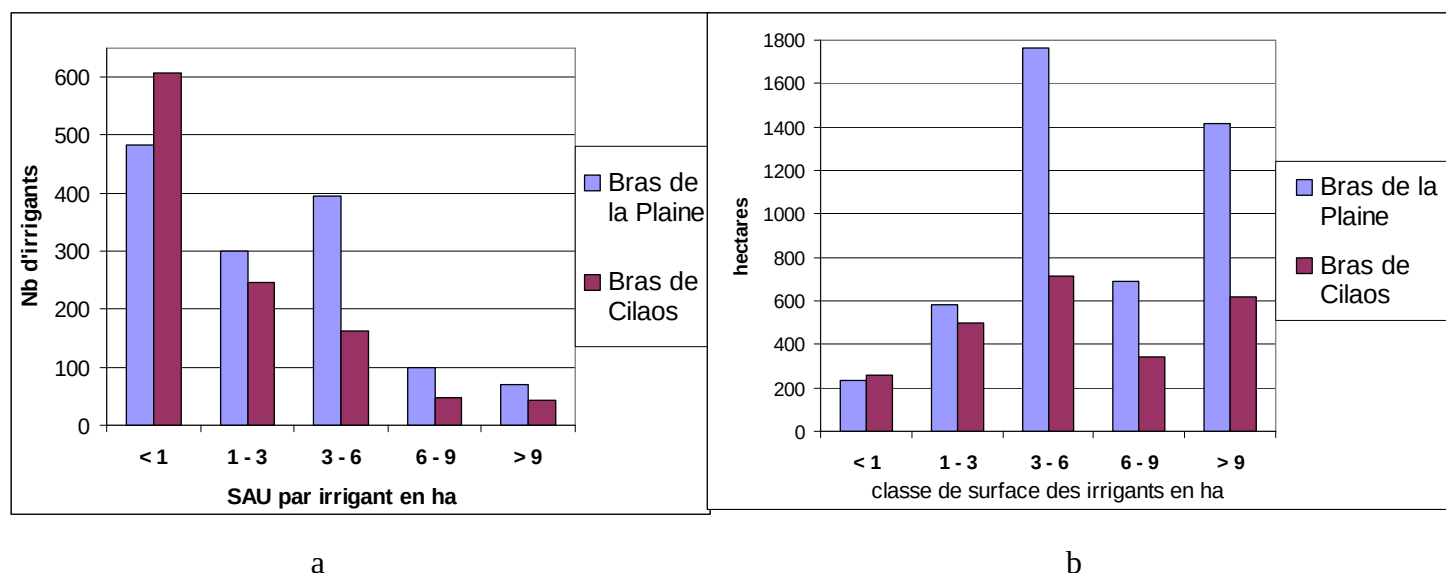
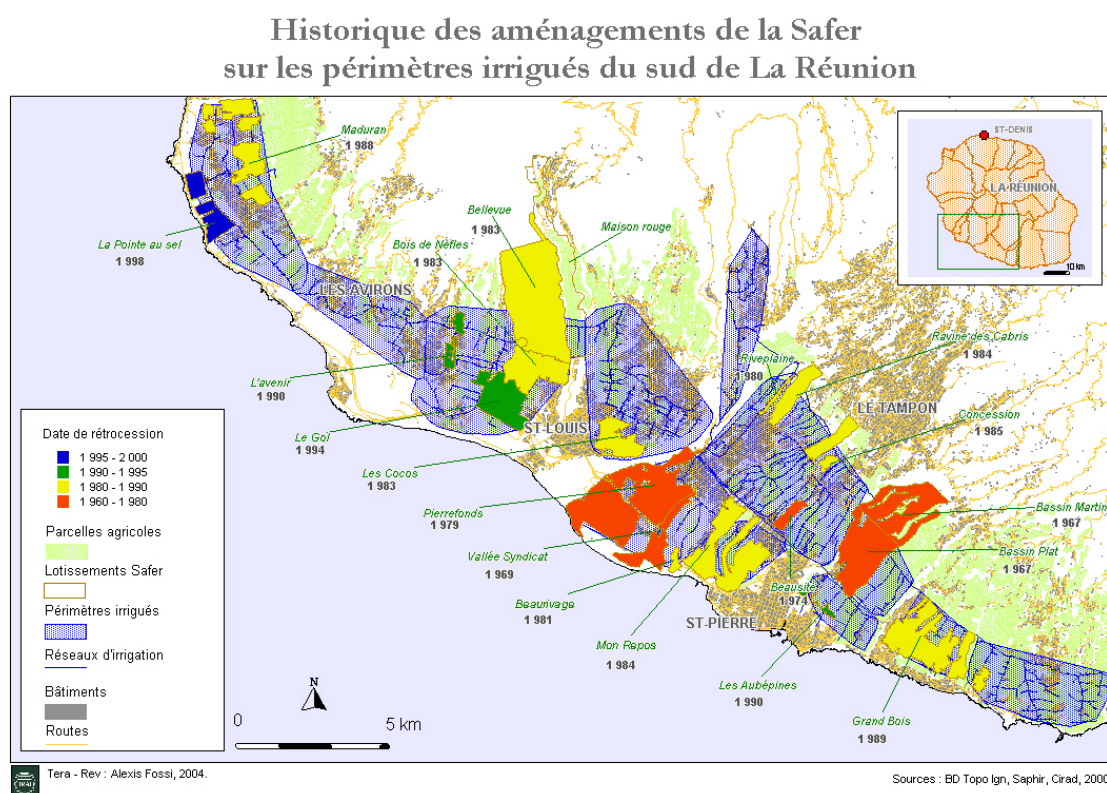


Figure 13 Distribution des irrigants (a) et de la surface totale (b) par tranche de surface souscrite à l'irrigation

Source : Saphir 2000 population de 2435 abonnés

¹⁴ Ce sont les secteurs en périphérie des villes qui connaissent une très forte proportion d'abonnés ayant moins de 1 ha : 85% à Saint Louis Plaine des Aloes, 60% à La Rivière Gol les hauts, 55% aux Avirons, 53% à Saint Pierre -bas de Bassin Plat, 46% à la Ravine des cabris et 43% à la Petite Ile

La répartition des irrigants par classe de surface souscrite est très déséquilibrée. Les plus petites structures sont prépondérantes mais ne couvrent qu'une faible surface (7% pour les deux périmètres) tandis que les exploitations de plus de 9 ha concentrent près de 30% des terres irriguées. L'effet de la réforme foncière est notable notamment sur le périmètre du Bras de la Plaine où la tranche « 3 à 6 ha » qui correspond aux attributaires SAFER, est fortement représentée en effectifs et en surface. La réforme foncière a, par son ampleur (près de la moitié de la surface agricole a été redistribuée depuis les années 1970 parallèlement à l'aménagement des périmètres irrigués), façonné l'agriculture de la zone en promouvant le modèle de l'exploitation familiale de 5 ha en quasi monoculture de canne. L'évolution récente de la politique foncière vers un modèle cannier de 7 à 10 ha a concerné un nombre limité d'exploitants compte tenu de la rareté du foncier disponible.



Carte 4 Lotissements SAFER sur les périmètres irrigués du Sud

3.2 Typologie des systèmes de production irrigués d'après les structures et stratégies des exploitations

Compte tenu des contraintes et opportunités conférées par les ressources disponibles dans leur exploitation, les irrigants mettent en œuvre des stratégies variées pour atteindre leurs objectifs. Les enquêtes de 2001 et 2003 auprès des irrigants ont permis de caractériser ces stratégies. Le principal facteur de différenciation retenu tient à la fonction assignée à l'agriculture par le ménage, généralement corrélée à la dimension de l'exploitation. Un

premier clivage intervient donc entre, d'une part, des stratégies tournées vers la production agricole, où l'objectif est d'assurer par les activités agricoles une part essentielle du revenu du ménage, même si elle n'est pas exclusive. D'autre part des stratégies autres que productives dont les objectifs visés peuvent être variés : obtenir un revenu agricole d'appoint et un statut social, maintenir un patrimoine foncier, conserver un style de vie... En recherchant les cohérences entre structure de l'exploitation, choix stratégique des systèmes de cultures et d'activités, et niveaux de performances, ces enquêtes ont abouti à différencier 7 grands types de systèmes de production sur les périmètres irrigués. Les cinq premiers types présentés relèvent des stratégies agricoles, et se différencient selon la dimension économique atteinte et le degré de diversification par rapport à la canne. Les deux autres types s'inscrivent davantage dans des stratégies patrimoniales ou d'habitat.

- les exploitations en quasi monoculture de canne à sucre stabilisées à moins de 6 ha. Ces exploitations sont restées proches du modèle SAFER initial. Elles n'ont pas saisi les opportunités d'agrandissement et dégagent des revenus limités (de l'ordre du SMIC) mais toutefois garantis par la canne à sucre ce qui satisfait des aspirations de sécurité. La limitation en surface les conduit à intensifier la canne à sucre en mobilisant leur main d'oeuvre. La main d'œuvre familiale peut ainsi se trouver complètement employée en période de coupe mais reste largement disponible l'autre moitié de l'année. Ainsi une grande partie s'engage dans des activités extra-agricoles (bâtiment, transport) généralement précaires et informelles mais fondamentales pour la viabilité de l'exploitation. Dotées de faibles moyens, ces exploitations sont souvent restées avec du matériel d'irrigation ancien et peu coûteux (couverture totale ou intégrale sans automatismes). Les systèmes de culture canniers mis œuvre sont du type CAS1 ou CAS2.
- les exploitations cannières en début de diversification. Un grand nombre de petites et moyennes exploitations se sont diversifiées dans le maraîchage, l'arboriculture ou le petit élevage (caprin, volaille) pour compléter le revenu de la canne à sucre et employer leur main d'œuvre familiale dans la période d'inter-coupe. Il peut s'agir d'une situation de transition avant d'accorder la priorité aux cultures de diversification. Ces cultures sont attractives par leur forte marge unitaire par hectare, toutefois elles présentent l'inconvénient d'être risquées au niveau du rendement (sensibilité aux cyclones) et surtout des prix de vente (marché concurrentiel). Un retour à la monoculture de canne à sucre est également possible en cas d'agrandissement.
- les exploitations cannières étendues à 10 ha et plus. Ces exploitations ont misé sur l'agrandissement en s'appuyant sur de bonnes performances techniques et économiques en canne à sucre. De telles stratégies ont pu se déployer surtout dans les années 1970 et 1980 lorsque le foncier était assez disponible et peu coûteux ou plus tard en cumulant un second lot Safer. Avec des surfaces qui atteignent maintenant les 10 ha par actif voire plus, la spécialisation en canne à sucre offre le triple intérêt d'une rémunération du travail significative (de l'ordre de 2 SMIC), d'une sécurité de revenu et d'une relative disponibilité de la main d'oeuvre en période d'inter-coupe. Ainsi ces exploitants peuvent aussi rechercher une pluri-activité. Les investissements visant à réduire le temps de travail sont privilégiés, donc les automatismes pour l'irrigation sont fréquemment adoptés. Les exploitations sont équipées en tracteur et tendent à évoluer vers un système cannier de type CAS3.

- les exploitations donnant la priorité aux productions de diversification (maraîchage, fruits, engraissement de bovins) et maintenant une sole en canne. Ayant sécurisé leurs débouchés par des contrats, ces exploitants étendent les productions de diversification au maximum de leur capacité de travail, complétée souvent par l'embauche de salariés. La canne à sucre peu exigeante en travail est maintenue pour occuper le foncier et servir de garantie. Les bons résultats financiers de ces exploitations leur permettent généralement de conjuguer à la diversification, une stratégie d'extension foncière. La forte exigence en travail sur les productions de diversification les conduit à moderniser leur matériel d'irrigation avec des automatismes.
- Les exploitations spécialisées sur des productions à forte valeur ajoutée et sans canne: maraîchage, horticulture ou élevage hors sol. Cette stratégie est surtout le fait d'exploitants dotés de capitaux importants, souvent d'origine extérieure à la zone. Installés sur de petites surfaces, ils ont investis dans des systèmes très intensifs comme les serres qui leur permettent de s'affranchir de certains aléas.
- les micro- producteurs qui s'apparentent soit à des reliques de systèmes traditionnels de monoculture cannière, soit à des petits vergers ou jardins familiaux. Dotés de surfaces inférieures à deux ou trois hectares et sans capital d'exploitation significatif, ces ménages exercent une activité agricole d'appoint et tirent l'essentiel de leur revenu d'activités extérieures ou des aides sociales. L'habitat est souvent une motivation au maintien de la parcelle, les charges d'exploitation sont minimisées. Ce type est très présent dans les zones en voie d'urbanisation.
- les pluriactifs (formels) dotés d'une sole agricole moyenne à grande. Ces derniers sont animés par des objectifs de préservation de leur patrimoine foncier, compte tenu des plus values potentielles futures avec l'urbanisation, ou de maintien d'un cadre de vie rural. Cherchant à réduire le temps passé sur l'exploitation, ils privilégient les cultures fruitières (litchis, manguiers, cocotiers) avec vente sur pied de la récolte, ou la canne à sucre en recourant à des prestataires de service pour le chargement et transport.

L'importance respective de ces différents types, estimée à partir des effectifs et de la SAU du RGA 2000, est la suivante (données en Annexe 3) :

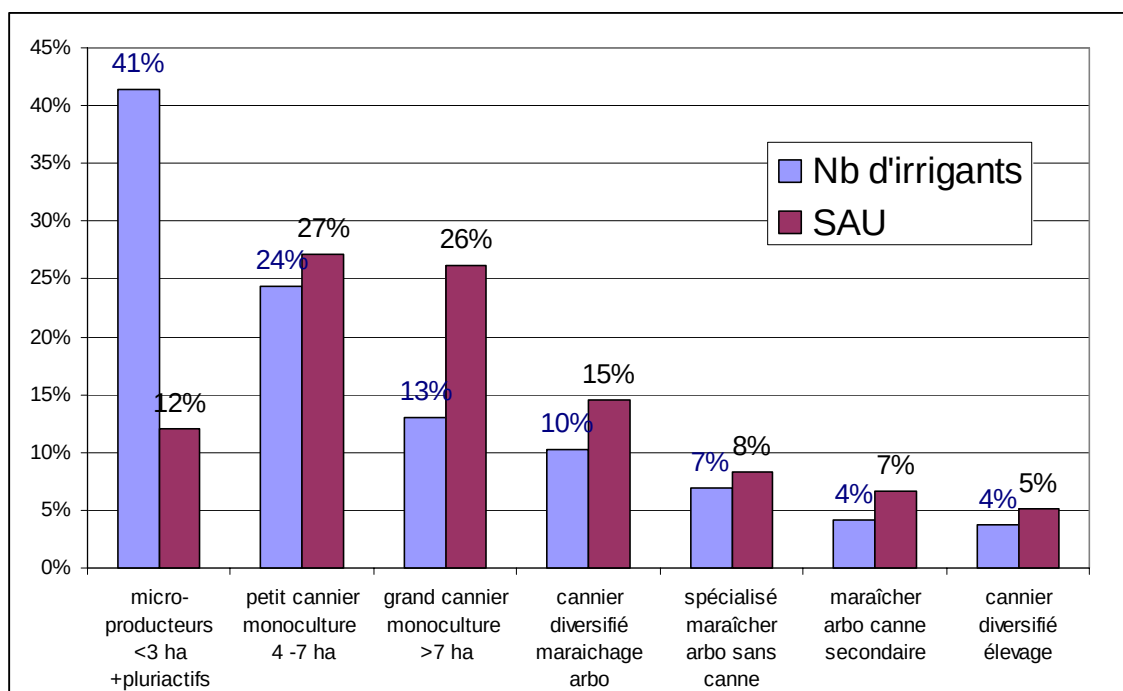
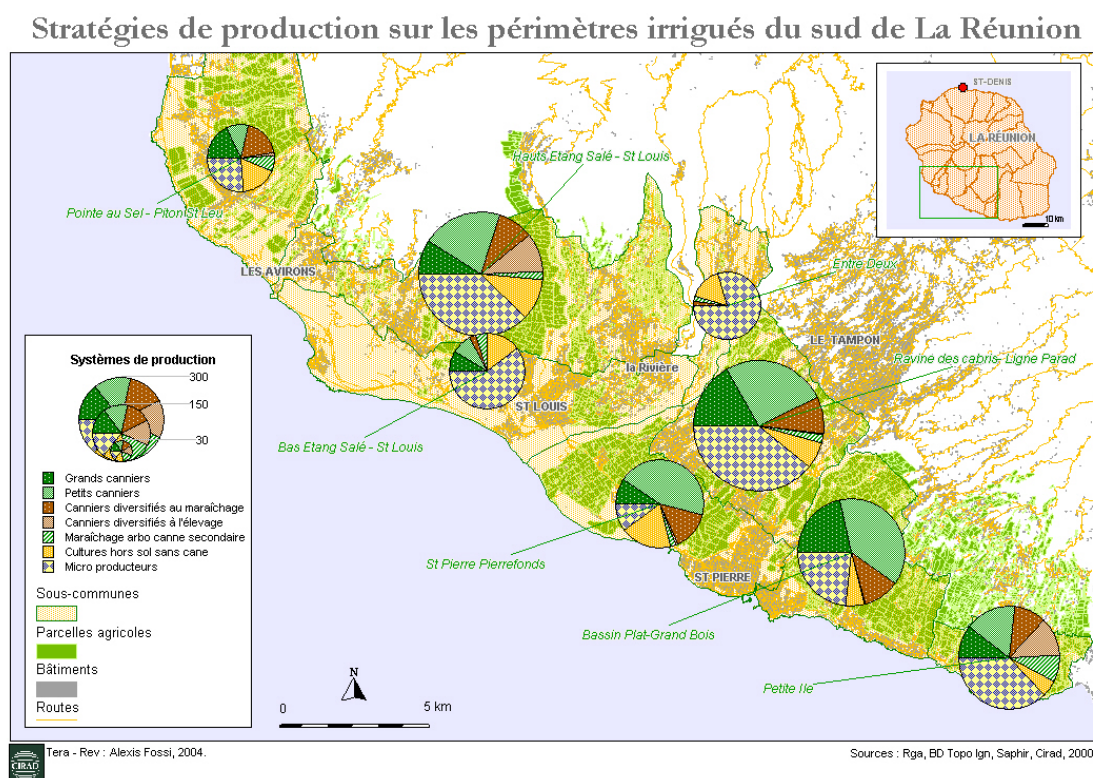


Figure 14: Répartition des exploitants et du foncier par type de système de production - Périmètres du Bras de la Plaine et du Bras de Cilaos source : RGA 2000 1470 exploitations

La carte suivante précise la répartition géographique des systèmes de production au sein des périmètres.



Carte 5 : Répartition des exploitations irriguées par type de système de production Source : RGA 2000 – résultats par sous-commune

Les différences de structure typologique de la population d'exploitations entre les sous-communes s'expliquent par la localisation des restructurations foncières réalisées par la Safer. Dans les secteurs fortement restructurés (Pierrefonds, Bassin Plat-Grand Bois, Pointe au Sel) prédominent les systèmes canniers en monoculture et non les micro-exploitations.

Système de production et flexibilité dans la gestion de l'eau

Les systèmes de production basés sur la monoculture de canne se distinguent évidemment par une certaine rigidité puisque l'assolement est fixé pour plusieurs années. La stratégie de gestion de l'eau à l'échelle de l'exploitation se ramène alors au cas examiné précédemment de gestion du système cannier : la maximisation du revenu passe par la satisfaction quasi-complète du besoin en eau de la canne et l'éventuel rationnement en eau découlera d'une contrainte de coupure à la borne. Les adaptations que pourrait opérer l'irrigant en cas d'augmentation du prix de l'eau ou de restrictions concernant l'équipement de sa sole cannière en matériel d'irrigation plus perfectionné, ou bien des arbitrages pour l'allocation de l'eau entre parcelles lorsque la sole cannière intègre différents systèmes techniques.

Les canniers diversifiés présentent une plus grande flexibilité face à d'éventuelles contraintes sur l'offre en eau, l'assolement constituant alors une variable d'ajustement supplémentaire. C'est dans leur cas que les modèles d'exploitation par optimisation présentent le plus grand intérêt.

4. FORMALISATION DES COMPORTEMENTS DES IRRIGANTS PAR UN MODELE D'OFFRE AU NIVEAU DE L'EXPLOITATION AGRICOLE

4.1 Objectif et principes de la modélisation de l'exploitation

Les comportements stylisés des agriculteurs irrigants présentés précédemment peuvent être formalisés dans des modèles qui rendent compte de la stratégie de production suivie : le choix des cultures et techniques de production associées et en corollaire, l'affectation des ressources disponibles sur ces cultures, et tout particulièrement l'eau d'irrigation. Ainsi, le modèle vise à représenter une exploitation-type caractérisée par un objectif et une certaine dotation en ressources fixes (main d'œuvre familiale, foncier, équipement, débit d'eau disponible), et à exprimer les choix de production qui découlent de ces éléments de structure et des paramètres d'environnement (prix, restrictions d'eau...). La finalité de cette approche de modélisation étant d'une part, d'explicitier, en intégrant une approche globale de l'exploitation, les choix actuels des irrigants et d'évaluer par la simulation, les impacts possibles sur leur assolement et sur leur demande en eau de changements dans les conditions de l'offre en eau.

L'approche retenue d'optimisation sous contraintes par la programmation linéaire repose sur une hypothèse centrale de rationalité de l'exploitant. Ce dernier est supposé mettre en œuvre des actions finalisées vers un objectif d'optimisation. Dans le présent modèle, la fonction d'objectif est la maximisation du revenu de l'exploitation. Cet objectif ne semble pas exclusif pour l'ensemble des types d'exploitations enquêtés mais il apparaît comme central pour les exploitants dont l'activité est principalement agricole, qui représentent l'essentiel de la demande en eau des périmètres.

Le modèle retenu est statique, il fournit une solution d'assolement et d'allocation des ressources optimale pour une configuration de structure d'exploitation donnée et les simulations sont appliquées ici pour le court terme à facteurs de production fixes inchangés. La formalisation mathématique du modèle est présentée en annexe 4.

4.2 Le champ de la modélisation : les systèmes de type canniers en monoculture et diversifiés en production végétale

La modélisation économique est appliquée aux systèmes de production canniers qui sont les plus consommateurs d'eau mais pour lesquels des marges de manœuvre semblent exister dans la conduite de l'irrigation, et pour les exploitations d'une certaine dimension économique animées par une logique de croissance du revenu agricole. Cela revient à considérer dans la typologie précédente, les 4 systèmes-types dont les caractéristiques structurelles issues des enquêtes de 2002-2003, apparaissent dans le tableau ci-dessous :

Type	Effectif BP+BC	Structure d'exploitation					% Canne / SAU
		SAU	SAU/actif familial	Salariés permanents	Actifs familiaux	Matériel	
Petit cannier monoculture	350	5	5	0	1	recours à prestataire	100%
Grand cannier monoculture	180	10	10	0	1	Tracteur+ chargeur	100%
Cannier diversifié maraîchage- arboriculture	150	6	3.3	0	1.5	tracteur	80%
Maraîchage arbo canne secondaire	60	7	4.7	1	1.5	tracteur	60%

Tableau 4: Systèmes de production pris en compte pour la modélisation économique

L'ensemble des systèmes de production avec canne à sucre est pris en compte à l'exception des exploitations diversifiées avec l'élevage bovin (engraissement) qui sont en effectifs très réduits et avec des références technico-économique insuffisamment connues, et des micro-exploitations dont les objectifs sont mal définis.

4.3 Les opportunités de productions du modèle d'exploitation

Les activités de production se caractérisent par l'espèce cultivée et l'itinéraire technique appliqué à la culture qui se traduit par une consommation de ressources (les coefficients techniques en eau, main d'œuvre, équipements...) et un niveau de rendement. En termes économiques, pour la fonction d'objectif du modèle, une marge (produit – charges opérationnelles) est associée à chaque activité et le revenu à maximiser correspond à la somme des marges des activités. Les diverses cultures prises en compte dans le modèle sont, outre la canne à sucre, celles les plus fréquemment rencontrées comme diversification (détail en annexe 2).

- Canne à sucre irriguée avec trois niveaux d'intensification (CAS1, CAS2, CAS3) croisés par le mode de coupe (manuelle, mécanique) et de chargement (interne, externalisé auprès d'un prestataire). Ces systèmes standards ont été présentés au § 2.6.

- Maraîchage intercalaire sur repousse de canne à sucre représenté par la tomate en dérobé (MARToDer). Cette culture présente deux contraintes majeures qui expliquent une tendance au déclin. D'une part son cycle est calé sur une période risquée, la période cyclonique afin d'éviter une trop forte concurrence de la canne, à la fermeture du couvert. D'autre part, elle fait obstacle à la mécanisation de l'entretien de la canne, elle se trouve donc associée aux systèmes canniers CAS1 et CAS2.

- Maraîchage avec rotation à jachère, représenté par le haricot demi sec (MARHasec). La culture intervient en inter campagne de canne (saison humide) et laisse place à une jachère lors de la campagne de coupe de la canne (saison sèche). Ce système traditionnel permet d'occuper la main d'œuvre en saison creuse et de réduire la consommation d'eau mais offre une faible valorisation de la terre.

- Maraîchage avec rotations axées sur la tomate en période humide. Deux variantes sont à considérer selon la date d'implantation : (i) après la période cyclonique (Tomate post-

cyclone+cucurbitacée -MARToCo) permet d'éviter les risques phytosanitaires et climatiques élevés de cette période mais implique un seul cycle de culture supplémentaire, de 3 mois. (ii)pendant la période cyclonique (Tomate saison cyclonique+oignon - MARToCyO), système risqué mais qui permet en cas de succès de bénéficier de prix de contre-saison attractifs et d'enchaîner avec une culture à cycle plus long (comme l'oignon) et à meilleure rentabilité.

- Maraîchage permanent de plein champ, représenté par l'association de légumes-feuilles (salade, brèdes, oignon vert, ... -MARfeuille). Ce système très exigeant en travail occupe la parcelle toute l'année et se trouve donc exposé aux risques de la période cyclonique.

- Arboriculture représentée par le manguier, espèce la plus fréquente déclinée en deux systèmes de culture selon le niveau d'intensification: verger de mangue de variété Early Gold (Mang_EG), plus intensif avec une meilleure valorisation et verger traditionnel de variété locale José (Mang_J). Ces systèmes de vergers mono-spécifiques sont principalement rencontrés dans les grandes exploitations. La dynamique de plantation s'est essoufflée avec l'arrêt des subventions à l'installation de vergers (mangue, letchis).

- Ananas de plein champ à vocation export

4.4 Les contraintes sur les ressources du système et l'achat de facteurs de production

Les contraintes expriment d'une part, les limitations dans les ressources fixes disponibles sur l'exploitation et pour lesquelles les diverses opportunités de production se trouvent en concurrence. Il s'agit d'autre part, des contraintes techniques inhérentes aux processus de production envisageables et traduisant leurs besoins en ressources. Les référentiels techniques mobilisés à cette fin sont, pour la canne à sucre, ceux issus des enquêtes et modèles présentés précédemment, et pour les cultures de diversification, principalement issus du SUAD. Quatre contraintes sont considérées dans le modèle :

- la surface cultivable, considérée intégralement irrigable. La différenciation de la qualité des sols n'est pas prise en compte, on suppose que l'ensemble des opportunités de production est possible sur la surface disponible. La difficulté de mobiliser davantage de foncier, observée dans la réalité, se traduit dans le modèle par l'absence de recours à la location de terres additionnelles.

- la main d'œuvre : les références de calendriers de travaux par culture fixent les besoins en main d'œuvre par mois qui sont confrontés aux disponibilités en main d'œuvre familiale. Pour faire face aux besoins saisonniers, comme la coupe de la canne, le modèle donne la possibilité d'une embauche de main d'œuvre salariée.

- l'eau d'irrigation : le volume disponible globalement sur la campagne est plafonné par le débit à la borne d'irrigation. Toutefois cette contrainte ne se pose pas à l'échelle de l'année où la consommation globale est toujours inférieure aux disponibilités mais en saison chaude où les besoins pour la canne sont au maximum et où peuvent intervenir des coupures du réseau. La contrainte est exprimée par la disponibilité en eau durant cette période limitante (définie au § 2.4). L'activation de cette contrainte dans le modèle selon le scénario simulé, entraîne un rationnement en eau de la canne à sucre. Les standards de production de canne pris en compte intègrent un niveau d'alimentation en eau optimal

(100% ETM) et deux niveaux rationnés (92% ETM et 86% ETM) selon les résultats des scénarios de rationnement mis en évidence au § 2.5.

- le matériel d'irrigation : cette contrainte sur les surfaces équipées par type de matériel, exprime le lien entre mode d'irrigation et niveau d'intensification de la canne (cf § 2.6). Elle correspond également à une contrainte de trésorerie qui semble en cause dans le maintien d'équipement moins performant (aspersion en couverture totale) dans les petites exploitations cannières à faible capital.

4.5 Prise en compte du risque

Un trait particulier de l'activité agricole est évidemment la forte exposition au risque compte tenu du caractère complexe et aléatoire du processus de production (cycle long soumis à des aléas naturels qui peuvent impacter le rendement des cultures ou les conditions de mobilisation des ressources) et des fluctuations des prix de vente des produits écoulés sur les marchés concurrentiels. La perception et l'attitude face au risque (de nature biophysique ou économique) est admise comme une composante essentielle du comportement des agriculteurs qui doit être intégré dans les modèles de production. Le type de modèle utilisé basé sur la programmation linéaire, prend en compte un seul facteur de risque à la fois.

Le risque identifié comme prépondérant pour des exploitations cannières avec des opportunités de diversification porte sur la marge de ces cultures de diversification (fruits et légumes), soumises à la fois à des fortes fluctuations de rendement (notamment du fait de la sensibilité aux épisodes cycloniques) et de prix (marché étroit et concurrentiel). Le risque est alors exprimé dans le modèle par un aléa sur les marges, géré dans le cadre de la satisfaction d'une contrainte de revenu minimum pour l'exploitation. On considère que l'exploitant effectue un arbitrage entre les gains espérés et le risque encouru de chute de son revenu au dessous du seuil minimum. L'aversion au risque de l'exploitant est exprimée par un coefficient lié à la probabilité de défaillance sous le seuil de revenu, acceptée par l'exploitant. Le coefficient d'aversion au risque et le seuil de revenu minimum ne sont pas directement mesurables et constituent des paramètres de calage du modèle qui sont spécifiés pour chaque type d'exploitant.

Pour les exploitations cannières en monoculture, un aléa majeur est la disponibilité en eau. Une variante du modèle pour ce type d'exploitations intègre un risque sur le volume d'eau disponible en période limitante.

5. RESULTATS DES MODELES : BASES OPTIMALES DE PRODUCTION ET FONCTIONS DE DEMANDE EN EAU DES EXPLOITATIONS

5.1 Pertinence et limites du modèle générique d'exploitation décrivant les types canniers monoculteurs et diversifiés

Le modèle générique a été conçu pour représenter l'ensemble des types d'exploitation en système cannier de monoculture ou diversifié en productions végétales. Il intègre donc presque toute la gamme des activités possibles dans la zone et est paramétrable pour les facteurs de production disponibles sur l'exploitation (foncier, main d'œuvre familiale, matériel d'irrigation...) et pour la sensibilité au risque de chute de revenu des productions de diversification. En faisant varier ces paramètres structurels, la solution optimale d'assolement et d'allocation des ressources évolue et doit correspondre au changement de système de production constaté dans la réalité selon la typologie issue des enquêtes. Pour que le modèle soit flexible face au paramétrage des structures ou à des changements d'environnement, les contraintes ont été autant que possibles limitées aux dotations en ressources de l'exploitation qui peuvent être des facteurs limitants et à la satisfaction d'un revenu minimum.

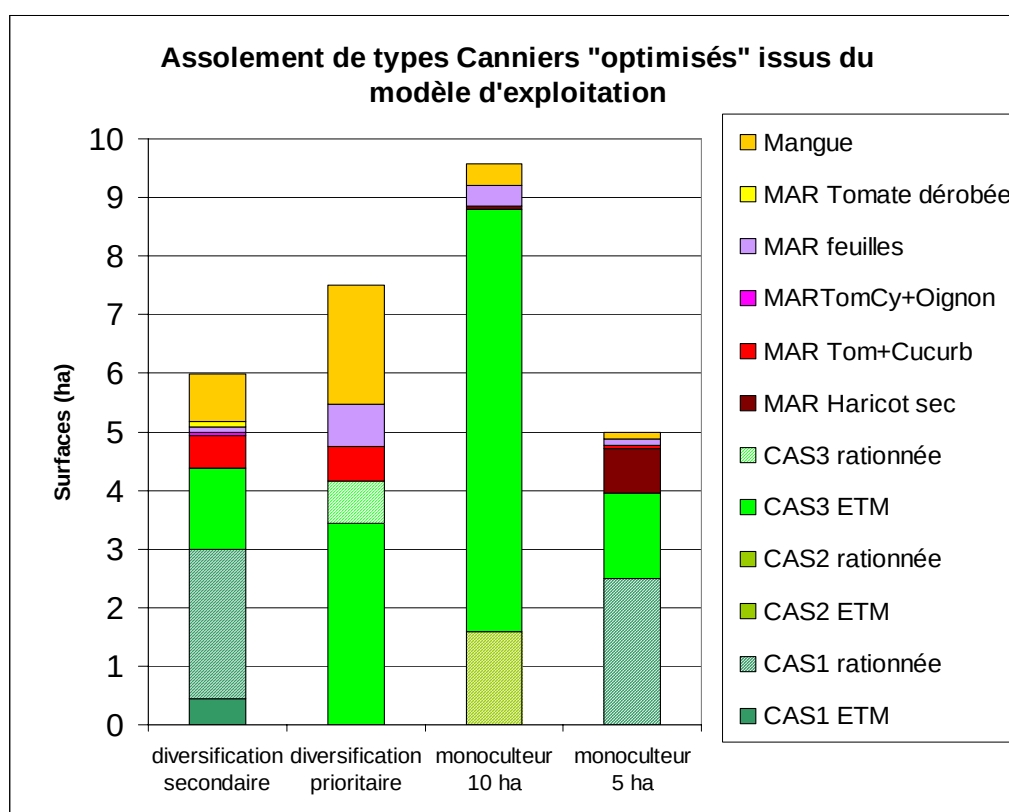


Figure 15 Assolement de types canniers optimisés issus du modèle d'exploitation

Les simulations faites en paramétrant le modèle avec des valeurs croissantes de surface disponible par actif, ont permis de retrouver comme solution optimale des types de systèmes de production observés dans la réalité : le type « cannier avec priorité à la

diversification» (7.5 ha et 2.5 actifs permanents), le type « cannier diversifié » (6ha et 1.5 actif familial) et le type « grand cannier en monoculture » (10 ha et 1 actif familial). Ce qui confirme qu'un exploitant limité en main d'œuvre disponible mais avec une grande surface (10 ha) aurait intérêt à se consacrer à la monoculture de canne. Par ailleurs, le paramétrage du coefficient d'aversion au risque (contrainte de probabilité de satisfaction du revenu minimum) contribue à différencier les types selon leur degré d'engagement dans la diversification. Cette convergence des réactions du modèle avec les systèmes de production réels tend à montrer que le modèle construit est robuste et explique bien les choix d'assolement réalisés par les agriculteurs selon les ressources à leur disposition.

Le type « petit cannier en monoculture » est moins bien représenté par le modèle. Dans cette configuration de 5 ha pour 1,5 actif, la diversification vers le maraîchage s'imposerait selon le modèle. Or, d'après le RGA, la majorité des exploitations de cette dimension seraient en monoculture de canne ou quasi monoculture. Cet écart à la réalité observable tient à des contraintes ou opportunités non prises en compte dans le modèle. D'une part, c'est dans ce type que les activités informelles semblent particulièrement développées. Il est admis que les productions de diversification, en partie informelles sont sous estimées par les statistiques agricoles. Les activités extérieures à l'exploitation, elles aussi informelles (bâtiment, artisanat...) car souvent précaires, semblent également fréquentes dans ce type qui dispose de temps disponible pendant la saison d'intercoupe. D'autre part, la contrainte de revenu minimum qui favorise la production de canne plus sécurisée, ne semble pas jouer suffisamment. Une contrainte de trésorerie doit également freiner la diversification dans ces exploitations à faible revenu. En effet, l'accès au crédit est plus difficile pour les productions de diversification. L'absence de prise en compte d'une contrainte de trésorerie explicite constitue certainement une limite essentielle du modèle; elle tient au manque de données disponibles et au souci de concevoir un modèle générique qui n'intègre pas une trop grande complexité. La solution retenue pour rendre compte de ces exploitations est de contraindre le choix d'assolement en le limitant aux différentes activités cannières et au maraîchage en dérobée à la replantation.

5.2 Bases optimales de production : assolement et allocation des ressources

La déclinaison du modèle sur chacun des quatre types d'exploitations a nécessité la prise en compte de quelques contraintes spécifiques qui sont présentées, en préalable aux résultats sur les solutions optimales et leurs facteurs limitants.

- **Modèle « canniers avec diversification secondaire »**

Capacités de production et stratégie

D'après la typologie, ce sont des exploitants installés sur une surface de 5 à 6 ha (correspondant notamment à un lot Safer) et qui n'ont pas de possibilité d'extension, donc ils intensifient la mise en valeur des terres par des cultures de diversification. L'embauche de main d'œuvre salariée est très limitée puisque le développement de ces cultures de diversification correspond à une volonté d'occuper à plein temps la main d'œuvre familiale (1,5 actifs) disponible sur l'exploitation toute l'année. La contrainte de revenu minimum pour l'exploitation est fixée à 15000€, avec une probabilité de 85% de réaliser un revenu supérieur ou égal à ce seuil (aversion au risque de 1,2 soit une valeur assez forte qui traduit une certaine prudence de l'exploitant).

Les activités de diversification possibles sont le maraîchage (MARToCo, MARToDer, MARfeuille, MARToCyO) et l'arboriculture (Mang_EG et Mang_J).

Le maraîchage feuille est limité à 0,1 ha car c'est une culture très sensible aussi bien en terme de techniques culturales que de condition d'écoulement commercial. Cette contrainte est ajoutée car le référentiel adopté pour cette culture ne rend pas bien compte des difficultés de mise en œuvre de la production : $X_{\text{MARfeuille}} < 0,1$

Pour tenir compte de la présence de matériel d'irrigation ancien, on impose une surface minimale de 3 ha de canne conduite en aspersion avec couverture totale (activité CAS1 qui mobilise ce matériel) : $\sum X_{\text{CAS1}} \geq 3$

Les contraintes introduites sur la dotation en matériel d'irrigation rendent le modèle rigide en le privant de degré de liberté pour le choix du système cannier puisque ce dernier est associé à un matériel. C'est un point faible de ce modèle, mais cette juxtaposition de contraintes rigides permet de rendre compte des choix que les exploitants réalisent sur les périmètres sans trop complexifier les modèles en introduisant par exemple des contraintes de trésorerie.

La dernière particularité du paramétrage du modèle réside dans l'achat de main d'œuvre que nous avons rendu possible au mois de février. Cela s'est avéré nécessaire au cours du calage du modèle. Cet achat de main d'œuvre a été plafonné à 7 jours sur le mois.

Les résultats de l'optimisation : contraintes actives du modèle et niveau de mobilisation des ressources

- 4.4 ha de canne à sucre et 1.5 ha de cultures de diversification (0.7 ha de maraîchage et 0.8 ha de fruitier) ; une marge brute de l'exploitation de 37 600 €, élevée pour 1,5 actif
- L'activité CAS2 n'est jamais sélectionnée car elle est moins rémunératrice que la CAS3 et n'est pas imposée par une contrainte comme l'est la CAS1 en condition initiale. C'est un problème car la CAS2 est certainement la plus répandue sur les périmètres irrigués. Nous avons attribué cette réaction du modèle à l'absence de contrainte de trésorerie qui freinerait certainement l'achat d'automatismes et le passage à l'activité CAS3.
- La stratégie adoptée pour distribuer l'eau sur la sole cannière est de rationner la CAS1 pour pouvoir conduire la CAS3, à plus fort potentiel, sans la rationner. Il s'agit donc d'une optimisation de l'efficacité de l'eau. Nous retrouverons cette stratégie dans les exploitations en monoculture de canne. Cela traduit une tension assez forte sur l'eau pendant les décades limitantes. Ainsi, c'est la contrainte d'eau disponible en période limitante qui oriente le plus le choix des productions.
- La main d'œuvre familiale est bien occupée toute l'année, elle est complétée par 10 à 20 jours par mois de main d'œuvre salariée temporaire pendant la coupe.

Sensibilité au coefficient d'aversion au risque

Augmenter le coefficient d'aversion au risque (c'est à dire diminuer le risque qu'est prêt à prendre un exploitant) fait très légèrement augmenter la part de canne dans l'assolement, ce qui est logique puisque c'est une production au débouché sécurisé. C'est alors la surface en CAS3, la plus intéressante en terme de marge dégagée, qui augmente. La CAS1 dont la surface est stable (imposée par la contrainte de surface minimum en couverture totale) est plus rationnée lorsque le coefficient d'aversion au risque augmente. Rationner cette canne

permet en effet de limiter les charges en eau et ainsi d'assurer un revenu plus élevé (équivalent d'augmenter le coefficient d'aversion au risque).

On peut noter une rigidité assez forte de la sole en CAS3 qui n'est jamais rationnée. En

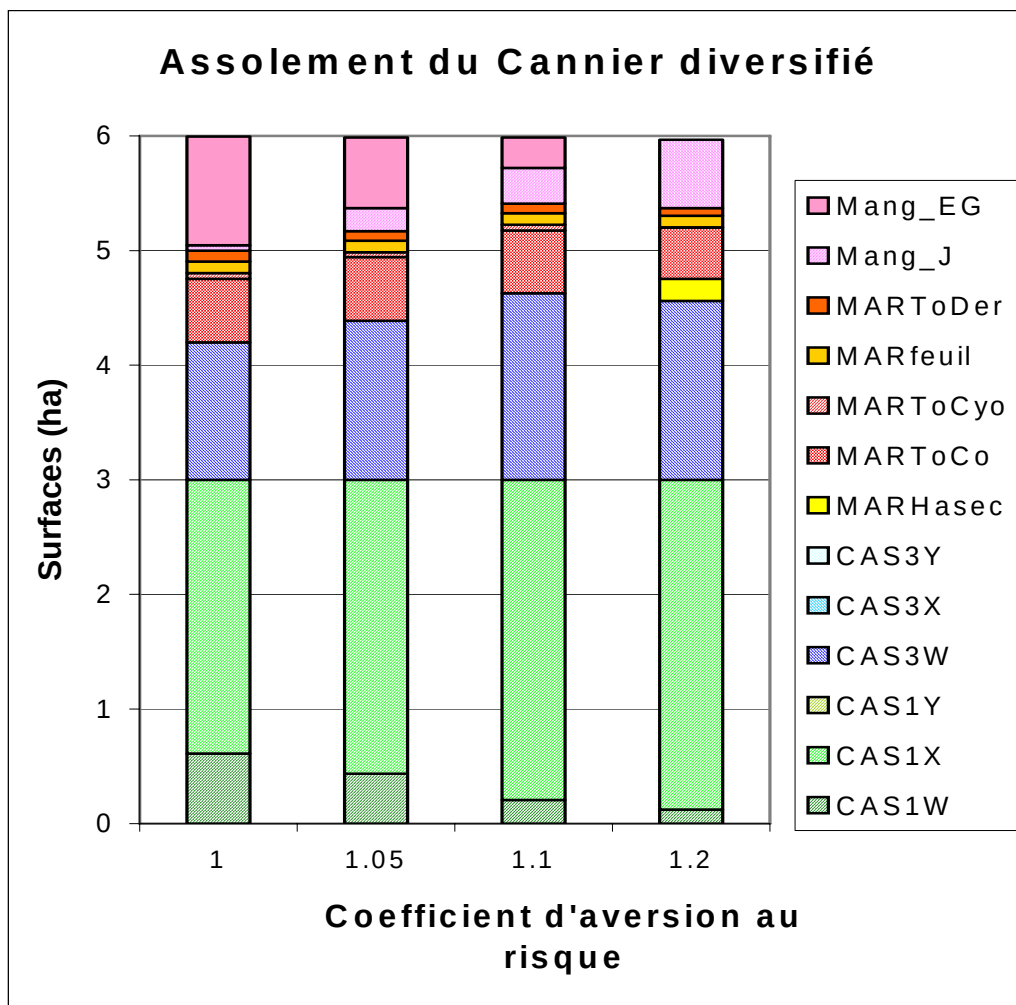


Figure 16 Assolement du type «cannier diversifié» selon le coefficient d'aversion au risque

effet, dans les référentiels canne à sucre retenus, la différence des ratios Volume/Rendement entre les niveaux de rationnements W et X plaide en faveur d'un rationnement des CAS1 plutôt que des CAS3.

Concernant les productions de diversification, la sole en arboriculture diminue (de 55 à 40%) lorsque le coefficient d'aversion au risque augmente. De plus, la mangue Josée avec un aléa plus fort sur la marge de l'activité voit sa part se réduire plus que proportionnellement. Les tomates cycloniques, très risquées, disparaissent. A leur place apparaît une sole en haricots secs, beaucoup moins risquée, mais moins rémunératrice.

Lorsque le coefficient d'aversion au risque augmente, les cultures choisies sont moins risquées, mais elles sont moins rémunératrices et l'espérance de marge de l'exploitation baisse progressivement : de 38 930€ pour un coefficient de 1 à 34 090€ pour un coefficient de 1,2.

- **Modèle « Cannier avec priorité à la diversification »**

Capacités de production et stratégie

Ces canniers ont la possibilité d'étendre leurs productions de diversification car ils ont pu sécuriser quelque peu leurs débouchés par des contrats. Ils étendent leur capacité de production au maximum de leur capacité de travail, en complétant par l'embauche de salariés. Sur une exploitation de 7,5 ha, la main d'œuvre disponible est de 1,5 actif familial et un salarié permanent. La canne à sucre est maintenue pour occuper le foncier excédentaire par rapport aux possibilités de diversification et servir de garantie. Il n'y a pas de contrainte imposant un minimum de surface en couverture totale car les capacités d'investissement de ce type d'exploitant sont plus importantes. Mais on considère que la sole cannière irriguée se partage en 50% de goutte à goutte et 50% de couverture intégrale. Les activités de diversification dans le maraîchage et l'arboriculture sont très variées, nous avons notamment ajouté dans ce modèle la possibilité de se diversifier en ananas à vocation export. Alors que les besoins en main d'œuvre sont élevés pour le maraîchage, l'achat de main d'œuvre est limité dans le modèle par une contrainte exprimant l'impossibilité pour un actif permanent d'encadrer plus de 2 salariés temporaires à la fois.

Les contraintes actives et niveau de mobilisation des ressources

Les sorties font apparaître que la canne occupe 50% de la surface de l'exploitation et les productions de diversifications sont variées : 1,8 ha d'arboriculture et autant de maraîchage, plus 0,4 ha de tomates dérobées. La marge dégagée s'élève à 80 000€, ce qui est très élevé pour une exploitation de 7,5 ha. La main d'œuvre est saturée sauf aux mois de décembre et janvier où 2/3 seulement de la main d'œuvre disponible est mobilisée. Il est difficile de saturer la main d'œuvre pour ces deux mois compte tenu des calendriers de travaux introduits dans les modèles. La main d'œuvre disponible pour le maraîchage est donc le principal facteur limitant.

La contrainte sur l'eau en période limitante n'est pas active : grâce à un transfert massif d'eau sur la canne depuis les surfaces en maraîchage moins consommatrices. Le système de culture tomate/concombre est particulièrement intéressant puisqu'il ne consomme pas d'eau durant la période où l'eau est limitante pour la canne.

Sensibilité au coefficient d'aversion au risque

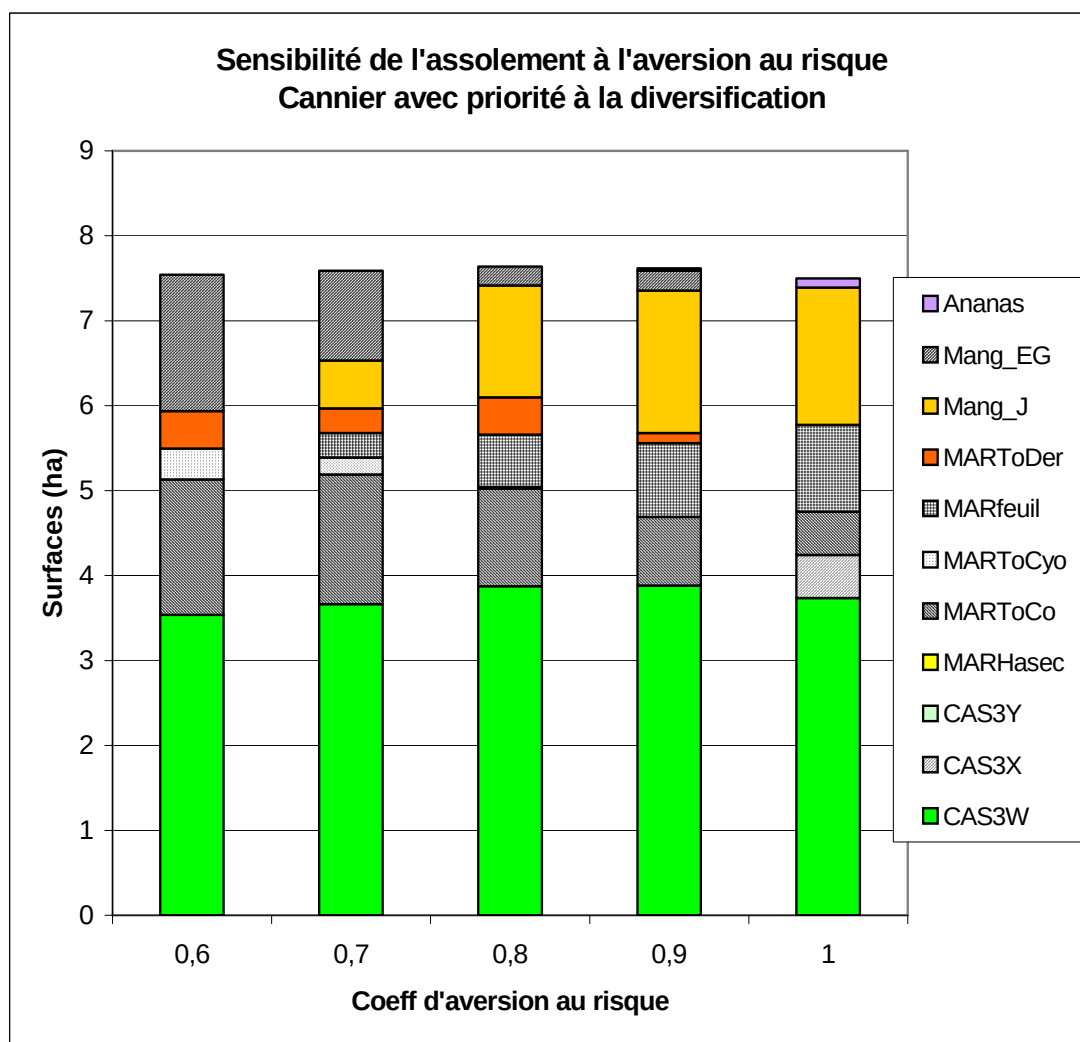


Figure 17 : Assolement du type «cannier avec priorité à la diversification » selon le coefficient d’aversion au risque

Augmenter le coefficient d’aversion au risque provoque la réduction de la part des cultures de diversification dans l’assolement : de 4,2 ha, on passe à 3,2 ha. On assiste à la disparition rapide de la tomate cyclonique et plus progressive des tomates dérobées. Les surfaces en tomate/concombre se réduisent progressivement au profit du maraîchage feuille qui progresse pour s’étendre sur 1 ha. De 2.5 ha de tomates, on passe à 0.7 ha à peine, ce qui permet de limiter l’achat de main d’œuvre au mois de novembre, où pas moins de 36 jours étaient achetées. Le maraîchage feuille permet une répartition plus uniforme du travail au cours de l’année, ce qui permet de limiter l’achat de main d’œuvre salariée temporaire pour limiter les charges et satisfaire la contrainte de revenu minimum. Mais cela conduit aussi à une utilisation moins efficace de la main d’œuvre familiale, avec de plus en plus de temps libre.

Parallèlement les surfaces en canne se développent, passant de 3.5 à 4.3 ha, ce qui active progressivement la contrainte sur l’eau en période limitante, et finalement, une partie de la canne doit être rationnée.

- **Modèle « Petits canniers 5 ha en monoculture »**

Stratégie et capacités de production

D’après la typologie, ce sont les exploitants restés sur un seul lot Safer de 5ha. La coupe, opération qui mobilise 60 à 80% du temps de travail annuel selon les itinéraires techniques,

est réalisée par le planteur lui même, sans embauche de main d'œuvre extérieure mais souvent avec un recours à l'entraide. Hors période de coupe, la manipulation du matériel d'irrigation est la principale occupation de ces planteurs. Ces exploitations ne disposent pas des capacités financières pour s'équiper de matériel d'irrigation performant notamment avec des automatismes, donc les systèmes canniers déployés sont CAS1 et CAS2 seulement, avec au moins la moitié de la sole cannière en CAS1. soit une contrainte $\sum X_{CAS2} < \sum X_{CAS1}$

Une autre contrainte est introduite dans ce modèle pour exprimer le fait qu'une trésorerie limitée entrave la capacité à embaucher de la main d'œuvre salariée. L'embauche des salariés pour la coupe est restreinte à la possibilité d'écarter des pics ponctuels de travail. La limite est fixée à 12 jours de salariés pour l'ensemble de la période de coupe.

$$\sum_i X_{A_MOi} < 12 \text{ pour } i \text{ compris entre } 7 \text{ et } 12$$

L'activité de culture de tomate, en dérobée de la canne à sucre (sur replantation soit un dixième de la sole cannière) est possible dans ce modèle.

Sorties du modèle

- Le plafonnement du volume d'eau disponible sur la période limitante est la principale contrainte active, elle oblige à rationner en eau la moitié de la sole cannière. C'est la CAS1 qui est rationnée, ce qui permet de conduire la CAS2, à plus fort potentiel, sans la rationner.
- Matériel d'irrigation : lorsqu'on relâche la contrainte d'équipement en couverture totale sur 1 ha, on libère du temps libre pour l'exploitant mais le gain marginal de 245€/ha est inférieur à l'amortissement du matériel de couverture intégrale fixé à 380€/ha.
- La production de canne atteint 460 t pour les 5 ha., soit un rendement de 92 t/ha conforme au rendement médian observé sur les périmètres du sud.
- La marge dégagée par l'exploitation modélisée est de 18 200 € ce qui représente un revenu à peu près équivalent au Smic en retranchant les charges de structure.
- La canne en monoculture laisse ces planteurs une partie de l'année désœuvrés : de 4 à 24 jours pendant les mois de février à juin.
- Près de 54000 m³ consommés, soit 10800 m³/ha

• **Modèle « grand cannier 10 ha en monoculture »**

Stratégie et capacités de production

Ce modèle d'exploitation bien doté en ressource foncière n'est en principe pas contraint sur la qualité d'équipement d'irrigation de sa sole cannière dans la mesure où on considère qu'il dispose de moyens d'investissement suffisants. Toutefois une contrainte de surface minimum en CAS2, pour un tiers de la sole, vise à traduire le fait qu'une partie des 10 ha est conduite de façon moins performante pour des raisons structurelles (hétérogénéité du milieu, distance au siège de l'exploitation...). En l'absence de cette contrainte l'ensemble de la sole cannière serait en CAS3. $\sum X_{CAS2} > (1/2) \sum X_{CAS3}$

Le coût de la main d'œuvre pour la coupe peut être un peu plus élevé dans ces grandes exploitations où la coupe, entièrement assurée par des salariés lorsqu'elle est manuelle, constitue l'opération critique. La fidélisation des coupeurs passe alors par une rémunération plus attractive (on a considéré un salaire majoré de 10% pendant la coupe).

Une possibilité de diversifier les productions sur de petites surfaces est introduite pour les tomates dérobées, et l'arboriculture (mangue) sur 1/15^{ème} des surfaces au maximum.

$$X_{ARBO} < (1/15) \sum X_{CAS1, 2 \& 3}$$

Les sorties du modèle

- Sur les 10 ha de l'exploitation, 9,5 ha sont utilisés pour la canne à sucre et 0,5 ha pour l'arboriculture.
- La marge dégagée par l'exploitation est de 28 700 €. Le volume d'eau consommé est de 10255 m³/ha, soit 92 300 m³ sur l'exploitation.
- La CAS2 occupe 2.8 ha (lié à la contrainte) et le reste de la sole cannière est de la CAS3 rationnée pour la moitié environ.
- La main d'œuvre est saturée sauf au moins de juin, période creuse pour le travail sur la canne à sucre. La coupe est réalisée à 100% par les salariés temporaires (embauche de 50 jours par mois pendant la coupe). La coupe mécanique n'est pas sélectionnée pour le prix moyen de la main d'œuvre de 48€/jour. Mais cette activité serait sélectionnée par le modèle pour des prix supérieurs à 50€ par jour de travail.

5.3 Sensibilité des modèles par système-type au prix de l'eau : les fonctions de demande en eau

• Demande en eau du Modèle « cannier avec diversification secondaire »

L'augmentation du prix de l'eau ne conduit pas à des changements significatifs dans la part de la canne dans l'assolement probablement du fait de la rigidité induite par la contrainte initiale d'une surface minimale en couverture totale (3 ha) qui est associée à un système CAS1. Un rationnement en eau modéré affecte alors la totalité de la surface CAS1.

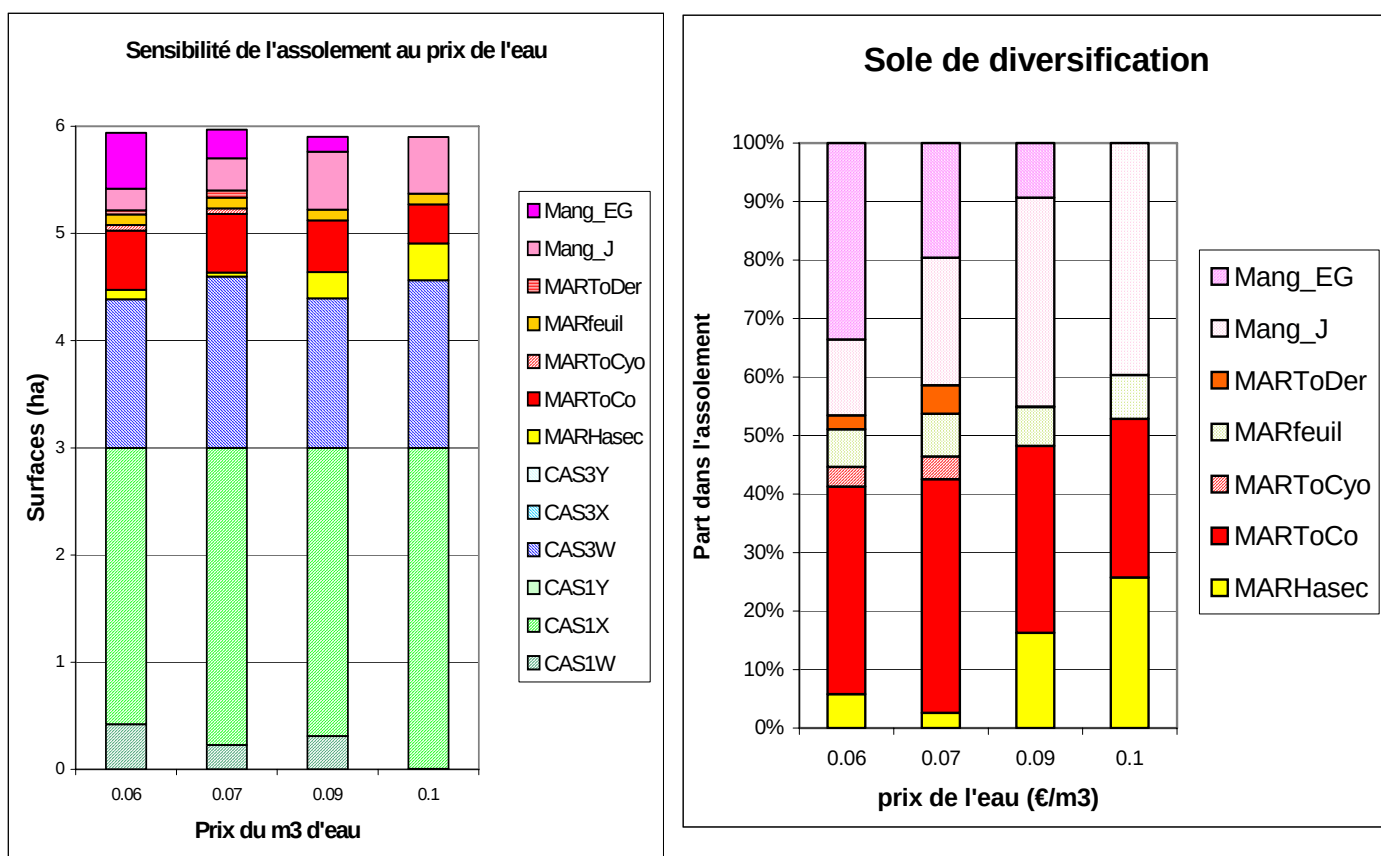


Figure 18 Assolement selon le prix de l'eau Type Cannier diversification secondaire

L'augmentation du prix de l'eau amène une simplification de la sole de cultures de diversification : les cultures de tomates dérobées et tomates cycloniques disparaissent.

L'augmentation du prix de l'eau dégrade rapidement le revenu puisque les consommations sur la canne sont fortes (plus de 3 ha de canne à 11 200 m³/ha) et ces deux cultures de tomates deviennent trop risquées pour satisfaire la contrainte de revenu minimum. Ces activités sont remplacées par des haricots secs, moins consommateurs en eau et qui ne mobilisent pas de main d'œuvre au moment de la coupe. Les charges liées à l'eau poussent à réduire au minimum l'embauche de main d'œuvre pour maintenir le revenu : 80 jours de salariés pendant la coupe pour un prix de l'eau de 0,06€/m³, contre à peine 65 jours pour un prix de 0,1 €/m³. La contrainte de revenu minimum est donc très active lorsque le prix de l'eau augmente. L'embauche de main d'œuvre est limitée au minimum, elle est concentrée sur la coupe de la canne. Au delà de 0.1€/m³, soit un doublement du prix de l'eau, la contrainte de revenu minimum ne peut plus être satisfaite.

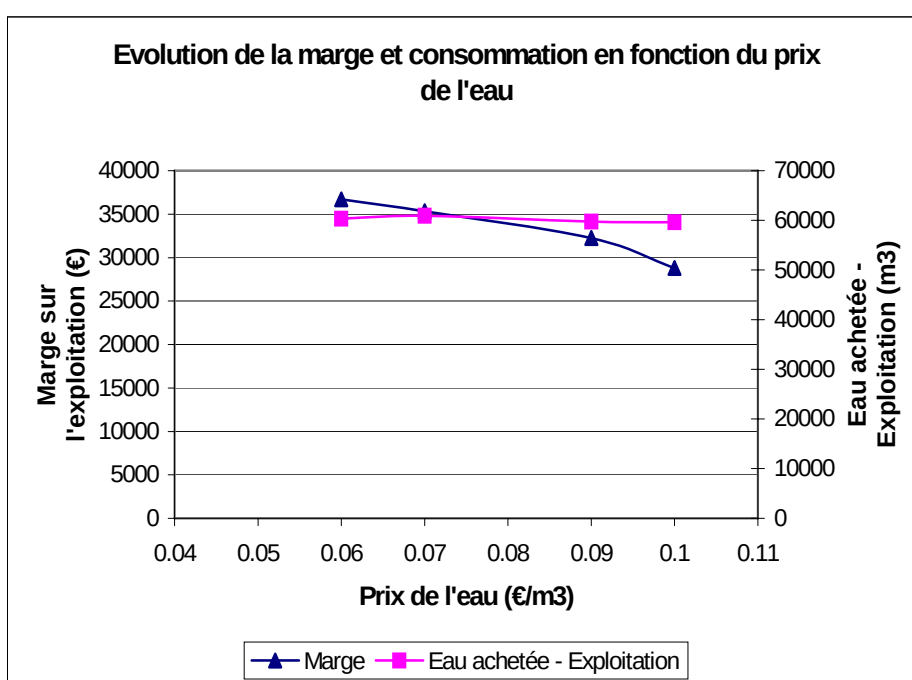


Figure 19 Marge de l'exploitation et consommation d'eau en fonction du prix de l'eau
Type Cannier diversification secondaire

La consommation d'eau et la marge de l'exploitation ont une sensibilité au prix de l'eau très différente d'après le modèle. La consommation est rigide, elle ne baisse que de 1000 m³ avec une augmentation du prix de l'eau de 60% (passage à 0,1€/ m³). Pour cette même augmentation de prix, la marge baisserait de 20%, sa sensibilité au prix de l'eau est forte.

Dans ce modèle, la gamme de prix dans laquelle existe une solution qui satisfasse toutes les contraintes est donc assez limitée. Cela tient certainement au poids de la contrainte qui impose 3 ha (la moitié des surfaces disponibles) de CAS1 avec une forte consommation en eau, comprise entre 11200 et 12500 m³/ha.

- **Demande en eau du Modèle « Cannier avec priorité à la diversification »**

La sole en canne est stable lorsque le prix de l'eau augmente, alors qu'on aurait pu s'attendre à une réduction pour limiter l'augmentation des charges en eau. C'est la contrainte de revenu minimum qui impose qu'une part du revenu soit sûre, ce qui privilégie la canne. D'autre part, la canne n'est pas rationnée car la contrainte qui plafonne le volume disponible en période limitante n'est pas active.

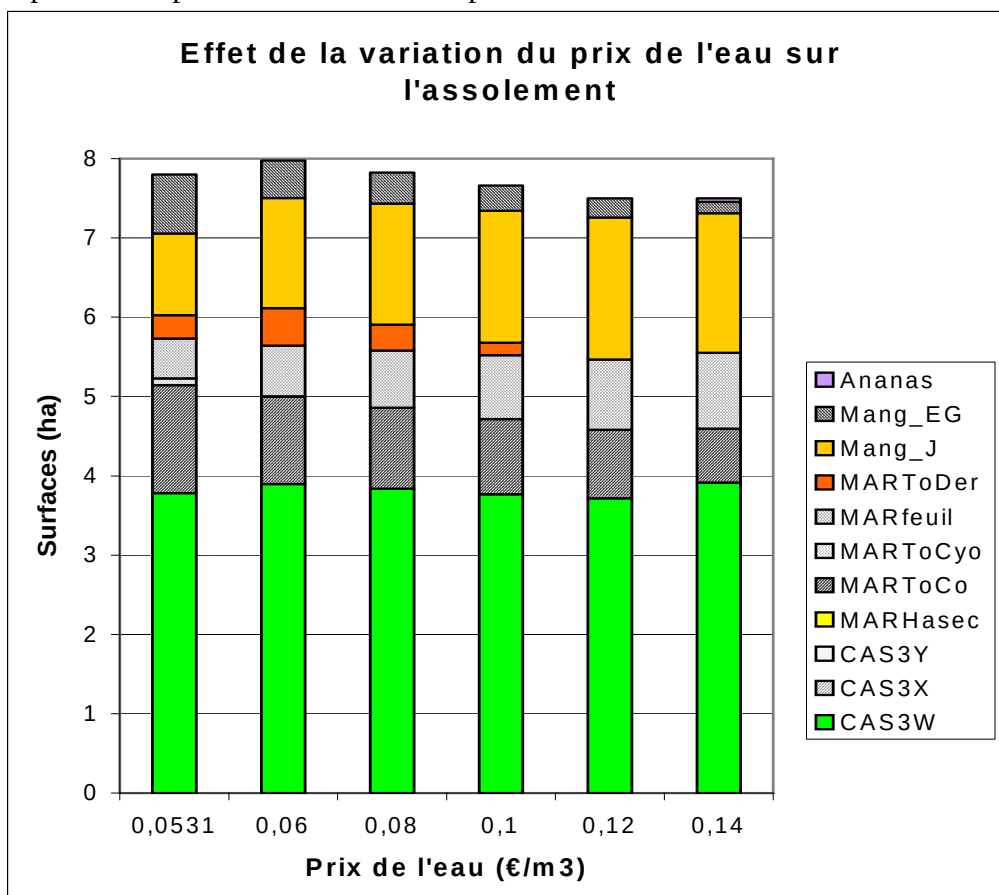


Figure 20 Assolement selon le prix de l'eau Type « Cannier priorité à la diversification »

Dans la sole en diversification, les surfaces en Tomate/Concombre diminuent, et la culture de tomates dérobées disparaît. Les surfaces libérées sont gagnées pour le maraîchage feuille, qui nécessite moins d'eau.

L'augmentation du prix de l'eau jusqu'à 0,1 €/m³ (soit une hausse de 60%) occasionne une augmentation quasiment équivalente du coût de l'eau sur l'exploitation et conduit à une baisse de marge de 10 %. Cette augmentation drastique du prix de l'eau induirait en solution optimale, une diminution de consommation de 960 m³ par an sur 6 ha, soit à peine 2% de la consommation totale de l'exploitation.

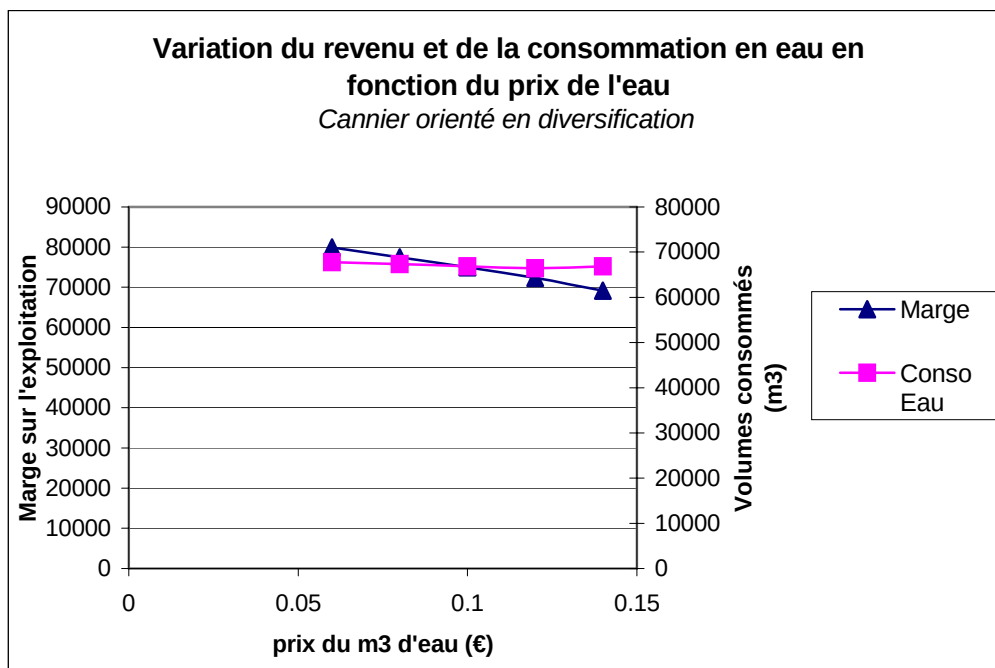


Figure 21 : Marge de l'exploitation et consommation d'eau en fonction du prix de l'eau - Type Cannier priorité à la diversification

- **Demande en eau du Modèle « Petits canniers 5 ha en monoculture »**

Le modèle est très peu sensible au prix de l'eau puisque l'assolement optimal actuel n'est pas modifié jusqu'à un prix de 0,16 €/m³. Au delà, le système CAS2 est rationné. Les possibilités pour ce type d'exploitant d'adapter le système de production sont limitées.

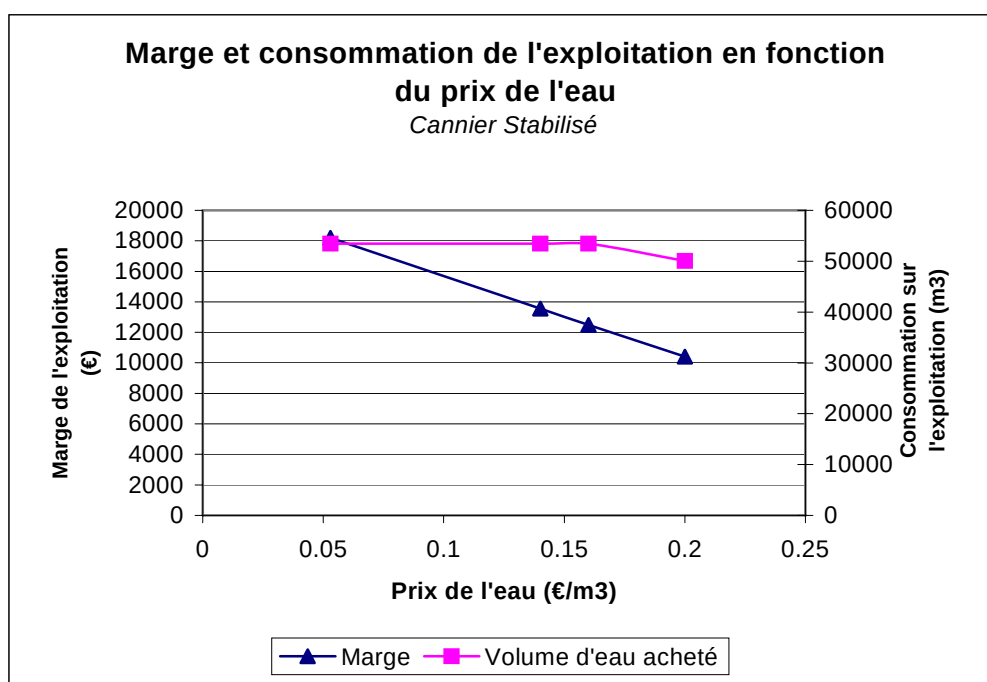


Figure 22 Marge de l'exploitation et consommation d'eau en fonction du prix de l'eau -
Type « Petit cannier en monoculture 5 ha »

Dans l'intervalle de prix pour lequel ce type d'exploitant ne modifie pas son assolement, les charges en eau augmentent de façon strictement proportionnelle au prix de l'eau. Cette augmentation occasionne alors la perte de plus d'un quart de la marge brute. Ce n'est qu'à partir de 0,16€/ m³ que la canne est rationnée.

Dans ce type d'exploitation, on passe sous le seuil de 15.000 € de marge brute, soit un revenu nettement inférieur au Smic, pour un prix de l'eau de 0,11 €/m³.

- **Demande en eau du Modèle « Grand cannier 10 ha en monoculture »**

Ce modèle présente une réaction singulière à l'augmentation du prix de l'eau qui peut avoir pour origine des problèmes de calage. En effet le renchérissement de l'eau provoque à partir du seuil de 0,08€/m³, une légère réduction de la surface irriguée plutôt qu'un rationnement de l'ensemble de la sole cannière. Tout se passe comme si un système cannier rationné dans cette configuration d'une grande surface par actif familial (donc de charges en main d'œuvre élevées) ne dégagait plus une marge suffisamment attractive avec l'augmentation du prix de l'eau.

L'assolement fixe en canne implique comme dans le modèle précédent de très fortes répercussions de l'augmentation du prix de l'eau sur les charges et donc sur la perte de marge de l'exploitation.

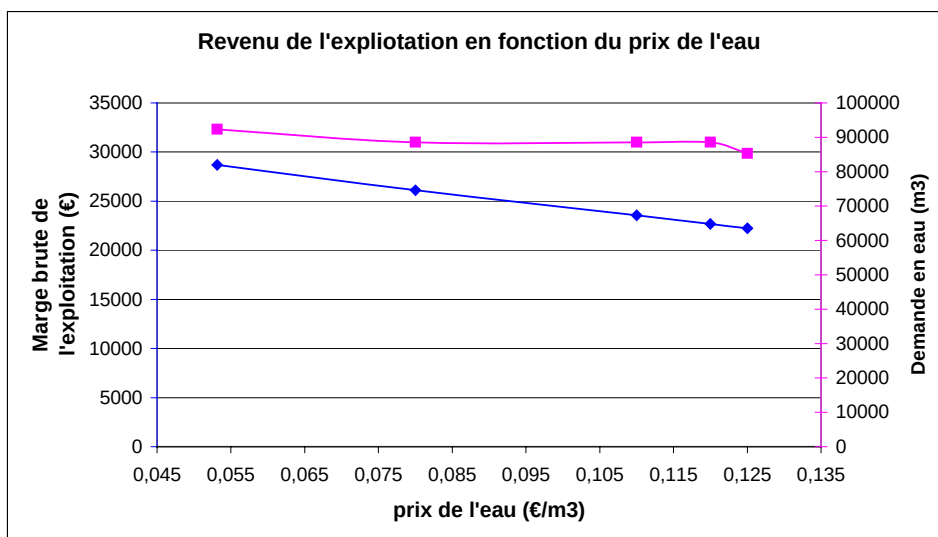


Figure 23 Marge de l'exploitation et consommation d'eau en fonction du prix de l'eau -
Type « Grand cannier en monoculture 10 ha »

CONCLUSION Synthèse sur l'impact potentiel de variations du prix de l'eau sur les systèmes de production irrigués

Les systèmes de production agricoles des périmètres irrigués du sud présentent une relative diversité liée principalement aux trois facteurs :

- (i) milieu pédo-climatique (double gradient très accentué de besoin en eau des cultures)
- (ii) structures de production (surface/actif et degré de mécanisation)
- (iii) assolement et place respective de la canne à sucre et des cultures de diversification, ce critère étant associé à un degré de sensibilité de l'agriculteur au risque.

La compréhension des réactions possibles des systèmes irrigués à des changements dans la tarification de l'eau suppose la prise en compte de cette diversité dans la construction de modèles économiques. Les choix de modélisation ont donc porté sur la conception d'un modèle générique, paramétré pour représenter la partie centrale et littorale (la plus sèche) des périmètres, décliné en quatre types d'exploitations selon leur configuration structurelle (dimension, diversification, aversion au risque), avec une gamme de 13 opportunités de cultures-itinéraires techniques représentatives d'une gamme plus large en termes de coefficients techniques. L'introduction du risque est nécessaire et concerne le principal aléa : les marges des cultures de diversification. La limite essentielle de ce modèle est l'absence d'une contrainte de trésorerie qui aurait pu expliquer une relative inertie dans l'évolution des techniques mises en œuvre, notamment les matériels d'irrigation. Le niveau de simplification retenu pour le modèle semble néanmoins cohérent avec une approche intégrée (économique et bio-physique pour la réponse du rendement de la canne aux apports d'eau) assez rudimentaire mais permettant de représenter les principales relations entre choix de productions, allocation des facteurs de production et prix.

Au delà des différences entre systèmes-types, une tendance générale se dégage pour la sensibilité au prix de l'eau. L'ensemble des types présente une demande en eau rigide par rapport au prix de l'eau dans les conditions économiques actuelles. La solution économiquement optimale donnée par les modèles est une utilisation de l'eau proche de l'optimum technique (maximisation du rendement) dans une gamme de prix de l'eau très large allant jusqu'à 2 à 3 fois le prix actuel. Cette rigidité est liée à la prépondérance de la canne à sucre dans l'assolement, au rapport de prix actuel entre canne et eau, très favorable à la canne, et à la sensibilité du rendement au rationnement en eau en période chaude limitante.

Compte tenu de la part du coût de l'eau dans le coût total de production (autour de 15%) ou dans le produit brut (10%) de la canne, le revenu est évidemment sensible au prix de l'eau. D'après les modèles, il accuse une baisse presque linéaire avec l'augmentation du prix de l'eau, puisque le volume consommé reste quasi constant au voisinage du prix actuel. L'élasticité du revenu au prix de l'eau est ainsi évaluée dans une fourchette de -0,16 et -0,3 (une hausse du prix de l'eau de 10% provoquerait une baisse de revenu jusqu'à 3%) selon le système. Les systèmes diversifiés sont un peu moins affectés que les systèmes en monoculture cannière. Toutefois leur assolement est peu modifié en cas de hausse du prix de l'eau car la capacité à prendre des risques avec les cultures de diversification diminue et notamment, l'embauche de main d'œuvre pour ces cultures exigeantes en travail manuel tend à être réduite afin de limiter les charges. Ces résultats de modélisation nous suggèrent

donc que le prix de l'eau constitue un instrument peu adapté pour réguler et limiter la demande en eau pour l'irrigation. En effet, il faudrait une forte augmentation du prix pour induire un rationnement en eau des cultures, ce qui pénaliserait très fortement le revenu des irrigants entraînant un coût social élevé avec la probable mise en faillite des petites exploitations.

Références bibliographiques

BRL (1992). *Etude tarification de l'eau d'irrigation adaptée au contexte socio-économique des périmètres irrigués de la Réunion. Phase 1 : Connaissance du milieu physique et socio-économique. Phase 2 : Elaboration de scénarios de développement de l'agriculture irriguée.*

CEMAGREF, *Guide méthodologique d'évaluation économique des projets d'irrigation.* Document de travail. 145 p.

CHOPART J-L., MEZINO M., AURE F., LE MEZO L., METE M., VAUCLIN M. (2006). *OSIRI: a simple decision-making tool for monitoring irrigation of small farms in heterogeneous environments.* Agricultural Water Management vol.87.

CHOPART J-L., FUSILLIER J-L., LE MEZO L., MEZINO M., RICHEFORT L., 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). Rôles des facteurs pédo-climatiques et des modes d'irrigation.* Document CIRAD Réunion 36 p.

DUCLAY E. (1995), *Méthodologie d'enquête et de suivi rapproché des irrigants à la Réunion*, Mémoire de DAG ENSAM.

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 la Réunion.* Mémoire de DAA INAPG. 54 p.

FERRARIS S. (2002) *Construction d'un modèle d'offre agricole Application aux exploitations cannières des périmètres irrigués du Sud de la Réunion.* Mémoire de DAA ENSAR. 67 p.

FUSILLIER J. L., CYGAN M. (2000), *Formation des prix des légumes à la Réunion – Analyse de la variabilité des prix et des différentiels entre producteurs et consommateurs*, document de travail CIRAD tera, 90 p.

FUSILLIER J.L., SAQUE C. (2003), *Stratégies de production agricole et demande en eau d'irrigation – Une approche de la diversité des irrigants sur les périmètres hydroagricoles du sud de l'île de la Réunion.* In Eau et littoral, Edition KARTHALA

MARTINE J-F. (2003) *Modélisation de la production potentielle de la canne à sucre en zone tropicale, sous conditions thermiques et hydriques contrastées. Applications du modèle.* CIRAD Réunion. Mémoire de thèse.

MASSON J. (2006) *Référentiel canne 2005.* CIRAD, Direction de l'Agriculture et de la Forêt Réunion

RAZAKANDRETSIA R. W. (2000), *Analyse de la dynamique des prix à la production des fruits de la Réunion 1990-1999*, DESS MQME Université de la Réunion, CIRAD Tera.

SUAD Maraîchage (2002-b), *Dossier technico-économique cultures fruitières : la mangue*.
Chambre d'Agriculture Réunion.

SUAD Maraîchage (1996), *Dossier technico-économique maraîchage : la petite tomate*.
Chambre d'Agriculture Réunion

SUAD Maraîchage (1995), *Dossier technico-économique maraîchage : l'oignon*. Chambre
d'Agriculture Réunion

SUAD Maraîchage (2000), *Dossier technico-économique maraîchage : l'ananas*. Chambre
d'Agriculture Réunion

Liste des cartes, figures et tableaux

Carte 1 : Situation des périmètres irrigués du Bras de la Plaine et du Bras de Cilaos.....	2
Carte 2 : Types de sols au Sud de l'île de la Réunion et micro-zones CIRAD.....	9
Carte 3 : Besoins théoriques en eau d'irrigation canne à sucre moyenne 1998-1999-2000 par micro-zone.....	9
Carte 4 : Lotissements SAFER sur les périmètres irrigués du Sud.....	25
Carte 5 : Répartition des exploitations irriguées par type de système de production.....	28
Figure 1 : Adéquation Ressources-besoins en eau dans le bassin hydrographique du Sud en période limitante (novembre à avril).....	3
Figure 2 : Structuration du réseau sur le périmètre irrigué du Bras de la Plaine.....	5
Figure 3 : Structure de tarification de l'eau d'irrigation Saphir.....	6
Figure 4 : Evolution du prix de l'eau d'irrigation sur les périmètres Saphir.....	7
Figure 5 : Scénario de priorité aux cultures de diversification, fort rationnement de la canne Exemple d'une exploitation de 4 ha.....	15
Figure 6 : Stress hydrique des cannes dans le scénario climatique et coupures 1998/99 par type (date de coupe) de canne.....	17
Figure 7 : Niveau de satisfaction des besoins en eau de la canne dans les scénarios avec et sans coupures.....	18
Figure 8 : Consommation annuelle théorique en eau de la sole cannière par mode d'irrigation Scénarios 1998/99 avec / sans coupures.....	19
Figure 9 : Impacts de 3 niveaux de rationnement sur le rendement en canne par mode d'irrigation.....	19
Figure 10 : Relation entre le rendement en canne et le volume d'eau d'irrigation consommé sur la campagne pour trois itinéraires techniques associés au mode d'irrigation.....	20
Figure 11 : Distribution des irrigants selon les rendements en canne moyens 1998-1999-2000.....	22
Figure 12 : Structure du produit brut pour 5 systèmes canniers irrigués 2005.....	23
Figure 13 : Distribution des irrigants (a) et de la surface totale (b) par tranche de surface souscrite à l'irrigation.....	24
Figure 14: Répartition des exploitants et du foncier par type de système de production.....	28
Figure 15 : Assolement de types canniers optimisés par le modèle d'exploitation.....	34
Figure 16 : Assolement du cannier diversifié selon le coefficient d'aversion au risque.....	37
Figure 17 :Assolement du type «cannier avec priorité à la diversification » selon le coefficient d'aversion au risque.....	39
Figure 18 : Assolement selon le prix de l'eau Type « Cannier diversification secondaire ».....	41
Figure 19 : Marge de l'exploitation et consommation d'eau en fonction du prix de l'eau – Type « Cannier diversification secondaire ».....	42
Figure 20 : Assolement selon le prix de l'eau Type « Cannier priorité à la diversification».....	43
Figure 21 : Marge de l'exploitation et consommation d'eau en fonction du prix de l'eau – Type « Cannier priorité à la diversification ».....	44
Figure 22 : Marge de l'exploitation et consommation d'eau en fonction du prix de l'eau – Type « Petit cannier en monoculture 5 ha ».....	44
Figure 23 : Marge de l'exploitation et consommation d'eau en fonction du prix de l'eau – Type « Grand cannier en monoculture 10 ha ».....	45
Tableau 1 : Caractéristiques des deux périmètres irrigués.....	8
Tableau 2 : Paramétrage du modèle FiveCore pour les trois modes d'irrigation.....	14
Tableau 3 : Caractérisation de 5 systèmes de culture canniers irrigués -types des périmètres du Bras de la Plaine & Bras de Cilaos (zone centrale).....	22
Tableau 4 : Systèmes de production pris en compte pour la modélisation économique.....	31



**Les systèmes de production agricoles 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**

ANNEXES

J-L. Fusillier CIRAD UMR G-Eau
T. Rieu ENGREF UMR G-Eau
J. Dumanois Stagiaire INAPG
S. Ferraris Stagiaire ENSAR

Décembre 2006

Liste des annexes

Annexe 1 : Calendrier des coupures réalisées par la SAPHIR campagnes 1997-98 à 2001-02

Annexe 2 : Référentiels technico-économiques des cultures des Périmètres irrigués du Sud

Annexe 3 : Effectifs des exploitations irriguées par type RGA 2000

Annexe 4 : Formalisation du modèle d'exploitation

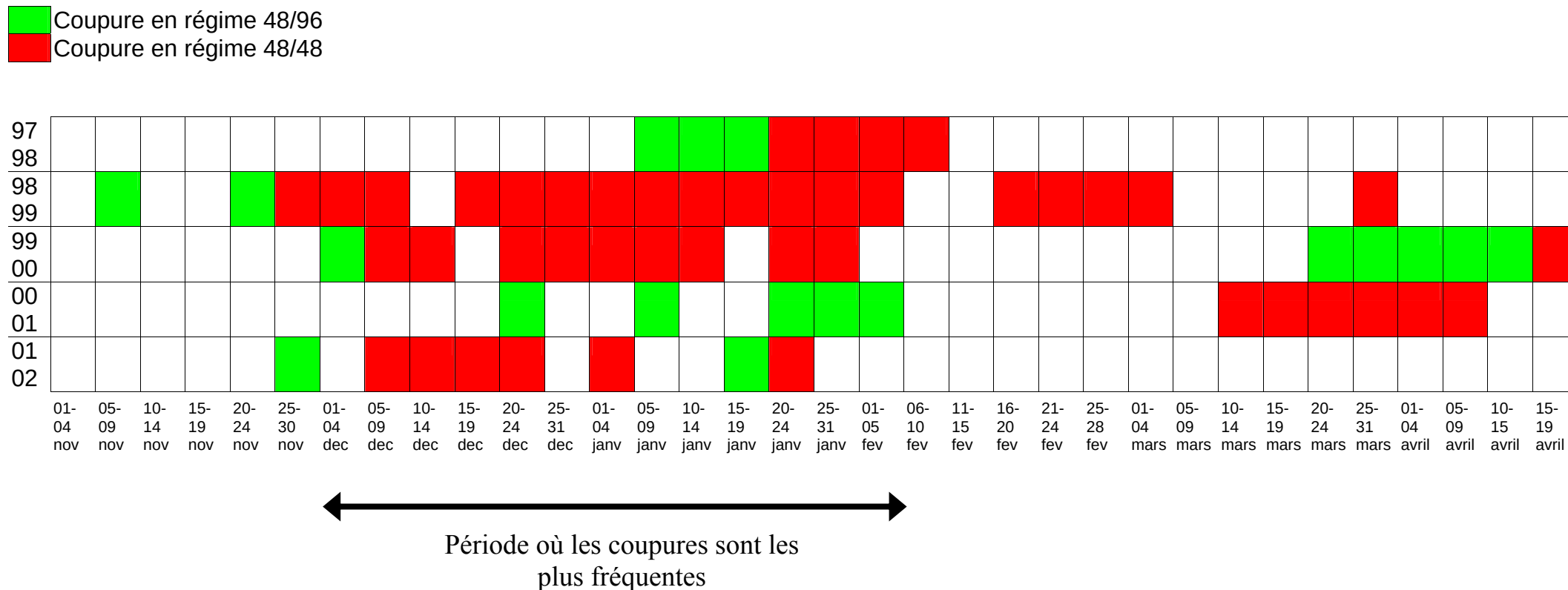
Annexe 5 : Matrice de programmation du modèle « Cannier en monoculture 10 ha »

Annexe 1

Calendrier des coupures réalisées par la SAPHIR au cours des campagnes 1997-1998 à 2001-2002

Zone 3 = Ligne des Bambous, Bassin Plat, Grand fond

(Source : SAPHIR)



Annexe 2 Référentiels technico-économiques des systèmes de culture, utilisé pour la modélisation

Canne à sucre Périmètres irrigués du Sud 2005 (sources : Enquêtes CIRAD 2002-2003, référentiel canne J.Masson 2005)

Système cannier	Rendement t/ha	Scénario de rationnement en eau		Perte de Rdt (%)	Rdt (t/ha)	Conso à la borne (m3/ha) - Campagne	Conso à la borne (m3/ha) période limitante D35-D3	Produit brut 2005 €/ha	Eau	Coupe Chargt transpor	Marge brute 2005 €/ha	Amortisst irrigation	Marge nette 2005 €/ha
CAS1 non équipé 6 ha	90	Sans Coupures	W	-	90	12567	2492	5974	818	1294	3359		1857
		Coupures	X	-5%	85.5	11223	1777	5690	716	1229	3242	130	1785
		Coupures + Rationnt	Y	-10%	81	10331	1395	5453	659	1164	3127		1714
CAS2 non équipé 6 ha	100	Sans Coupures	W	-	100	11093	2253	6604	708	1526	3826		2234
		Coupures	X	-6%	94	9988	1668	6226	637	1434	3611	212	2071
		Coupures + Rationnt	Y	-12%	88	9185	1335	5848	586	1342	3376		1889
CAS2bis équipé chargeur 10 ha	100	Sans Coupures	W	-	100	11093	2253	6429	708	1178	3999		1492
		Coupures	X	-6%	94	9988	1668	6043	637	1107	3755	212	1248
		Coupures + Rationnt	Y	-12%	88	9185	1335	5658	586	1036	3492		985
CAS3 Coupe manuelle 10 ha	115	Sans Coupures	W	-	115	10903	2141	7299	696	1693	4410		1625
		Coupures	X	-7%	107	9958	1668	6835	635	1574	4126	445	1334
		Coupures + Rationnt	Y	-12%	101	9436	1359	6487	602	1490	3895		1123
CAS3bis coupe mécanique 10ha	115	Sans Coupures	W	-	115	10903	2141	7299	696	1622	4481		1897
		Coupures	X	-7%	107	9958	1668	6835	635	1508	4192	445	1582
		Coupures + Rationnt	Y	-12%	101	9436	1359	6487	602	1427	3958		1348

Temps de travaux et calendriers des systèmes de culture canne à sucre en jours/ha

	janvier	fevrier	mars	avril	mai	Juin	Juillet	août	sept	oct	nov	déc	Année
CAS1													
Aspersion totale non équipé													
Entretien/ replantation	5	4	4	3	0	0						5	21
Irrigation	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	36
Coupe							5	5	5	5	5		25
Total	8	7	7	6	3	3	8	8	8	8	8	8	82
CAS2													
aspersion intégrale non équipé													
Entretien/ replantation	3	2	2	1	0	0	2	2	2	2	2	4	22
Irrigation	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	12
coupe							6	6	6	6	6		30
total	4	3	3	2	1	1	8	8	8	8	8	5	64
CAS2 bis													
Aspersion intégrale Equipé en tracteur-chargeur													
Entretien/ replantation	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	2	11
Irrigation	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	12
coupe							6	6	6	6	6		30
Chargement- transport							1,5	1,5	1,5	1,5	1,5		7,5
total	2	2	2	2	1	1	9,5	9,5	9,5	9,5	9,5	3	60,5
CAS3													
Gag Equipé en tracteur-chargeur coupe manuelle 100% salariés													
Entretien/ replantation	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	2	11
Irrigation	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	12
coupe							6	6	6	6	6		30
Chargement- transport							1,5	1,5	1,5	1,5	1,5		7,5
total	2	2	2	2	1	1	9,5	9,5	9,5	9,5	9,5	3	60,5
CAS3 bis													
Gag Equipé coupe mécanique par prestataire													
Entretien/ replantation	1,5	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1,5	11
Irrigation	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	12
Gestion prestataires							0,25	0,25	0,25	0,25	0,25		1,25
total	2,5	2	2	2	1	1	2,25	2,25	2,25	2,25	2,25	2,5	24,25

Temps de travaux et calendrier des systèmes maraîchers (jours/ha)

	janvier	février	Mars	avril	mai	juin	juillet	août	sept	oct	nov	déc	Année
MAR1Hasec													
Haricot demi sec micro aspersion													
préparation du sol-fumure-semis	17												17
entretien - traitements		23	8	8									39
récolte				15	18								33
total	17	23	8	23	18	0	0	0	0	0	0	0	89
MAR1ToCo													
Tomate post-cyclone+ cucurbitacée													
tomate	prépa sol - fumure		20										20
	plantation -entretien -traitement			20	20	20							60
	récolte, vente					14	34						48
concombre	prépa sol - fumure							20					20
	plantation -entretien -traitement								12	12	12		36
	récolte, vente											24	24
total	0	20	20	20	34	34	20	12	12	12	24	0	208
MAR1ToCyoï													
Tomate saison cyclonique+oignon vrac													
tomate	prépa sol - fumure											25	25
	plantation -entretien -traitement	18	18	30								18	84
	récolte, vente			13	70								83
oignon	prépa sol - fumure						18						18
	plantation -entretien -traitement							18	10	10			38
	récolte, vente									10	30		40
total	18	18	43	70	0	18	18	10	10	10	30	43	288
MAR2feuil													
Légumes feuilles diversifiés													
salade, brèdes	semis, repiquage, récolte	40	20	40	20	40	10	10	10	20	10	20	240
tomate sous abri hors sol													
		125	125	125	125	125	125	125	125	125	125	125	1500
MAR1ToDer													
Tomate sur repousse													
préparation sol fumure, plantation							20	15	15	10			
entretien - traitement, récolte/ha										12	34		
total	0	0	0	0	0	0	20	15	15	22	34	0	106

Ananas

	Janv	Fév	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil	Août	Se pt	Oct	Nov	Déc	Année
Plantation		50	63										113
Fertilisation + Traitement					1	1	1	1	1	1	1	2	9
Récolte				39	40								79
TOTAL		50	63	39	41	1	1	1	1	1	1	2	201

Temps de travaux et calendrier des systèmes arboriculture

ARBmang													
verger monospécifique manguier													
Traitement	2	2	2	2	2	8	8	4	4	4	4	4	46
épandage engrais	4						4			4			12
entretien sol		8			8			8				8	32
Taille					100								100
Irrigation	1	1	1	1				1	1	1	1	1	9
Récolte	200	50									50	200	500
total heures/ha	207	61	3	3	110	8	12	13	5	9	55	213	699
Total jours/ha	26	7	0,5	0,5	14	1	1,5	1,5	0,5	1	7	26	87
ARBagr													
verger monospécifique agrumes													
Traitement	8	4			1	1	1		4	8	8	8	43
épandage engrais	4							4		4			12
Irrigation	1	1	1					1	1	1	1	1	8
Récolte					130	130	130						390
Taille							150	150					300
Entretien sol	8		8		8				8		8		40
total heures/ha	21	5	1	0	131	131	281	155	5	13	9	9	
Total jours/ha	3	0,5	0,5	0	16,5	17	35	19	0,5	1,5	1	1	95
ARB2mang													
verger monospécifique manguier (pénalisation 20% rendement pour cause de rationnement hydrique)													
Traitement	2	2	2	2	2	8	8	4	4	4	4	4	46
épandage engrais	4						4			4			12
entretien sol		8			8			8				8	32
Taille					100								100
Irrigation	1	1	1	1				1	1	1	1	1	9
Récolte	160	40									40	160	400
total heures/ha	167	51	3	3	110	8	12	13	5	9	45	173	599
Total jours/ha	21	6	0,5	0,5	14	1	1,5	1,5	0,5	1	6	22	76

Annexe 3 : Effectifs et surface des exploitations irriguées par type source : RGA 2000

Effectifs des exploitations irriguées

zone	Type	grand monoculteur canne	petit monoculteur canne	cannier diversifié maraichage arbo	cannier diversifié élevage	maraîcher arbo canne secondaire	polyculture canne	sans canne	micro- producteur <2 ha sans hors sol	Total	%
St Leu Littoral Stella		1		1	1	0	1	3	7	14	
Piton st Leu		15	10	8		4	12	12	17	78	
Pointe au Sel - Piton St Leu		16	10	9	1	4	13	15	24	92	6%
Avirons Littoral		1	2	3	1	0	2	12	25	46	
Etang Salé Hauts		9	15	1	2	1	3	12	34	77	
Rivière Bellevue		15	42	9	11	2	25	6	46	156	
Hauts Etang Salé - St Louis		25	59	13	14	3	30	30	105	279	19%
Etang Salé Littoral			1	1		2	1	11	19	35	
St Louis Gol Ouaki		10	9			0	6	6	50	81	
Bas Etang Salé - St Louis		10	10	1	0	2	7	17	69	116	8%
BRAS DE CILAOS		51	79	23	15	9	50	62	198	487	33%
Entre Deux				1		1	3	15	74	94	6%
St Pierre Pierrefonds		14	68	12	1	2	12	28	16	153	10%
Bois d'Olive		20	24	5	1	0	5	6	45	106	
Bambou 400		29	53	11		4	10	13	70	190	
Ravine des cabris- Ligne Paradis		49	77	16	1	4	15	19	115	296	20%
Terre Sainte		22	48	8		0	4	10	28	120	
Grand Bois		24	34	6		1	6	2	22	95	
Bassin Plat-Grand Bois		46	82	14	0	1	10	12	50	215	15%
Petite Ile Littoral		14	27	2	6	3	32	3	53	140	
Petite Ile Hauts		6	5	3		1	14	7	19	55	
Petite Ile		20	32	5	6	4	46	10	72	195	13%
BRAS DE LA PLAINE		129	259	48	8	12	86	84	327	953	65%
siège hors zone		6	12	2	4	0	2	0	4	30	2%
PERIMETRES SUD		186	350	73	27	21	138	146	529	1470	100%
%		13%	24%	5%	2%	1,4%	9%	10%	36%	100%	

Surface par type en ha au lieu du siège de l'exploitation

Type	Grand monoculteur canne	petit monoculteur canne	cannier diversifié maraich arbo	cannier diversifié élevage	maraîcher arbo canne secondaire	polyculture canne	sans canne	micro- producteur	Total	
sous communes siège										
St Leu Littoral Stella	8		6	4		4	7	8	37	
Piton st Leu	71	24	48		15	75	22	20	275	
Pointe au Sel - Piton St Leu	79	24	54	4	15	79	29	28	312	6%
Avirons Littoral	12	6	21	3	0	8	28	27	106	
Etang Salé Hauts	57	50	5	8	3	18	40	47	227	
Rivière Bellevue	91	174	27	42	10	118	6	43	510	
Hauts Etang Salé - St Louis	160	230	53	53	13	144	74	117	843	16%
Etang Salé Littoral		4	6		8	5	28	24	75	
St Louis Gol Ouaki	100	38			0	48	3	62	252	
Bas Etang Salé - St Louis	100	42	6	0	8	53	31	86	327	6%
BRAS DE CILAO	339	296	113	57	36	276	134	231	1482	29%
Entre Deux			6		3	34	28	59	130	3%
St Pierre Pierrefonds	135	303	70	15	6	61	105	23	718	14%
Bois d'Olive	152	107	26	3	0	29	26	46	390	
Bambou 400	231	218	129		30	57	53	98	815	
Ravine des cabris- Ligne Paradis	383	325	155	3	30	86	79	144	1205	23%
Terre Sainte	141	168	49		0	28	39	37	462	
Grand Bois	158	153	36		3	24	6	24	404	
Bassin Plat-Grand Bois	299	321	85	0	3	52	45	61	866	17%
Petite Ile Littoral	100	94	15	31	9	125	6	63	442	
Petite Ile Hauts	46	14	13		1	30	17	19	140	
Petite Ile	146	108	28	31	10	155	23	82	582	11%
BRAS DE LA PLAINE	963	1057	344	49	52	388	280	369	3501	68%
siège hors zone									200	4%
PERIMETRES SUD	1302	1353	457	106	88	664	414	600	5183	100%
	25%	26%	9%	2%	2%	13%	8%	12%	100%	

Surface irriguée par culture en ha au lieu des parcelles (RGA 2000)

	Antenne	Canne	Légumes	Fruits perm	Fourrages	Banane	Ananas	total SAU irriguée
Pointe au Sel	B5	120	5	12	7	0	0	144
Piton St Leu / Maduran	B6	162	21	19	2	0	0	204
Les Avirons bas	B4	41	6	15	4	2	0	68
Etang Salé hauts	B2/ B3/B4	157	14	38	8	4	11	232
St Louis hauts	B1/ B2/B3	513	21	32	15	1	1	583
Etang salé bas	B3	34	12	22	15	2	0	85
St Louis bas	B1 / B3	242	11	9	4	0	0	266
Bras de Cilaos		1269	90	147	55	9	12	1582
Entre Deux	A214-216	23	55	36	3	4	0	121
Pierrefonds	A2	623	19	41	48	12	0	743
Ravine des cabris / Ligne Paradis	A1	981	35	84	52	1	1	1154
Bassin Plat	A3 / A4	525	5	17	11	1	1	560
Grand Bois	A5	395	4	6	4	0	0	409
Petite Ile bas*	A6	465	43	29	1	3	1	542
Bras de la Plaine		3012	161	213	119	21	3	3529
Périmètres Sud		4281	251	360	174	30	15	5111

Annexe 4 Formalisation du modèle d'exploitation par la programmation linéaire

1. FORMALISATION MATHEMATIQUE

L'hypothèse de base du modèle est que le but de l'agriculteur est de maximiser une fonction d'utilité, assimilée au revenu de l'exploitation agricole qui correspond à la somme des marges des différentes cultures réalisées (nettes des charges de structure).

Max $C'X$ sous les contraintes $AX \leq B$ et $X \geq 0$, avec

$X = [x_j]$ le vecteur des activités x_j étant le niveau de l'activité j (variable calculée par le modèle).

$A = [a_{ij}]$ la matrice des coefficients techniques, a_{ij} étant la quantité de ressource i nécessaire pour produire une unité d'activité j .

$B = [b_i]$ le vecteur des ressources, b_i étant la quantité totale de ressource i disponible.

$C = [c_j]$ le vecteur des marges, c_j étant la marge unitaire de l'activité j .

2. LES ACTIVITES DE PRODUCTION ET D'ACHAT/ LOCATION DE FACTEURS:

o ACTIVITES DE PRODUCTION: (OPPORTUNITES DE PRODUCTION OFFERTES A UN TYPE DONNE D'AGRICULTEUR)

Chaque activité j ouvre une colonne dans la matrice et donc une variable d'assolement à déterminer par le modèle : x_j , surface de la culture j pratiquée (en ha).

- Culture de la canne à sucre :

CAS0hp : canne non irriguée (conduite en pluvial) sur zone humide.

CAS0sp : canne non irriguée (conduite en pluvial) sur zone sèche.

CAS1 : canne conduite selon l'itinéraire technique IT1.

CAS2 : canne conduite selon l'itinéraire technique IT2.

CAS3 : canne conduite selon l'itinéraire technique IT3.

Le nom de ces activités de canne est suivi de 'a' pour coupe manuelle et chargement par pestataire, 'b' pour coupe manuelle et chargement en interne (équipé), 's' pour coupe 100% salariée, 'c' pour coupe complètement mécanisée. La dernière particule juxtaposée est le niveau de rationnement que le planteur fait subir à la canne en période limitante (par ordre de stress croissant, on a W, X et Y).

- Cultures maraîchères :

MARHasec : Haricots demi sec + jachère

MARToCo : tomates post cyclone + cucurbitacées (aubergine, pastèque ou concombre)

MARToCyo : tomates cycloniques + oignons

MARfeuil : association de petits légumes feuilles diversifiés (salade, brède, oignon vert, ...)

- Maraîchage intercalaire sur repousse de canne :

Culture dérobée, plantée très tôt pour permettre sa récolte avant la période des coupures d'eau.

MARToDer : tomate dérobée sous canne, plantée sur les repousses de canne CAS1 et CAS2.

- Arboriculture :

Mang_EG et **Mang_J** : Verger intensif mono-spécifique pour la mangue américaine Early Gold et pour la mangue locale José ; vente au marché de gros de St Pierre.

Ananas : Ananas de plein champ à vocation export

o ACTIVITES D'ACHAT/ LOCATION DE FACTEURS:

Chaque activité d'achat de facteurs ouvre une colonne dans la matrice et donc une variable à déterminer par le modèle : qf_k , quantité de facteur k acheté ou loué.

- Activité d'achat d'eau pour 0, 05313€/m³ si consommation < 6000m³/ha/semestre (tarif avec remise de 15%) et 0,0916€/m³ au-delà.

On crée deux activités d'achat d'eau qui puisent dans deux réservoirs fictifs. L'un est limité en volume (6000m³/ha) et l'autre pas, les prix de l'eau des deux réservoirs sont différents (0,053 et 0,092€/m³). Le volume d'eau final consommé par l'exploitation sera la somme des volumes puisés dans les deux

réservoirs. Comme le modèle cherche à maximiser la marge totale, il puisera toujours en premier dans le réservoir dont l'eau est au prix le plus bas.

crée 2 colonnes dans la matrice et donc 2 variables à déterminer par le modèle: volume d'eau acheté à 0,05313€/m3 (**A_eau1** en m3), volume d'eau acheté à 0,0916€/m3 (**A_eau2** en m3).

- Activité d'embauche de main d'œuvre temporaire, pour la coupe de la canne ou pour les activités de diversification. En moyenne, les coupeurs sont payés 9 à 12 € par tonne de canne coupée et la capacité de coupe est de 4 à 5t/coupeur/jour environ. On fixera donc à 45 €/jour le salaire journalier versé pour l'embauche de coupeurs.

L'embauche sera possible sur des périodes variables suivants le type d'exploitation : exclusivement pendant la coupe (juillet à décembre) pour les canniers en début de diversification, sur l'année entière pour les orientés en maraîchage avec une sole en canne.

Pour chaque mois 'i' où l'embauche est permise, une colonne est ouverte dans la matrice, ce qui impose donc une variable supplémentaire à déterminer, la quantité de main d'œuvre temporaire embauchée par mois **MOi** (en jours).

- Activité d'achat de matériel d'irrigation : on donne la possibilité au modèle d'équiper l'exploitation en couverture totale, couverture intégrale et/ou goutte à goutte. Le prix des facteurs est le coût de l'investissement sur la durée de vie du matériel (amortissement linéaire) compté par hectare, après déduction des subventions à l'équipement plus les coûts d'entretien du matériel. Le prix de l'équipement en goutte à goutte et en couverture intégrale a été fixé, respectivement, à 611 et 382€/ha/an. Pour la couverture totale, on considère que les exploitations ne font plus l'acquisition de ce type de matériel. Le prix du facteur, fixé à 153€/ha/an, ne comprend donc que les frais d'entretien. implique 3 colonnes dans la matrice et donc 3 variables à déterminer : surface équipée en couverture totale (**IRR_CT** en ha), en couverture intégrale (**IRR_CI** en ha) et en goutte à goutte (**IRR_gag** en ha).

3. ECRITURE DE LA FONCTION D'OBJECTIF

Cette fonction traduit le but poursuivi par l'agriculteur dans ses activités de production. Elle correspond à la première ligne de la matrice.

La fonction s'écrit :

$$\text{MARGE} = \sum_j (c_j \cdot x_j) - \sum_k (pf_k \cdot qf_k) = \sum_j ((r_j \cdot p_j - cv_j) \cdot x_j) - \sum_k (pf_k \cdot qf_k)$$

avec :

$$\begin{cases} \text{Inconnues du système,} \\ \text{seront déterminées par} \\ \text{le modèle} \end{cases} \begin{cases} x_j : \text{niveau de l'activité de production } j \text{ (surface en ha de la culture } j) \\ qf_k : \text{niveau de l'activité d'achat } k \text{ (quantité de facteur de production } k \\ \text{acheté ou loué, facteur dont l'allocation est arbitrée entre les} \\ \text{différentes activités de production en concurrence)} \end{cases}$$

c_j : marge unitaire (avant achat des facteurs eau, main d'œuvre, matériel d'irrigation) de la culture j (en €/ha)

r_j : productivité unitaire de la culture j (rendement de la culture en t/ha)

p_j : prix unitaire de vente du produit de la culture j (en €/t)

cv_j : charges variables de la culture j (en €/ha)

pf_k : prix unitaire du facteur k (en €/unité)

- La fonction objectif calculée par le modèle est donc une « marge sur charges directes », avant imputation des charges non spécifiques de structure (rémunération de la terre, amortissement des bâtiments et matériel non spécifiques aux activités, impôts, assurances, ...).

4. ECRITURE DES CONTRAINTES DU SYSTEME

Les contraintes s'écrivent : $a_{ij} \leq b_i$

avec a_{ij} : quantité de ressource i nécessaire pour produire une unité d'activité j

b_i : quantité totale de ressource i disponible

o CONTRAINTES LIEES AUX SURFACES:

➤ Surface totale :

Contrainte « SAU » :

$\sum_j x_j < \text{SAU exploitation}$.

x_j surfaces de chaque activité de production j , proposée dans le modèle sauf la surface en maraîchage dérobé. Ce maraîchage se faisant sous la canne, il n'utilise pas de surface additionnelle mais ne peut pas s'étendre sur une surface plus grande que la surface totale plantée en canne. On écrit donc la contrainte supplémentaire :

Contrainte « SAU_Der » :

- $\sum x_{\text{CAS1}} - \sum x_{\text{CAS2}} - \sum x_{\text{CAS3}} + x_{\text{MARToDer}} < 0$ (le maraîchage ne pouvant pas être fait sur de la canne en pluvial CAS0, l'irrigation étant indispensable à la culture de la tomate sur les périmètres).

o DISPONIBILITE EN EAU

La SAU totale de l'exploitation peut, pour le périmètre du Bras de la Plaine, se diviser en :

➤ Surface en jachère

On n'écrit pas de contrainte sur ces surfaces puisque d'après le RGA 2000 moins de 5% de la surface totale des périmètres est en jachère.

➤ Surface plantée

Nous avons fait l'hypothèse que toutes les surfaces irrigables des périmètres sont irriguées, et on ne s'intéresse dans cette étude qu'aux surfaces irrigables.

o TOPOGRAPHIE ET CARACTERISTIQUES DES SOLS

Nous avons choisi de ne pas faire de zonage en fonction de la qualité des sols. On supposera alors que le type de sol sur lequel se trouve l'exploitation est favorable à la pratique de toutes les cultures proposées moyennant l'application des engrais et la préparation du sol préconisés.

o ROTATIONS

La canne comme l'arboriculture sont des systèmes rigides. Les marges dégagées par les activités canne et arboriculture ont été calculées en moyenne sur des cycles intégrant les coûts de plantation et les années de rendement faible après la plantation.

Il n'y a pas de pratique de la jachère systématique entre deux plantations. Il n'y a pas systématiquement d'alternance de culture entre la sole cannière et les cultures maraîchères.

De nombreuses activités de maraîchage supposent la succession de différentes cultures légumières au cours de l'année. Ces cycles de cultures complémentaires ont été intégrés dans la formalisation des activités de maraîchage. On n'introduira donc pas de contrainte de rotation.

o EVOLUTION DES VERGERS :

Il n'y a plus, sur le périmètre, de réelle dynamique de plantation.

Les subventions à la plantation pour la mangue et le litchi n'ont pas été renouvelées. Il reste des subventions sur certains agrumes mais elles ne sont pas considérées par les experts locaux comme suffisantes pour générer une vraie dynamique de plantation. On n'introduira donc pas de contrainte traduisant l'évolution du verger.

o CONTRATS DE PRODUCTION AVEC PRIMES POUR LA CANNE A SUCRE

Pour la canne, les prix sont garantis jusqu'à 2006. Le prix de la canne est fonction du tonnage et de la richesse en sucre des cannes livrées. Ce prix intègre un certain nombre de subventions dégressives selon le tonnage réalisé. Les planteurs connaissent bien ces modes de calcul et peuvent donc chercher à gérer leurs livraisons afin de toucher le montant de prime le plus élevé possible. (Convention canne pour la campagne 2001- 2002)

Le prix industriel prend en compte le tonnage et le niveau de richesse. Ce niveau est neutre à 13,8. S'ajoute à ce prix une prime bagasse puis les aides par tranche de tonnage : l'aide économique et l'aide à la production.

Dans le calcul des marges sur canne, on a considéré un niveau de richesse moyen à 14 ou 13,8 selon l'itinéraire technique plus ou moins intensif et introduit la prime bagasse et l'aide économique (dans ce type, ils produisent tous moins de 3000t).

On introduit dans le modèle des activités qui calculent le montant de l'aide à la production et augmentent donc d'autant la fonction d'objectif:

Pcan1 rapporte 9.5€/Tonne jusqu'à un quota de 500T.

Pcan2 rapporte 7.62€/T jusqu'à un quota de 650T.

Pcan3 rapporte 6.1€/T jusqu'à un quota de 800T.

Pcan4 rapporte 3.05€/T jusqu'à un quota de 1200T.

Pcan5 rapporte 1.52€/T jusqu'à un quota de 1500T.

Au-delà, il n'y a plus de prime.

On écrit ensuite des contraintes qui assignent à chaque prime un quota en tonnage de canne correspondant :

Premier quota jusqu'à 500T : **Pcan1 < 500 (contrainte « Qcan1 »)**

Deuxième quota pour les 150T suivantes : **Pcan2 < 150 (contrainte « Qcan2 »)**

Troisième quota pour les 150T suivantes : **Pcan3 < 150 (contrainte « Qcan3 »)**

Quatrième quota pour les 400T suivantes : **Pcan4 < ou = 400 (contrainte « Qcan4 »)**

Cinquième quota pour les 300T suivantes : **Pcan5 < ou = 300 (contrainte « Qcan5 »)**

Une dernière contrainte permet de qualifier les valeurs de chaque prime en tonnage :

$$\sum \text{Pcan } 1 \text{ à } 5 < \sum_j r_{jc} \cdot x_{jc}$$

$$\sum \text{Pcan } 1 \text{ à } 5 - \sum_j r_{jc} \cdot x_{jc} < 0 \text{ (contrainte « Qcan »)}$$

x_{jc} : surfaces des activités canne

r_{jc} : rendements associés à chaque activité canne

Le montant des primes est décroissant, donc le modèle remplira de lui même les quotas en saturant d'abord celui à 9.5€/T, jusqu'à celui à 1.52€/T.

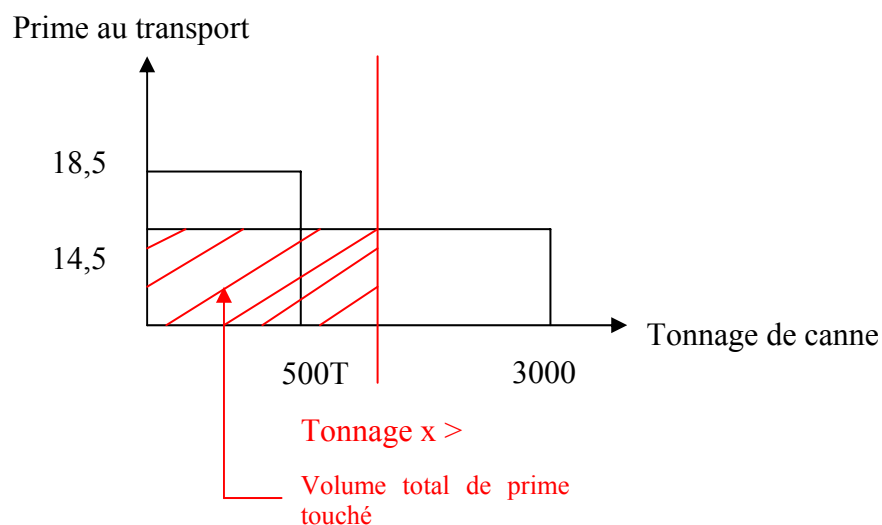
A ces aides s'ajoutent une aide au transport de la canne des exploitations jusqu'à l'usine sucrière et une indemnité compensatoire de handicaps naturels (ICHN).

- Aide au transport :

Les exploitations concernées se situent dans la zone 1 et aucune ne dépasse le quota de production de 3000T.

PTcan1 rapporte 2.82€/T jusqu'à un quota de 500T.

PTcan2 rapporte 2.21€/T jusqu'à un quota de 3000T et sur la totalité du volume livré si on dépasse le quota de 500T.



Le mécanisme non marginal de cette prime fait qu'entre 501 t et 651 t, l'agriculteur touche un montant total plus faible qu'avec une production de 500 t. Il aurait donc été intéressant de voir dans quelle mesure des petites exploitations pouvaient ou non limiter leur production afin de ne pas entrer dans la deuxième tranche de prime. Cependant, l'écriture sous forme linéaire des contraintes ne permet pas de

traduire le fonctionnement de cette prime (nécessité d'un modèle non linéaire avec des booléens). On n'écrira donc que l'une des deux primes, en fonction du tonnage moyen réalisé par le type modélisé.

Pour la première prime, on écrit :

Contrainte « QTcan1 » : $PTcan1 - \sum_j r_{jc} \cdot x_{jc} < 0$

Contrainte « QT » : $PTcan1 < 500$

• ICHN :

P_ICHN rapporte 76.2€/ha en zone irriguée.

On écrit donc :

Contrainte « ICHN1 » : $P_ICHN < \sum x_{CAS0, CAS1, CAS2 \text{ et } CAS3}$

o MAIN D'ŒUVRE TEMPORAIRE:

Pour le type cannier diversification secondaire, les travaux sur les cultures maraîchères sont effectués uniquement par la main d'œuvre familiale et la main d'œuvre temporaire est embauchée pour la coupe de la canne. Les besoins en main d'œuvre du maraîchage et la productivité marginale du travail sur cette activité sont supérieurs à ceux de la canne. Le modèle affectera donc de lui même les ressources en travail familial (sans coût financier) sur ces activités.

Contraintes « MO 1 » à « MO 6 » : $\sum_j a_{jt} \cdot x_{jt} < b_t, t = 1 \text{ à } 6,$

exprime que les besoins en main d'œuvre sur les différentes cultures, en période d'inter coupe (une contrainte par mois de janvier à juin), ne pourront être satisfaits que par de la main d'œuvrel familiaux.

Contraintes « MO 7 » à « MO 12 » : $\sum_j a_{jt} \cdot x_{jt} - (MO_t) < b_t, t = 7 \text{ à } 12,$

exprime que les besoins en main d'œuvre sur les différentes cultures, en période de coupe (une contrainte par mois de juillet à décembre), pourront être satisfaits par des jours de travail familiaux et par de l'achat de jours de travail salariés temporaires.

Avec :

▪ a_{jt} besoin en main d'œuvre en j/ha sur la culture j pendant le mois t.

(Voir en Annexe n°2 : les calendriers des interventions culturales et des différents besoins en main d'œuvre en j/ha/mois):

▪ b_t nombre de jours de travail familial disponible pendant le mois t.

Pour ce type d'exploitation, on a fixé la main d'œuvre familiale disponible à 1,5 actifs. Avec, en moyenne, 22, 5 jours de travail/ mois/ actif (temps plein légal), on a donc $b_t = 34j/\text{mois}$. On pourra augmenter ce temps de travail familial à 38j/mois si nécessaire sur certaines périodes de pointe de travail.

▪ mot_t nombre de jours de travail salarié temporaire acheté le mois t.

On limitera la quantité de main d'œuvre possible à l'embauche à la capacité de gestion d'une équipe par l'exploitant (6 ou 5 personnes) : limitation à 100j/mois/exploitation (ligne « UBOUND », en dehors de la matrice).

On pourra envisager dans un deuxième temps de permettre au modèle d'embaucher de la main d'œuvre temporaire en appui sur les périodes de pointe (récolte) sur le maraîchage et l'arboriculture (main d'œuvre non qualifiée, rémunérée au même niveau que les coupeurs). Il suffira pour cela de rajouter des activités d'embauche sur le mois concerné.

On vérifiera dans les sorties du modèle que la main d'œuvre temporaire effectue bien au moins 50% du temps de travail de coupe.

o MATERIEL D'IRRIGATION :

Contrainte « Si1 » : $\sum X_{CAS1} - (IRR_CT) < 0,$

exprime la possibilité d'équipement en couverture totale pour les cultures de canne CAS1.

Contrainte « Si2 » : $\sum X_{CAS2, CAS3, MAR \text{ et } ARB} - (IR_CI) - (IR_gag) < 0,$

exprime la possibilité d'équipement en couverture intégrale et en goutte à goutte pour les cultures de canne CAS2 et CAS3, maraîchage et vergers (sauf la tomate dérobée, la parcelle de canne sur laquelle il se trouve étant déjà équipée).

O EAU D'IRRIGATION:

Tous les modèles comportent une contrainte sur le volume disponible globalement sur la campagne, plafonné par le débit à la borne d'irrigation. Mais sur la totalité de l'année, le volume d'eau disponible est très supérieur au niveau consommé. Pour traduire la tension sur l'eau en période où l'eau est limitante, des contraintes supplémentaires sont ajoutées. Selon les modèles, ces contraintes de volume d'eau disponibles pour l'irrigation sont différentes. Pour les exploitations en monoculture de canne, le risque que fait peser un manque d'eau sur la marge de l'exploitation nous conduit à traduire l'eau disponible pour l'irrigant par un système de contrainte présenté dans la partie suivante ('Contraintes de risques perçus'). Pour les exploitations diversifiées, le risque sur l'eau est secondaire par rapport au risque sur les marges des cultures de diversification, il a donc été traduit par une contrainte simple en condition de ressource limitante.

➤ *Contrainte traduisant l'achat d'un volume d'eau global sur l'année*

Exprimé par deux contraintes : l'une traduisant la demande en eau totale et l'autre étant un compteur simulant la facturation de l'eau à l'exploitation.

Contrainte « Acheau1 » : $(A_eau1) < V_{tot}$.

Contrainte « q_eau2 » : $\sum_j a_j \cdot x_j - (A_eau1) < 0$

Avec :

V_{tot} : volume d'eau d'irrigation total maximal disponible pour l'exploitation pour une année (exprimé en m^3).

a_j : demande en eau d'irrigation annuelle pour chaque culture j (exprimé en m^3/ha), à l'exception de la canne pluviale et du maraîchage intercalaire.

Ces volumes sont la somme des volumes disponibles ou demandés par décade, ils intègrent donc les volumes plus faibles des périodes de restriction de l'offre (coupures).

➤ *Contrainte sur le niveau de ressource disponible en période de pointe*

L'étude des pratiques des irrigants pendant la période où la ressource en eau est limitante nous a montré que l'allocation de l'eau se faisait de façon prioritaire sur les activités de diversification et en interdisant de rationner le maraîchage. On ajoute donc au modèle des activités rationnées en eau (2 niveaux de rationnement) pour la canne et l'arboriculture. Le niveau de la demande en eau de ces activités ainsi que l'impact sur les rendements et donc sur les marges ont été définis dans la partie II.

L'allocation de l'eau se fera prioritairement sur les cultures maraîchères et fruitières car la productivité marginale de l'eau pour ces activités est supérieure à celle des activités de canne.

La contrainte sur la satisfaction des besoins en eau en période de coupures (5 décades de décembre-janvier) s'écrit :

Contrainte « q_eau1 » : $\sum_j a_j \cdot x_j < V_{lim}$.

Avec :

V_{lim} : volume d'eau d'irrigation total maximal disponible par exploitation pendant les 5 décades les plus limitantes (exprimé en m^3).

a_j : demande en eau d'irrigation sur les décades les plus limitantes pour chaque culture j (exprimée en m^3/ha), à l'exception de la canne pluviale et du maraîchage intercalaire.

5. CONTRAINTES DE RISQUES PERÇUES PAR LES EXPLOITANTS

La programmation linéaire permet de traduire le fait que certains des paramètres du modèle peuvent être sujets à des variations aléatoires. Il est conseillé, dans ce type de modèle, de faire porter les contraintes de risque sur un seul facteur.

Pour les canniers diversifiés, le risque prépondérant auquel ils sont sensibles, porte sur les marges en maraîchage et fruitiers qui sont sujettes à un double aléa sur les prix de vente (risque de marché amplifié par l'étroitesse des débouchés) et sur les rendements (risque cyclonique et phytosanitaire).

5.1 TRADUCTION DU RISQUE SUR LES MARGES DES CULTURES DE DIVERSIFICATION

➤ *Formalisation mathématique utilisée :*

Le risque est exprimé comme un aléa devant être géré dans le cadre de la satisfaction d'une contrainte de revenu minimum pour l'exploitation. L'exploitant effectue un arbitrage entre les gains espérés et le risque global encouru en cas de chute des prix ou de perte de récolte.

On exprime que la probabilité que les gains des activités « sûres » et des activités aléatoires soit inférieur au revenu minimum escompté, doit être inférieure à un seuil de défaillance α :

$$P((\sum_j c_{1j} \cdot x_{1j} + \sum_j c_{2j} \cdot x_{2j}) < \text{ou} = \text{Revenu minimum}) < \alpha$$

c_{1j} marges unitaires des activités 1j aux prix et débouchés certains (canne).

c_{2j} marges unitaires des activités 2j aux prix et rendements aléatoires (maraîchage + arboriculture).

Soit encore :

$$\eta\omega + E(\sum_j c_{2j} \cdot x_{2j}) + \sum_j c_{1j} \cdot x_{1j} > \text{ou} = \text{Revenu minimum}$$

$\eta = F^{-1}(\alpha)$ coefficient d'aversion au risque, valeur lue dans la table de loi normale centrée réduite.

ω estimateur de la variance des marges unitaires des activités aléatoires.

Sous l'hypothèse que les coefficients aléatoires c_{2j} suivent une répartition de loi normale, cette technique permet de linéariser les contraintes de risque.

➤ *Ecriture des contraintes de risque :*

Les données de base sont les séries temporelles de marges pour chacune des activités risquées. On déduit de ces marges (c_{2jt}) des marges moyennes par activité (c_{2jm}), puis des séries d'écarts par rapport à la moyenne ($c_{2jt} - c_{2jm}$).

On calcule ensuite la valeur du scalaire de Fischer, g_i , et on ajoute au programme initial :

- 19 activités (18 correspondant aux écarts sur la contrainte de revenu minimum, **Y1 à Y18**, et une correspondant à l'estimateur de la variance sur la contrainte ω , **Evar**).
- 19 contraintes (18 pour calculer les écarts à la moyenne, **Y1 à Y18**, équation (2) du modèle MOTAD, et une pour calculer l'estimateur de la variance, **Evariance**, équation (3) du modèle MOTAD).

O CARACTERISATION DE LA SENSIBILITE AU RISQUE DE L'AGRICULTEUR :

➤ *Le coefficient d'aversion au risque*

La quantité $\eta\omega$ représente la marge de sécurité que prend l'agriculteur par rapport au revenu minimum qu'il désire s'assurer. Le coefficient η traduira donc, pour chaque type d'agriculteur, son niveau d'aversion au risque, niveau qui dépend des stratégies de production mises en œuvre. Ce coefficient varie de zéro (pour $\alpha = 0,5$), pour les agriculteurs non averses, à 2,3 (pour $\alpha = 0,99$), pour les agriculteurs très averses au risque. La difficulté réside dans le fait que ces coefficients ne sont pas directement observables ou mesurables. Ils sont donc utilisés comme des paramètres de calage du modèle. On les ajuste de façon à ce que la combinaison des activités calculées soient la plus proche possible de la combinaison réelle observée (part de la surface totale allouée aux cultures de diversification, revenu de l'exploitation, taux d'occupation de la main d'œuvre tout au long de l'année...).

➤ *Le montant du revenu minimum*

Le montant du revenu minimum escompté par l'exploitant, influera aussi sur le niveau de risque que l'agriculteur consentira à prendre. Ce montant pourra donc être un deuxième paramètre de calage, évoluant à l'inverse du premier. Pour le modèle « cannier diversifié », on fixe le montant du seuil de revenu minimum à un SMIC par actif familial, en considérant qu'il n'y a pas d'activité autre qu'agricole venant assurer un complément de revenu à l'exploitant.

5.2 TRADUCTION DES RISQUES DE DISPONIBILITE EN EAU

O TRADUCTION DES RISQUES SUR LA DISPONIBILITE EN EAU EN PERIODE LIMITANTE

➤ *Formalisation mathématique utilisée :*

On a exprimé le risque comme un aléa sur le volume d'eau disponible à la borne d'irrigation sur la période de demande de pointe exposée aux coupures (campagne 98-99 prise comme référence).

L'irrigant effectue un choix dans le niveau de rationnement en eau de ses cultures au vu du volume d'eau d'irrigation disponible. Ce volume d'eau disponible peut être décomposé en une partie fixe

(volume des jours non coupés), et une partie variable (volume des jours annoncés coupés, mais qui peuvent ne pas faire l'objet de coupures si les ressources le permettent).

Dans le modèle, on exprime que le volume d'eau requis par les cultures pendant la période de pointe doit être inférieur au volume d'eau escompté sur la période. La probabilité que le volume disponible soit suffisant doit être supérieure à un seuil α_j :

$$P(\sum_i c_i \cdot x_i \leq D_j) \geq \alpha_j$$

c_i consommations unitaires des activités i sur la période limitante

D_j disponibilité en eau sur la période limitante

α_j seuil de satisfaction minimum

Soit : $\sum_i c_i \cdot x_i \leq D_j - [F^{-1}(1 - \alpha_j) \cdot \sigma_{Dj}]$ où F est la fonction de répartition de la loi normale centrée réduite (hypothèse que la disponibilité D suit une loi normale),

c'est à dire : $\sum_i c_i \cdot x_i + [F^{-1}(1 - \alpha_j) \cdot \sigma_{Dj}] \leq D_j$

O CARACTERISATION DE LA SENSIBILITE AU RISQUE DE L'AGRICULTEUR :

➤ *Le coefficient d'aversion au risque*

La quantité $[F^{-1}(1 - \alpha_j) \cdot \sigma_{Dj}]$ représente la part du volume variable que l'irrigant considère comme acquis. $F^{-1}(1 - \alpha_j)$ représente donc le niveau d'aversion au risque.

De même que pour l'aléa sur les marges des cultures de diversification, la difficulté réside dans le fait que ces coefficients ne sont pas directement observables ou mesurables. On les ajuste de façon à ce que la combinaison des activités calculées soit la plus proche possible de la combinaison réelle observée. En particulier, on utilise comme indicateur la part de la sole cannière rationnée en eau, le revenu dégagé, le volume d'eau consommé...

On ajoute une contrainte **Evarianc** et une activité **Evar** (calcul de $F^{-1}(1 - \alpha_j) \cdot \sigma_{Dj}$)

La contrainte q_Eau5 plafonne le volume d'eau disponible en période limitante.

Annexe 5 – Matrice de programmation du modèle « Cannier en monoculture 10 ha »; Aléa sur la disponibilité en eau en période de pointe

CANExt	CAS1bmW	CAS1bmX	CAS1bmY	CAS2bmW	CAS2bmX	CAS2bmY	CAS3bsW	CAS3bsX	CAS3bsY	CAS3bcW	CAS3bcX	CAS3bcY	TomDer	Mang J	Mang EG	A eau
	3613	3320	3027	3904	3258	2329	3997	3438	3238	2189	1886	1639	8000	6000	5420	-0.05313
2Qcan	-100	-95	-90	-110	-103.4	-96.8	-120	-111.6	-105.6	-115	-106.95	-101.2				
2Qcan1																
2Qcan2																
2Qcan3																
2Qcan4																
2Qcan5																
2ARBmax	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1		15	15	
2QT_Can1	-100	-95	-90	-110	-103.4	-96.8	-120	-111.6	-105.6	-115	-106.95	-101.2				
2QT																
2SAU	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	
2SAU_Der	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	10			
2Si1	1	1	1													
2Si2				1	1	1	1	1	1	1	1	1		1	1	
2Meca										1	1	1				
2IntGag																
Min_C2				2	2	2	-1	-1	-1	-1	-1	-1				
2ICHN	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1				
2MO1	6	6	6	2	2	2	2	2	2	2.5	2.5	2.5	20	9	11	
2MO2	6	6	6	2	2	2	2	2	2	2	2	2	10	8	14	
2MO3	6	6	6	2	2	2	2	2	2	2	2	2	10	16	7	
2MO4	6	6	6	2	2	2	2	2	2	2	2	2	15	7	1	
2MO5	3	3	3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	30	3	1	
2MO6	3	3	3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	2	1	
2MO7	9	8.7	8.5	9.5	9.0	8.5	9.5	8.5	8.0	2.25	2.22	2.2	0	2	1	
2MO8	9	8.7	8.5	9.5	9.0	8.5	9.5	8.5	8.0	2.25	2.22	2.2	0	1	1	
2MO9	9	8.7	8.5	9.5	9.0	8.5	9.5	8.5	8.0	2.25	2.22	2.2	0	2	1	
2MO10	9	8.7	8.5	9.5	9.0	8.5	9.5	8.5	8.0	2.25	2.22	2.2	0	2	1	
2MO11	9	8.7	8.5	9.5	9.0	8.5	9.5	8.5	8.0	2.25	2.22	2.2	0	2	7	
2MO12	6	6	6	3	3	3	3	3	3	2.5	2.5	2.5	0	8	11	
2q_eau5	2492	1777	1395	2253	1668	1335	2141	1668	1359	2141	1668	1359	100	270	189	
2Acheau1	12567	11223	10331	11093	9988	9185	10903	9958	9436	10903	9958	9436	0	7300	7300	-1
2q_eau2																1
2Evorian																

2Pcan3	2Pcan4	2Pcan5	2PT_Can1	2P_ICHN	2Evar	TYPE	RHS
6.10	3.05	1.52	2.21	76.2			
1	1	1				<	0
						<	500
						<	150
1						<	150
	1					<	400
		1				<	300
						<	0
			1			<	0
			1			<	3000
						<	10
						<	0
						<	0
						<	0
						<	0
						<	2
						<	0
						>	0
				1		<	0
						<	26
						<	26
						<	26
						<	26
						<	26
						<	26
						<	26
						<	26
						<	26
						<	26
						<	26
						<	26
					1	<	20000
						<	0
						<	108000
					1	=	3700