



METHODOLOGIE
DE RECHERCHE DE STRATEGIES « ROBUSTES »
POUR DES PROJETS D'IRRIGATION COMMUNAUTAIRES

Application pratique sur le village EL Turpial en Colombie

Mémoire présenté par

Juan Gabriel León

Pour l'obtention du Diplôme d'Etudes Approfondies de Sciences de l'Eau dans
l'Environnement Continental

Ecole Nationale du Génie Rural, des Eaux et Forêts - ENGREF

Sous la direction scientifique de : Madame Nathalie Beaulieu, CIAT

Sous l'encadrement de : Monsieur Bruno Barbier, CIRAD

Septembre 2002

Remerciements

Je souhaite en premier lieu remercier les personnes qui m'ont encadré et aidé durant ce mémoire : Mme Nathalie Beaulieu, M. Bruno Barbier, M. Grégoire Leclerc.

Nathalie, pour avoir accompagné mon travail de conceptualisation et de modélisation, à Bruno pour l'orientation donné et sur qui j'ai toujours pu compter et à Grégoire pour ses importants conseils pendant tout le stage.

Un grand merci à Adriana, Yolanda, Ovidio y Jaime, mes collègues et amis du CIAT, qui ont cherché et organisé grande partie de l'information utilisée.

De plus, je voudrais remercier le Centre International d'Agriculture Tropicale – CIAT (Cali, Colombie) et spécialement le Ministère de l'Agriculture du gouvernement colombien pour m'avoir donné les ressources nécessaires pour la réalisation du projet.

Je voudrais remercier La Maison de la Télédétection qui m'a accueilli dans ses bureaux pendant le temps nécessaire pour finir cette recherche.

Un grand merci à M. Olivier Barretau, M. Nicolas Becu et Mme Sylvie Morardet du CEMAGREF ; et M. Patrick LeGoulven de la MSE ; pour ses opinions et l'orientation initiale.

Enfin j'adresse toute ma gratitude aux responsables du DEA, en particulier à M. Desbordes de l'Université des Sciences Montpellier II, et M. Delacourt de l'ENGREF.

Résumé

En Colombie, les projets d'irrigation sont normalement dirigés vers les grands producteurs dans des zones très spécifiques du pays. Les petits producteurs, généralement situés dans des zones éloignées des capitales, pourraient aussi bénéficier de projets d'irrigation mais n'ont pas les connaissances techniques pour les développer. Des projets d'irrigation communautaires pourraient être développés par des agences d'assistance technique ou des promoteurs, et même faire l'objet d'une demande d'assistance économique au gouvernement, pour autant qu'ils soient viables du point de vue économique et environnemental.

Une analyse économique grossière peut permettre de déterminer s'il vaut la peine de mener des études plus poussées de faisabilité. Cependant, les stratégies les plus favorables ne seront pas les mêmes selon les prix, la disponibilité des ressources, le climat et autres facteurs. Pour monter un projet d'irrigation et d'exploitation commerciale, les agriculteurs sont à la recherche de solutions robustes, qui donnent de bons résultats dans un éventail de scénarios possibles. Cette étude vise à formaliser l'application de certains concepts de l'aide à la décision à la recherche de stratégies robustes dans le cadre de la planification de projets d'irrigation. Pour chaque série de scénarios contrastés, on cherche les stratégies optimales du point de vue économique. Les résultats de ces stratégies, ainsi que d'autres provenant de discussions avec des agriculteurs, sont ensuite évalués sous chacun des scénarios. On a posé l'hypothèse que le critère de Savage pouvait être utilisé pour indiquer la robustesse d'une stratégie. Selon ce critère, une stratégie est d'autant plus favorable que son « regret » maximal est faible.

En guise d'exemple, une application de cette approche est réalisée pour le village de El Turpial appartenant à la municipalité de Puerto Lopez, dans les *llanos* Colombiens. Les producteurs de ce village ont manifesté, auprès de L'Unité Municipale d'Assistance Technique Agricole (UMATA), le désir d'installer et de mettre en œuvre un système d'irrigation pour augmenter les rendements de leurs cultures, surtout pendant la saison sèche. Les résultats ont montré que, selon les données disponibles, un projet d'irrigation pourrait être rentable dans ce village, en autant que la vente des produits puisse être assurée. En autant que des critères environnementaux soient rencontrés, un système de rotation avec du maïs pendant le premier semestre et de la pastèque pendant le second pourrait être très intéressant, en raison du bon prix de vente de la pastèque autant en période de haute que de basse demande.

Abstract

In Colombia, irrigation projects are most often directed towards large producers in specific areas of the country. Small farmers, usually far from capital cities, could also benefit from irrigation projects but do not have the technological know-how to develop them. Community irrigation projects could be developed by agricultural extension agents, promoters, and could even be submitted for economical assistance by the government, if they are economically and environmentally sound.

A general economical analysis could allow to determine if more in-depth feasibility studies are worth conducting. However, strategies which are most favorable can vary in function of prices, resource availability, climate and other factors. To design an irrigation project and a commercial exploitation, farmers are looking for robust solutions, that give good results in a range of scenarios. This study aims at formalizing the application of some decision support concepts to the search for robust solutions in the context of the planning of irrigation projects. For a series of contrasted scenarios, one finds the optimal strategies from the economical point of view. The result of these strategies, and of a list of other strategies proposed by the farmers, are then computed for each of the scenarios. We posed the hypothesis that the Savage criteria could be used to indicate the robustness of a strategy. Following this criteria, a strategy is more favourable if its maximum «regret » is lower.

As an example, this approach is applied to the case of the village of El Turpial, in the municipality of Puerto Lopez in the Colombian *llanos*. The farmers in this village expressed, to the Municipal Technical Assistance Unit (UMATA), the desire to install an irrigation system to increase the yield of their crops, especially in the wet season. Results of this application have shown that, using available data, an irrigation project could be economically beneficial in this village. If environmental criteria can be met, a rotation system with corn during the first semester and watermelon during the second semester can be favorable, because of the good price of watermelon both in high and low demand periods.

SOMMAIRE

1. Chapitre 1 : Cadre général de l'étude	8
1.1. Mise en situation et définition du problème	8
1.2. Objectifs de l'étude	10
1.3. Comment ce problème est-il abordé généralement ?	11
1.3.1. L'approche utilisée par le CEMAGREF	11
1.3.2. Sleepi : un logiciel de simulation économique.....	13
1.3.3. Recherche de règles de distribution de l'eau.....	14
1.3.4. L'aide à la décision pour trouver solutions efficaces dans l'irrigation.....	15
2. Chapitre 2 : Cadre théorique	17
2.1. Aide à la décision et analyse de scénarios.....	17
2.1.1. Les étapes de l'aide à la décision.	18
2.1.2. Quelques définitions relatives à la modélisation.....	20
2.1.3. Critères pour prendre des décisions en avenir incertain.....	21
2.1.4. l'analyse multicritère.	22
3. Chapitre 3 : Méthodologie proposée	25
3.1. Etapes de la Méthodologie	25
3.2. Modélisation.....	26
3.3. Résolution, démarche algorithmique	27
3.4. Estimation du déficit en eau via un bilan hydrique	29
3.4.1. Estimation de l'évapotranspiration réelle (ETR).	32
3.5. Calcul du rendement des cultures.....	33
3.6. Bilans coût-bénéfice	34
3.7. Recherche de la stratégie optimale du point de vue économique	36
3.8. Méthodologie pour l'application du critère de Savage	36
4. Chapitre 4 : Application de la méthodologie proposée au village de El Turpial, Colombie, en guise de première démonstration	38
4.1. Description de la zone d'étude.....	38
4.1.1. Utilisation actuelle du sol.	39
4.2. Choix des cultures considérées dans les simulations	40
4.3. Définition des scénarios à considérer	42
4.4. Calcul de la marge brute pour chacune des composantes du système	43
4.4.1. Estimation du déficit en eau au moyen d'un bilan hydrique.....	43
4.4.2. Calcul du rendement des cultures	49
4.4.3. L'investissement, les bénéfices et les coûts	52
4.4.4. Calcul de la marge à partir des résultats des deux étapes précédentes.....	53
4.5. Recherche de la solution optimale pour chacun des scénarios.....	54

4.6.	Définition des stratégies à considérer.....	55
4.7.	Evaluation économique pour chacun des cas	58
4.8.	Application du critère de Savage,	58
5.	Chapitre 5 : Interprétation des résultats de la simulation	60
5.1.	Analyse de la solution optimale et ses stratégies	60
5.1.1.	Scénario 1, bons prix et bonne disponibilité en eau d'irrigation.....	60
5.1.2.	Scénario 2, mauvais prix et bonne disponibilité en eau d'irrigation.....	61
5.1.3.	Scénario 3, bons prix mais la disponibilité en eau est limitée.....	62
5.1.4.	Scénario 4, prix faibles et disponibilité en eau limitée	63
5.2.	La solution optimale selon le critère de Savage.....	63
6.	Discussion	65
6.1.	L'application de la méthodologie pour le cas d'El Turpial.....	65
6.2.	Quelles améliorations pourraient souhaiter les utilisateurs (Limites de la méthodologie) et avenues possibles de perfectionnement	66
6.3.	Maïs – pastèque comme un possible système commercial ?	66
7.	Conclusions	68
	Bibliographie	71
	Annexes	75
	ANNEXE A.....	75
	ANNEXE B.....	76
	ANNEXE C.....	76
	ANNEXE D.....	77
	ANNEXE E.....	78

1. Chapitre 1 : Cadre général de l'étude

1.1. Mise en situation et définition du problème

En Colombie, les grands projets d'irrigation sont, de façon générale, dirigés vers les grands producteurs, dans des zones très spécifiques du territoire national où on croit qu'il existe la plus grande consommation et une surexploitation de la ressource en eau. D'autre part, les petits producteurs situés dans des zones très éloignées des principales villes, requièrent aussi souvent de l'irrigation, mais sont très peu communs l'objet d'études de faisabilité de projets, en raison de leur capacité de production limitée. Néanmoins, l'irrigation chez ces petits producteurs pourrait s'avérer bénéfique pour le développement et pour l'accroissement de leur productivité. Le financement de mini projets d'irrigation pourrait s'avérer intéressant pour le gouvernement, particulièrement dans le contexte de croissance du secteur agricole qui est prévue pour les prochaines années ([Presidencia de la República, 2001](#)). De plus, pour favoriser la paix après l'arrêt souhaité des conflits armés, le gouvernement prendra une série de mesures pour encourager le retour des activités de production dans les zones rurales ([Dinar et Keck, 1996](#)). Pour développer un projet d'irrigation, la construction d'un ouvrage d'ingénierie doit faire l'objet d'études biophysiques et économiques préalables qui démontrent la viabilité du projet d'irrigation. Dans le cas contraire, le projet pourrait ne pas être rentable et la ressource pourrait être utilisée de façon inadéquate, avec des conséquences négatives du point de vue économique et environnemental. Les études d'aptitude biophysique, plus chères, peuvent être précédées par des études économiques pour savoir si l'irrigation vaut la peine ou non. Les études biophysiques pourraient être menées si on trouve que l'irrigation présente un intérêt du point de vue économique.

La rentabilité d'un projet dépend cependant d'une foule de conditions dont plusieurs ne sont pas sous le contrôle des agriculteurs et promoteurs de projets d'irrigation. Selon le prix de vente des produits, le climat, la disponibilité de l'eau, le marché, et bien d'autres, la stratégie « optimale » de production sera différente. Un même projet ou une même stratégie peut très bien être rentable sous un scénario, ou ensemble de conditions exogènes, mais être désastreuse sous un autre. Les communautés de petits producteurs sont à la recherche de

solutions «robustes », c'est-à-dire qui donnent de bons résultats sous un éventail de scénarios, sans pour autant être la solution optimale dans l'un ou l'autre de ces scénarios. La recherche de stratégies robustes n'est pas une procédure courante en planification de projets et fait généralement l'objet de tâtonnement, ou de l'exploration de ce qui se passerait sous différents scénarios. Une certaine innovation au domaine de la planification de projets d'irrigation peut être apportée par une application de concepts du domaine de l'aide à la décision. Le concept de robustesse est d'ailleurs relativement récent en aide à la décision (Vincke, 1998) et nous y reviendrons plus tard.

C'est un cas concret qui a motivé cette étude, et c'est ce même cas qui nous servira d'exemple pour explorer diverses méthodes de recherche de solutions robustes. Les habitants du village de El Turpial (Municipalité de Puerto López , Département du Meta), 16 familles de petits producteurs, ont manifesté le désir d'installer et de mettre en œuvre un système d'irrigation qui utiliserait l'eau d'une rivière voisine. En effet, ce village des llanos colombiens présente un déficit d'eau pendant la saison sèche et souffre d'une diminution considérable de la production agricole à cause du stress hydrique dans les cultures. L'Unité Municipale d'Assistance Technique Agricole (UMATA) de la municipalité de Puerto López est chargée de leur porter conseil à ce sujet. Avant même de réaliser une étude d'aptitude des conditions biophysiques à l'irrigation, ce qui est très coûteux, il est nécessaire de vérifier si l'irrigation peut être rentable, si elle peut être incluse dans des stratégies robustes, et si elle apporte quelque chose par rapport à la situation actuelle. Des études biophysiques plus poussées pourraient alors être réalisées dans le cas où l'irrigation se montrerait avantageuse du point de vue économique.

La situation du village de El Turpial n'est pas un cas isolé, elle est partagée par un très grand nombre de villages tropicaux subissant une saison sèche marquée et prolongée. Les questions de rentabilité et de robustesse se posent aussi pour les périmètres irrigués existants. En Colombie, les municipalités doivent prêter le service d'assistance technique agricole aux petits producteurs à travers des UMATA ou des entreprises, et ce service inclut (en principe) l'aide à la planification de projets productifs.

1.2. Objectifs de l'étude

L'objectif général de ce projet est de développer une méthodologie simple d'évaluation économique qui serait utile pour les UMATAs et d'autres agents d'assistance technique agricole pour trouver des stratégies robustes de production agricole, incluant la possibilité d'irriguer, soutenue par les concepts de base de :

- Gestion de l'eau au travers d'une connaissance du comportement du milieu biophysique.
- L'économie paysanne et ses perspectives de marché.
- L'aide à la décision.

Cette méthodologie doit permettre une interaction *aller-retour* avec la communauté pour trouver les alternatives les plus favorables pour l'exploitation agricole. Elle permettrait aux acteurs locaux (agriculteurs, comité d'action communautaire, UMATA et Ministère de l'agriculture) de répondre aux questions suivantes :

- Au niveau économique, vaut-il la peine de faire un projet d'irrigation dans ce village, avec les cultures existant actuellement?
- Si oui, et dans le cas où la ressource en eau est limitée, quelle doit être la stratégie de distribution de l'eau entre les cultures et les agriculteurs ?
- Avec la disponibilité de l'agriculture, serait-il plus profitable de changer la proportion de cultures pour augmenter les surfaces cultivées avec des produits de haute valeur commerciale ?
- Quelles seraient les stratégies les plus robustes, qui diminuent le risque de perdre beaucoup dans des conditions adverses de prix du marché et de disponibilité de l'eau, mais qui permettraient aussi de profiter des conditions favorables ?

Au niveau de la recherche méthodologique, on vise à démontrer ou réfuter l'hypothèse suivante :

- Le critère de Savage, qui sera décrit ultérieurement, appliqué sur une analyse économique, peut être utilisé pour indiquer la « robustesse » des stratégies considérées

sous différents scénarios. Il peut être intégré ensuite dans une analyse multicritère qui comporte des considérations environnementales

On espère finalement, à travers un exemple pratique d'application pour le village El Turpial, discuter et conclure sur sa possible utilisation pour le choix des stratégies d'irrigation par des petits producteurs en Colombie et établir les avantages et les inconvénients de cette méthodologie pour les applications dans ce domaine.

En résumé, les objectifs de ce projet sont donc de : a) contribuer au domaine de la planification de l'irrigation par l'apport de concepts et de méthodes du domaine de l'aide à la décision, en ce qui attrait à la recherche de stratégies robustes, b) de présenter une méthodologie qui puisse être utilisée par le secteur agricole (UMATAS, associations de producteurs, promoteurs de projets) pour choisir des stratégies de production et c) présenter un exemple permettant de discuter de la pertinence de cette méthode.

La méthodologie ne prétend pas être innovatrice dans tous ces aspects, puisqu'elle utilise des principes bien établis de bilan hydrique, calcul du rendement, et analyse économique. Elle prétend innover dans l'application de méthodes d'aide à la décision pour la recherche de solutions robustes, qui n'ont pas été appliquées encore, du moins à ma connaissance, au domaine de la planification de l'irrigation.

1.3. Comment ce problème est-il abordé généralement ?

1.3.1. L'approche utilisée par le CEMAGREF

A partir de son expérience d'appui à la planification de l'irrigation, le CEMAGREF, en association avec le CIRAD, est en train de développer un guide d'évaluation économique pour analyser la viabilité des projets d'irrigation. Cette méthode d'évaluation économique concerne essentiellement les petits périmètres irrigués (une dizaine de communes regroupant 100 à 150 exploitations agricoles) (Morardet et al.). Elle s'adresse à tous les acteurs économiques ou politiques qui s'intéressent à l'évaluation économique des projets d'aménagement hydro-agricole. Il est plus particulièrement destiné aux bureaux d'études et aux organismes publics ou agricoles qui ont en charge la réalisation des études techniques et économiques préalables à la réalisation des réseaux d'irrigation.

Selon les auteurs, le principal objectif de ce guide est de construire des éléments d'aide à la décision pour l'évaluation de la demande en eau et de la rentabilité économique des investissements, tant pour les investisseurs privés que pour les représentants des pouvoirs publics chargés de l'orientation et de la distribution des fonds.

"La méthodologie se base sur le fait que la demande en eau des agriculteurs dépend de leurs choix de production et que l'évaluation de cette demande nécessite de prévoir le comportement des agriculteurs face à la possibilité d'introduire l'irrigation sur leur exploitation, et de bien distinguer les productions selon leur itinéraire technique et leur besoin en eau d'irrigation. La localisation des surfaces à irriguer et la conception d'un réseau permettant de répondre au mieux à la demande globale, impliquent d'agréger ces choix individuels de production à l'échelle du périmètre irrigué". (Morardet et al.)

La méthode proposée comprend quatre étapes :

- Description du milieu naturel et de l'environnement économique. Elle doit conduire à une meilleure connaissance de la zone d'étude afin d'obtenir une conceptualisation globale du milieu physique, des systèmes de productions agricoles, de leur environnement économique, des besoins en eau des plantes et les ressources disponibles, etc.
- Compréhension et formalisation des systèmes de production. Elle se base sur la réalisation d'une enquête exhaustive dans un espace géographique donné, soit l'ensemble du périmètre lorsque le nombre d'exploitations n'excède pas 200, soit des secteurs représentatifs lorsque la zone du projet est plus vaste.
- Construction d'un outil de simulation économique à l'échelle du périmètre étudié. Pour rendre compte du comportement des agriculteurs, le modèle retenu est un programme linéaire d'optimisation sous contraintes. Ces contraintes concernent par exemple les pointes de travail, les différents types de sol, les quotas de production, les ressources en eau disponibles etc.
- Simulation d'hypothèses où l'idée principale est d'utiliser les modèles agrégés pour des fins prospectives en simulant divers scénarios sur la base des modalités

d'équipement, l'évolution de l'environnement économique des exploitations et le renouvellement des exploitations.

Finalement les résultats de simulation fournissent, pour chaque scénario, les éléments d'une évaluation économique du projet d'aménagement pour les agriculteurs, le gestionnaire du périmètre irrigué et la collectivité.

1.3.2. Sleepi : un logiciel de simulation économique.

Depuis plusieurs années, l'équipe d'irrigation du Cemagref utilise une méthode de diagnostic de périmètre irrigué. Cette méthode permet de simuler les choix d'assolement des agriculteurs en fonction de scénarios tels que des changements de prix, de niveau d'apport en eau, etc. Le logiciel Sleepi (SimuLations Economiques à l'Echelle des Périmètres Irrigués) permet de standardiser la méthode en utilisant une simulation de bilan hydrique pour le calcul des rendements.

Le logiciel est initialement conçu pour modéliser la situation suivante. Un agriculteur dans un périmètre irrigué sait qu'il ne va pouvoir disposer que de 1000 m³ par décade pendant toute l'année. Il doit choisir à l'automne la surface qu'il va semer en blé, et pour cela estimer aussi la surface qu'il sèmera en melon au printemps ; il devra pendant environ deux mois effectuer des arbitrages pour l'eau d'irrigation. L'agriculteur va estimer alors quel ensemble de surfaces en blé et en melon et quelle répartition du volume décadaire entre les deux cultures à chaque pas de temps va lui assurer le profit maximal. Il va choisir de semer du melon et chercher à l'irriguer le mieux possible, mais va aussi décider de semer du blé, quitte à ne pas l'irriguer suffisamment pendant la période de chevauchement avec la culture de melon. Sleepi peut utiliser, si l'utilisateur le souhaite, un modèle de bilan hydrique dans le programme d'optimisation pour calculer le vecteur de choix optimal. (Faysse, 2001)

Actuellement la simulation n'est faite que pour un agriculteur, mais il est prévu à court terme de donner la possibilité d'une simulation sur l'ensemble d'un périmètre. Ces simulations permettront alors de tester l'impact d'une règle d'allocation, voire de calculer par convergence des choix l'équilibre de Nash associé à une règle d'allocation créant des interactions stratégiques. Ce Logiciel s'adresse à des personnes connaissant les techniques

d'optimisation sous contraintes. La complexité de la modélisation associée empêche son utilisation directe auprès d'irrigants.

1.3.3. Recherche de règles de distribution de l'eau

Faysse (2001) a fait une étude de l'influence des règles collectives d'allocation de l'eau sur les choix stratégiques des agriculteurs sur des petits périmètres irrigués en Tunisie Centrale et sur le bassin de l'Adour dans le sud-ouest de la France.

Le contexte étudié dans ce projet est celui d'un système irrigué qui connaît une pénurie en eau structurelle. Il y a une comparaison entre différentes règles d'allocation de l'eau et de taxation lorsqu'on tient compte des inévitables marges de manœuvre dont disposent les irrigants, notamment en ce qui concerne la surface mise en culture, l'équipement ou la stratégie d'irrigation. Ces marges de manœuvre peuvent engendrer une interdépendance entre les agriculteurs : les interactions qui en découlent sont déterminées à l'équilibre. De façon très générale, l'auteur soutient qu'on peut définir des règles d'allocation de type ex ante, où chaque agriculteur reçoit une quantité d'eau indépendante de ses choix et de ceux d'autres agriculteurs, et des règles de type ex post qui distribuent l'eau en fonction des choix effectués. Si les règles de type ex post permettent de bien valoriser l'eau sur l'ensemble du système irrigué et peuvent organiser un partage efficace du risque, elles créent aussi par la même occasion des interactions stratégiques qui aboutissent à un sur-assolement. Une comparaison est faite entre règles ex ante et ex post, avec des agriculteurs qui n'ont pas la même capacité à valoriser l'eau lorsque la ressource à partager est connue, et avec des agriculteurs d'aversion au risque différentes lorsque la ressource est incertaine. De plus, quand le coût d'audit du respect des allocations est important, le gestionnaire doit mettre en regard l'acquisition de plus d'information pour diminuer l'importance de ces interactions, et le coût d'acquisition de cette information. Ces questions sont appliquées sur deux terrains d'étude : de petits périmètres irrigués en Tunisie centrale gérés par des associations d'irrigants, et le bassin de l'Adour dans le Sud-Ouest de la France, où la culture intensive du maïs provoque des tensions sur la ressource pendant l'été.

1.3.4. L'aide à la décision pour trouver solutions efficaces dans l'irrigation

A travers les définitions trouvées habituellement dans la littérature, un système d'aide à la décision peut être caractérisé comme « un ensemble d'outils et de procédures qui, s'ils sont utilisés par le gestionnaire d'un système particulier, vont améliorer la qualité des processus de prise de décision dans ce système » (IIMI, 1994). L'importance des informations significatives et opportunes dans les processus de décision ne peut être niée. Dans le cadre de la gestion des systèmes d'irrigation, l'information est vitale car les décisions journalières en matière de distribution de l'eau affectent chacun des agriculteurs.

Traditionnellement, les gestionnaires des systèmes d'irrigation ont essayé de résoudre ces types de problèmes à travers la constitution de banques d'informations de terrain. Celles-ci sont traitées sous différentes formes : formulaires, tables, fichiers et autres moyens qui facilitent les processus d'une telle gestion. Cependant, le nombre d'utilisateurs dans un système d'irrigation de taille moyenne prend rapidement des proportions qui ne permettent pas un traitement correct des informations et engendre des retards et coûts importants. En conséquence, des simplifications peuvent être introduites dans le système ou les informations ne sont plus disponibles et des décisions non fondées sont prises (FAO, 1994).

Selon Schrage (1997) la difficulté pour la réalisation d'une planification multi-période est la présence d'un futur incertain. Il existe plusieurs exemples des causes de cette incertitude : le changement climatique, les incertitudes financières, les événements politiques, les compétitions, les désastres naturels, etc. Le type de modèle qui est utilisé pour la représentation d'un avenir incertain dans le contexte de la programmation linéaire est appelé « programme stochastique ».

Pour notre cas, il y a un intérêt particulier de voir comment différents auteurs proposent d'analyser les incertitudes dans l'agriculture en fonction du climat et comment ils utilisent l'aide à la décision pour trouver des solutions efficaces dans le contexte de l'irrigation.

Schrage (1997) propose le point de départ en déterminant l'existence d'un nombre fini d'actions naturelles. Par exemple, l'intensité d'un hiver peut être classifiée comme faible, moyenne ou forte ou une saison particulière peut être classifiée comme sèche ou humide.

Chacune de ces combinaisons d'états possibles est appelé « scénario ». Dans un exemple proposé par cet auteur, l'agriculteur doit décider combien de surface il devra exploiter pour chaque culture, mais ensuite c'est la nature qui détermine si la saison sera sèche ou humide (dans le cas où sec ou humide sont les scénarios choisis). Avec l'intention de permettre un meilleur contrôle sur la décision de l'agriculteur, une analyse de probabilité d'occurrence est proposée. En effet, en connaissant la probabilité d'une saison sèche ou saison humide, on peut déterminer quelle culture est plus favorable et s'elle est avantageuse. En conclusion, l'approche de Schrage propose que si on connaît la probabilité d'occurrence des différents scénarios, on peut trouver la solution optimale « globale » à l'aide de la programmation linéaire.

Pour sa part, Garcia (2001) explique une approche plus globale. Cette approche, qui est suivie au sein d'une équipe de recherche de l'INRA, est caractérisée par trois points essentiels:

- La modélisation des processus décisionnels considérés.
- La simulation de l'interaction système décisionnel / système biophysique.
- La recherche de stratégies satisfaisant les objectifs de production.

Selon l'auteur, cette approche particulière de la simulation en production agricole, où les modèles biophysiques ne constituent plus qu'une partie d'un modèle plus général, nécessite encore d'être largement présentée et expliquée, afin de bien faire reconnaître l'importance du concept de stratégie comme modèle d'action en agronomie.

2. Chapitre 2 : Cadre théorique

2.1. Aide à la décision et analyse de scénarios

Ce chapitre sera consacré à définir les concepts de base qui seront utilisés lors de l'analyse, et permettra donc au lecteur de comprendre la méthodologie et l'interprétation des résultats. Etant donné que cette étude tente d'innover en appliquant certains concepts du domaine de l'aide à la décision à la planification de l'irrigation, les concepts théoriques liés à ce domaine seront donc expliqués plus en détails que ceux liés à l'analyse économique et l'étude du milieu biophysique. Ces derniers se retrouvent expliqués dans la méthodologie, sans tenter de faire un survol des différentes méthodologies existantes. Ce chapitre veut aussi amener le lecteur à mieux comprendre les hypothèses formulées et la raison pour laquelle elles ont été prises en compte.

Roy (1997) définit de la manière suivante l'aide à la décision : " L'aide à la décision est l'activité de celui qui, prenant appui sur des modèles clairement explicités mais non nécessairement complètement formalisés, aide à obtenir des éléments de réponse aux questions que se pose un intervenant dans un processus de décision, éléments concourant à éclairer la décision et normalement à prescrire, ou simplement à favoriser, un comportement de nature à accroître la cohérence entre l'évolution du processus d'une part, les objectifs et le système de valeurs au service desquels cet intervenant se trouve placé d'autre part."

L'aide à la décision contribue, donc, à construire, à asseoir et à faire partager des convictions ; elle ne révèle donc que d'une façon partielle une recherche de la vérité. C'est la description d'un système de préférences, souvent réalisée au moyen d'une représentation numérique, qui conduit alors à l'établissement d'une recommandation.

L'aide à la décision est un domaine qui provient de la "recherche opérationnelle" dans le domaine militaire. La deuxième guerre Mondiale a stimulé de nombreuses avancées dans les approches de formulation de problèmes et de recherche de solutions les mieux adaptées à des situations données.

Selon Vincke (2002), les approches d'aide à la décision peuvent se subdiviser selon le type de solution que l'on cherche :

- Une solution optimale, considérant un seul critère et un seul scénario
- Une solution de compromis, où on a plusieurs critères et un seul scénario
- Une solution de compromis robuste, où l'on a plusieurs critères et plusieurs scénarios

Le terme scénario ici dénote l'ensemble des variables exogènes, sur lequel le décideur ne peut pas prendre de décision et qui entreront dans le calcul du résultat, ou en fonction desquelles on cherchera une solution optimale ou un compromis.

Vincke (1998) présente une définition formelle du terme "robustesse". Selon lui, et en paraphrasant son formalisme mathématique, une solution est robuste si, sous différents scénarios, elle produit des résultats qui ne sont pas très différents l'un de l'autre et qui ne sont pas beaucoup moins bien que le résultat optimal obtenu pour chaque scénario pris séparément. Ce même auteur mentionne que Roy (1997) a été le premier à introduire le concept de robustesse en recherche opérationnelle et en aide à la décision. Il cite aussi Kouvelis et Yu (1997) qui, dans le contexte de l'optimisation de paramètres discrétisés, donnent des résultats théoriques et des algorithmes pour déterminer une solution montrant le plus faible écart par rapport à celle obtenues dans des conditions optimales.

2.1.1. Les étapes de l'aide à la décision.

La démarche scientifique d'aide à la décision (figure 1) se compose de quatre étapes principales comme l'indique le schéma suivant :

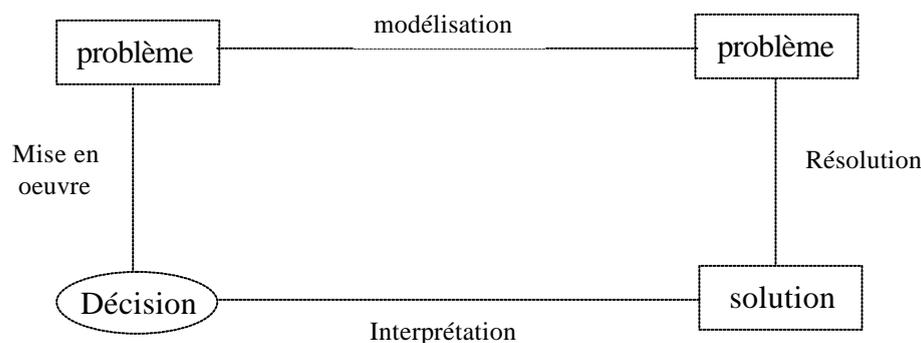


Figure 1. Démarche scientifique de l'aide à la décision

- La modélisation.
 - Analyse du problème, repérage du champ de la décision, des acteurs et entités concernés, fréquence et horizon de la décision.
 - Compréhension du système de valeurs, des objectifs et préférences du décideur.
 - Choix d'une problématique décisionnelle.
 - Traduction des décisions dans le langage formel choisi, définition des variables de décision.
 - Définitions des paramètres, de leur domaine de variation et de leur degré d'incertitude.
 - Énoncé et formalisation des contraintes délimitant le domaine des décisions.
 - Formalisation du ou des critères.

- La Résolution.
 - Choix d'une démarche algorithmique exacte ou heuristique.
 - Mise en œuvre de la procédure algorithmique, recours à des logiciels spécifiques, modeleurs, tableurs.
 - Construction d'un résultat selon la problématique choisie.
 - Analyse de sensibilité ou de robustesse du résultat en fonction de variations des paramètres.

- L'interprétation.
 - Elaboration d'une recommandation sur la base des résultats précédents.
 - Présentation de la recommandation aux acteurs.

- Mise en œuvre.
 - Mise en œuvre opérationnelle de la recommandation.
 - Suivi des impacts, ajustements et actions correctives.

- Validation et identification éventuelle d'un nouveau problème.

2.1.2. Quelques définitions relatives à la modélisation

Pour aider la prise de décision, il est utile de recourir à "une représentation cohérente et intelligible du problème décisionnel" (Vallin et Vanderpooten, 2002), c'est-à-dire à la formulation d'un modèle explicite. Un modèle est "une représentation schématique et partielle du contexte, des hypothèses et des critères sur lesquels le décideur s'appuie pour traduire, comprendre et évaluer les conséquences et les interactions de ses décisions" (Vallin et Vanderpooten, 2002). Selon ces mêmes auteurs, les modèles incluent deux familles d'éléments, les **variables** et les **paramètres**. Les variables sont ce que nous avons appelé jusqu'ici des conditions endogènes, c'est-à-dire qu'elles sont sous le contrôle du décideur. La décision est donc définie par un ensemble de variables. Les paramètres correspondent à ce que nous avons appelé conditions exogènes, elles traduisent l'environnement décisionnel mais le décideur n'a aucune influence sur elles. Les variables peuvent être limitées par une série de contraintes.

Nous choisissons aussi d'utiliser le vocabulaire suivant :

Stratégie (au lieu de décision), puisque l'on veut explorer les conséquences de différentes décisions possibles sans que les décisions n'aient été prises. Ce terme est analogue à celui de "solution" utilisé par Vincke.

Scénario comme étant défini par l'ensemble des paramètres ou conditions exogènes (Vallin et Vanderpooten, 2002), définissent plutôt le terme scénario comme correspondant à la combinaison d'une décision et d'un hasard, le terme hasard étant analogue à ce que l'on appelle scénario. Notre utilisation est analogue à celle que fait Vincke (1998, 2002) de ce terme.

On appellera **cas** la combinaison d'une stratégie et d'un scénario (équivalent au terme scénario utilisé par Vallin et Vanderpooten, 2002)

Un modèle peut être utilisé de différentes manières pour aider la décision, selon le type de question que l'on se pose. Aussi, un problème concret peut rassembler différents types de questions. Il peut être utilisé de façon exploratoire, pour explorer les conséquences de différentes stratégies ou décisions possibles, et de différents scénarios (qu'est-ce qui se passerait si...). Il peut être optimisé selon différentes approches, pour trouver la solution (ou stratégie) la plus optimale dans un scénario donné (ex : qu'est-ce qui m'apporterait les profits maximaux ?). On peut évaluer sa sensibilité à différentes variables ou paramètres, pour savoir ce que l'on gagnerait ou perdrait en variant notre stratégie, ou si les conditions exogènes changeaient.

Autrement, encore selon Vallin et Vanderpooten (2002), les modèles peuvent être utilisés dans différents contextes, selon le degré d'incertitude des paramètres ou plutôt selon la part d'incertitude dont on veut tenir compte. En effet, on peut choisir de modéliser un environnement **déterministe**, où il n'y a qu'une liste de paramètres, **aléatoire** (ou stochastique), où le modélisateur peut affecter des degrés de confiance quant à la réalisation de certains événements ; ou encore **incertain**, où l'on dresse une liste exhaustive des événements jugés pertinents pour caractériser le contexte. Dans notre étude, nous tiendrons compte d'un environnement incertain, et modéliserons des événements (ou scénarios) contrastés, avec l'objectif de trouver une solution robuste.

Le choix du modèle et de son degré de complexité dépend de la décision qui doit être prise et de qui doit la prendre. Dans la méthodologie, nous décrirons le modèle très simple qui a été utilisé dans cette étude et justifierons son choix.

2.1.3. Critères pour prendre des décisions dans un avenir incertain

A travers l'optimisation (pouvant se faire de différentes façons, incluant la programmation linéaire), on peut trouver la "meilleure" stratégie pour chacun des scénarios. Cependant, comme on ne sait pas quel scénario se produira, comment choisir la stratégie la meilleure, dans le contexte de l'incertitude ? Nous parlerons ici de trois critères différents qui peuvent être utilisés pour choisir entre différentes stratégies (Vallin et Vanderpooten, 2002, en donnent des exemples d'application).

- Lorsqu'il est possible d'optimiser, et qu'un des scénarios donne forcément des résultats moins favorables pour toutes les stratégies (donc qu'on peut identifier le scénario le plus pessimiste) la stratégie la plus prudente est celle qui donne un résultat optimal sous ce scénario le plus pessimiste.
- Lorsque l'on compare différentes stratégies entre elles, selon le critère de Wald, la solution la plus adéquate est celle qui donne la valeur la plus élevée du gain minimal (ou encore la valeur la plus faible de la perte maximale) sur tous les scénarios considérés. Ce critère peut être utilisé sans qu'il y ait nécessairement un scénario pessimiste par définition. Si toutefois ce scénario existe, et si on peut optimiser, on peut tout simplement chercher la stratégie optimale pour le scénario pessimiste. Ce critère est équivalent à chercher la stratégie la plus prudente.
- Selon le critère de Savage, décrit par Vallin et Vanderpooten (2002), la stratégie la plus désirable est celle qui procure le plus faible regret maximal. Le « regret » est, pour un cas donné (combinaison de stratégie et de scénario), l'écart entre le résultat obtenu et le résultat optimal qui aurait été obtenu pour le même scénario. Le regret maximal pour chaque stratégie est la valeur la plus élevée des regrets obtenus dans l'ensemble des scénarios considérés.

2.1.4. L'analyse multicritère.

La plupart des décisions impliquent plusieurs critères, et c'est pourquoi une branche importante de l'aide à la décision se tourne vers l'analyse multicritère.

L'aide multicritère à la décision ou analyse multicritère a comme objectif de fournir à un décideur des outils lui permettant de progresser dans la résolution d'un problème de décision où plusieurs points de vue, souvent contradictoires, doivent être pris en compte. Vincke (1989) affirme que la première constatation qui doit être faite, lorsqu'on aborde un tel problème, est qu'il n'existe pas, en général, une décision (solution ou action) qui soit la meilleure simultanément pour tous les points de vue. Le mot *optimisation* ou plutôt la solution la plus optimale n'a donc plus de sens dans un tel contexte, les méthodes multicritères ne fournissent pas de solutions "objectivement les meilleurs", ces solutions

n'existent pas. C'est pourquoi l'auteur laisse voir l'importance du mot *aide*. L'évolution des méthodes multicritère illustre d'ailleurs parfaitement ce point de vue : l'agrégation en un critère unique (de manière à ramener le problème multicritère à un problème d'optimisation) a été remise en cause et progressivement remplacée par des méthodes plus souples, moins mathématisées ; de même, l'interactivité a occupé une place de plus en plus importante dans les procédures proposées.

Vincke (1989) sépare les approches d'analyse multicritère en trois familles :

- La théorie de l'utilité multiattribut.
- Les méthodes de surclassement.
- Les méthodes interactives.

Pour plus de clarté Roy (1985) les appelle respectivement :

- Approche du critère unique de synthèse évacuant toute incomparabilité.
- Approche du surclassement de synthèse acceptant l'incomparabilité.
- Approche du jugement local interactif avec itérations essai-erreur.

La première famille, d'inspiration américaine, consiste à agréger les différents points de vue en une fonction unique qu'il s'agit ensuite d'optimiser. Les travaux relatifs à cette famille étudient les conditions mathématiques d'agrégation, les formes particulières de la fonction agrégeante et les méthodes de construction.

La deuxième famille, d'inspiration française, vise d'abord à construire une relation, appelée relation de surclassement, qui représente les préférences solidement établies du décideur, étant donnée l'information dont il dispose. Cette relation n'est donc ni complète ni transitive. La seconde étape va consister à exploiter la relation de surclassement en vue d'aider le décideur à résoudre son problème.

La troisième famille, la plus récente, propose des méthodes qui alternent les étapes de calculs (fournissant les compromis successifs) et les étapes de dialogue (sources d'informations supplémentaires sur les préférences du décideur). Bien que développées, le plus souvent, dans

le contexte de la programmation mathématique à objectifs multiples, certaines de ces méthodes s'adaptent à des cas plus généraux ([Vincke, 1989](#)).

Parfois, on peut exprimer plusieurs critères sous forme d'un seuil, pour pouvoir trouver une solution optimale. Par exemple, dans une exploitation agricole, on pourrait chiffrer les bénéfices environnementaux et la sécurité alimentaire en terme économique pour ensuite faire une analyse coût-bénéfice. Ceci revient en quelque sorte à effectuer une analyse de l'utilité multiattribut.

"Les premiers développements de l'analyse multicritère étaient liés au domaine de la prise de décision environnementale (gestion des déchets, traitement des eaux, installation de décharges...). Cependant, de nouvelles applications ont vu le jour, notamment dans le domaine de la finance. En gestion de portefeuille, par exemple, il est indispensable de faire intervenir des critères boursiers et des critères d'analyse financière. Ces ensembles de critères, sous la forme de ratios le plus souvent, n'évoluent que rarement dans le même sens. Il faut cependant être capable de prendre une décision afin de constituer un portefeuille répondant aux attentes du client (effet de levier important en cas de croissance du marché, portefeuille à faible variance...)" ([Roy, 1997](#)) .

3. Chapitre 3 : Méthodologie proposée

3.1. Etapes de la Méthodologie

La méthodologie reprendra les étapes de l'aide à la décision, telles que proposées par Vallin et Vanderpooten (2002) et données dans le cadre théorique de ce rapport, sans se rendre à la mise en oeuvre:

- **Modélisation.**

- Analyse du problème, repérage du champ de la décision, des acteurs et entités concernés, fréquence et horizon de la décision.
- Compréhension du système de valeurs, des objectifs et préférences du décideur.
- Choix d'une problématique décisionnelle.
- Traduction des décisions dans le langage formel choisi, définition des variables de décision.
- Définitions des paramètres, de leur domaine de variation et de leur degré d'incertitude.
- Enoncé et formalisation des contraintes délimitant le domaine des décisions.
- Formalisation du ou des critères.

- **La Résolution.**

- Choix d'une démarche algorithmique exacte ou heuristique.
- Mise en œuvre de la procédure algorithmique, recours à des logiciels spécifiques, modeleurs, tableurs.
- Construction d'un résultat selon la problématique choisie.

- Analyse de sensibilité ou de robustesse du résultat en fonction de variation des paramètres.
- **L'interprétation.**
 - Elaboration d'une recommandation sur la base des résultats précédents.
 - Présentation de la recommandation aux acteurs.

3.2. Modélisation

Chaque cas différent aura sa propre analyse du problème, repérage du champ de la décision, acteurs et entités concernés, fréquence et horizon de la décision. Les décideurs auront chacun leurs systèmes de valeurs, leurs préférences, et les problématiques seront aussi différentes selon les cas. On peut cependant décrire la situation générale à laquelle la démarche algorithmique décrite à la section suivante pourra s'appliquer :

- Les décideurs sont les gestionnaires d'un espace agricole (agriculteurs, association de producteurs, entreprise de production agricole)
- Les autres acteurs sont les prêteurs de fonds ou d'intrants qui doivent décider s'ils appuient ou non le projet ou les actions, les agents d'assistance technique agricole qui peuvent aider les décideurs dans leur processus de décision
- Les décideurs doivent décider comment allouer des ressources limitées, notamment en terre agricole, main d'œuvre et eau (ceci pourrait aussi inclure les ressources financières et autres), et s'ils doivent se lancer ou non dans le projet de monter un système d'irrigation
- Les décideurs doivent prendre ces décisions dans un avenir incertain de prix, de disponibilité en eau et de climat, mais souhaitent adopter une stratégie leur permettant d'obtenir des résultats qui sont bons dans toutes les situations possibles, sans pour autant obtenir les meilleurs résultats possibles dans chaque situation.

La problématique de décision est donc de choisir une ou des stratégies qui donneraient de bons résultats sous différents scénarios sans pour autant correspondre à la stratégie optimale pour chaque scénario, ou de choisir la décision la « plus favorable » selon des critères permettant de prendre en compte les résultats de différents scénarios.

On voudrait pouvoir prendre en compte, dans une analyse multicritère, les difficultés techniques de différentes stratégies, leurs effets environnementaux négatifs, en plus de leur bénéfice économique. Cependant, en raison du temps limité, cette étude se limitera à la considération du bénéfice économique.

Les **variables**, définissant les stratégies, seront donc les surfaces sous différentes cultures, irriguées et non irriguées.

Les **paramètres** qui affectent la rentabilité économique d'une stratégie, et qui seront différents d'un scénario à l'autre, sont :

- Le coût d'investissement dans un système d'irrigation, s'il y a lieu
- Le bénéfice par hectare qu'on peut attendre de chacune de ses composantes (i.e. type de culture), qui dépend du prix de vente, de leur rendement, qui lui-même est affecté par les conditions climatiques, l'apport en eau d'irrigation et les conditions d'humidité du sol (et éventuellement d'autres facteurs comme l'application d'engrais, dont on n'a pas tenu compte dans cette étude)

Les **contraintes** sont le terrain disponible, la quantité de main d'œuvre et la quantité d'eau disponibles.

3.3. Résolution, démarche algorithmique

L'approche d'analyse choisie consiste à définir une série de scénarios et à déterminer la stratégie optimale pour chacun d'entre eux. On dispose alors d'un nombre initial de stratégies à considérer, égal au nombre de stratégies différentes qui sont apparues dans cet exercice d'optimisation. On ajoute ensuite d'autres stratégies qui pourraient être légèrement moins intéressantes du point de vue économique, mais présenter d'autres avantages selon d'autres critères, tels que la facilité de culture, la résistance des cultures aux maladies, la conservation des sols, la faible utilisation de pesticides, etc... On évalue ensuite chaque stratégie séparément, pour chaque scénario. La qualification des différentes stratégies du point de vue économique se fera en considérant l'ensemble des scénarios, selon le critère de Savage ou du regret maximal, dont la procédure sera décrite à la fin de ce chapitre. Cependant, d'autres

approches pour qualifier les résultats économiques sous l'ensemble des scénarios pourraient être utilisées.

Pour notre cas, compte tenu de la présence d'un avenir incertain, l'utilisation de la programmation linéaire pour trouver une solution optimale « globale » n'est pas possible car on ne connaît pas la probabilité d'occurrence des différents scénarios (Schrage, 1997).

Avant d'établir quelles sont les stratégies à étudier, il faut trouver les solutions optimales pour chaque scénario. Cependant, pour pouvoir optimiser, il faut avoir calculé, pour chaque scénario, le bénéfice net (ou valeur présente nette) correspondant à chaque culture considérée, ou composante du système de production. Le bénéfice de la production dépend du prix de vente des produits qui peut être différent selon les scénarios. Mais le bénéfice dépend aussi du rendement des cultures, qui lui dépend, entre autre, du déficit hydrique conditionné par le climat ainsi que de l'activité d'irrigation. Comme on peut le voir dans la [figure 2](#), le calcul de la relation cout-bénéfice devra être précédé par deux autres étapes : calcul du bilan hydrique et estimation du rendement des cultures.

Pour récapituler, les étapes de la solution sont les suivantes :

- 1-Définition des scénarios

- 2-Calcul de la marge économique pour chacune des composantes du système de production

- 2.1-Estimation du déficit en eau au moyen d'un bilan hydrique et modélisation du stockage de l'eau dans le sol

- 2.2-Calcul du rendement des cultures

- 2.3-Calcul de la marge en tenant compte des résultats des deux étapes précédentes

- 3-Recherche de la stratégie optimale pour chacun des scénarios

- 4-Définition des stratégies à considérer, incluant les différentes solutions obtenues lors de l'optimisation, et en ajoutant d'autres stratégies qui peuvent être légèrement moins bonnes du point de vue économique mais présenter d'autres avantages

- 5-Evaluation économique (calcul de la Valeur Présente Nette) pour chacun des cas correspondant à toutes les combinaisons de stratégies et de scénarios

- 6-pour l'application du critère de Savage, pour chaque cas, calcul du regret (différence entre la Valeur Présente Nette de la stratégie considérée et la Valeur Présente Nette de

la stratégie optimale, pour le même scénario). Selon ce critère, la stratégie la plus favorable est celle qui présente la valeur la plus faible du regret maximal

7- (étape non atteinte dans cette étude par faute de temps) Comparaison des différentes stratégies à l'aide d'une méthode d'analyse multicritère.

Les sous-sections suivantes décrivent ces étapes à partir de la 2. La [figure 2](#) présente les étapes de la méthodologie proposée.

3.4. Estimation du déficit en eau via un bilan hydrique et une modélisation du stockage de l'eau dans le sol

Grâce à l'analyse du système sol-plante-atmosphère via un bilan hydrique, il est possible de déterminer d'une part la quantité d'eau présente dans le sol et qui est disponible pour les plantes. Pour l'estimation du déficit hydrique on a utilisé le modèle de bilan hydrique très simple, schématisé dans la [figure 3](#), où la variation de stock d'eau dans le système est fonction des entrées (pluie, irrigation) et des sorties (évapotranspiration et drainage) ([Becu, 2001](#)). Le système peut être décrit par la relation suivante:

$$\Delta S = (P + I) - ETR - D$$

Avec:

ΔS : variation de stock dans le sol.

P : précipitation

I: Irrigation

ETR: Evapotranspiration réelle.

D : drainage.

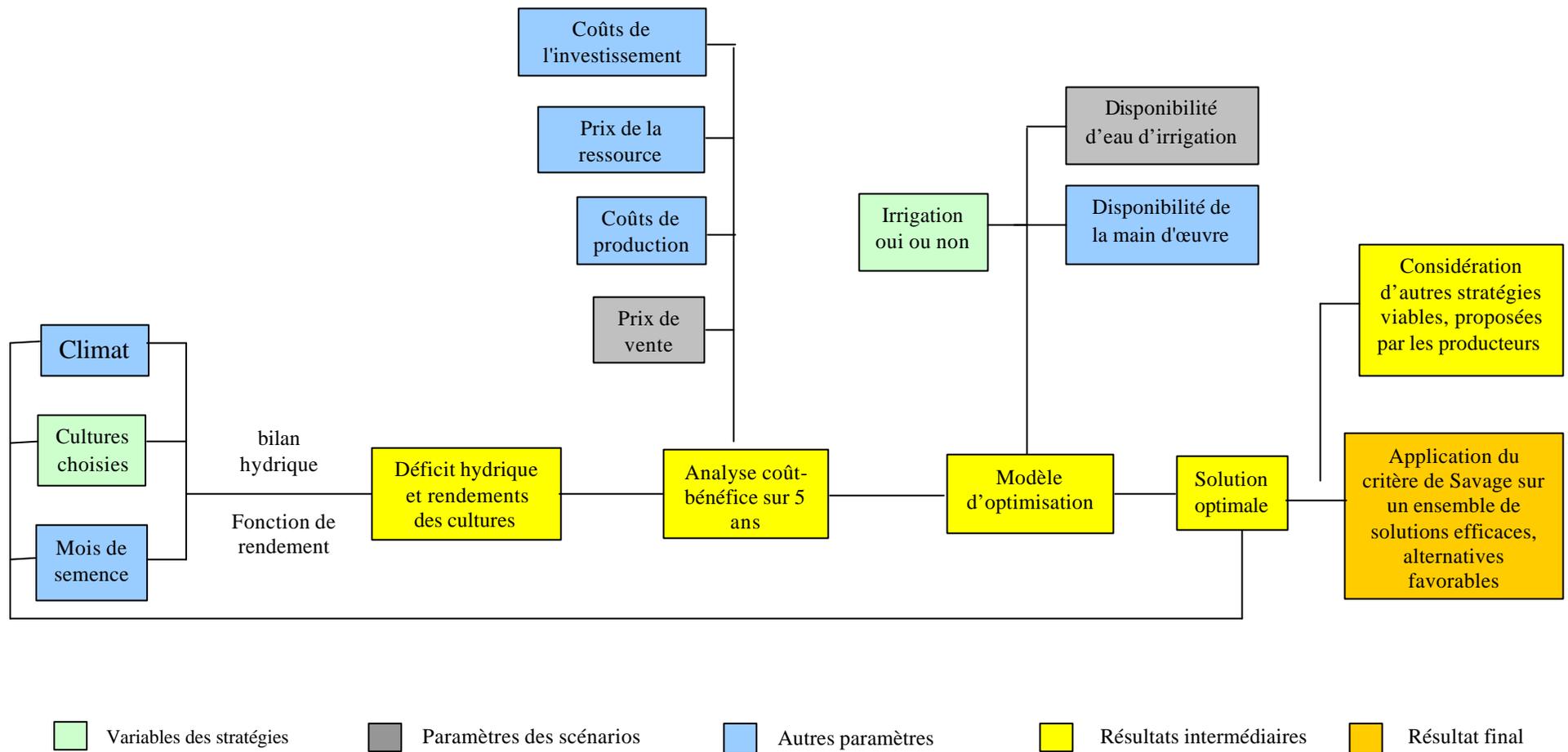


Figure 2. Etapes de la méthodologie proposée.

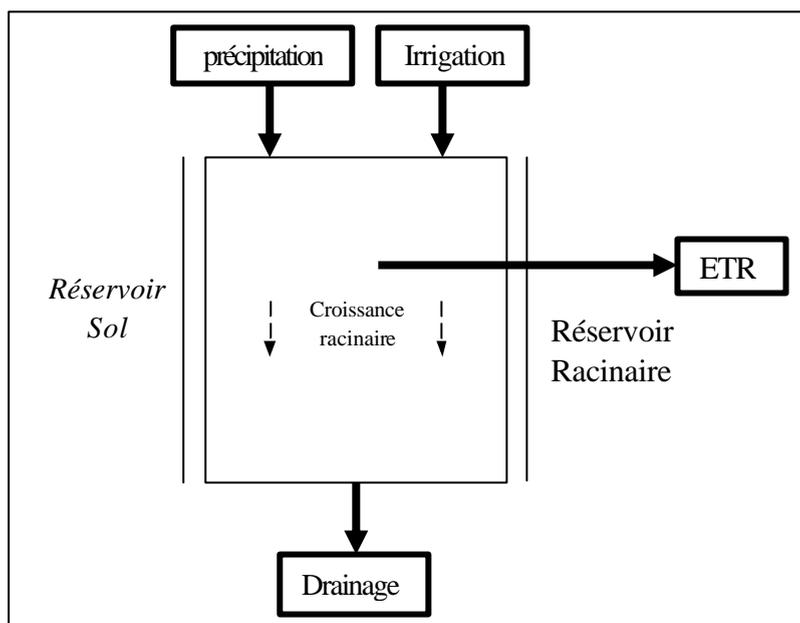


Figure 3. Représentation schématique du bilan hydrique

La simulation du stockage de l'eau dans le sol se base sur l'approche analogique d'un modèle à réservoirs. Pour notre cas, pour la simplification de la simulation, un réservoir unique sera modélisé (figure 4).

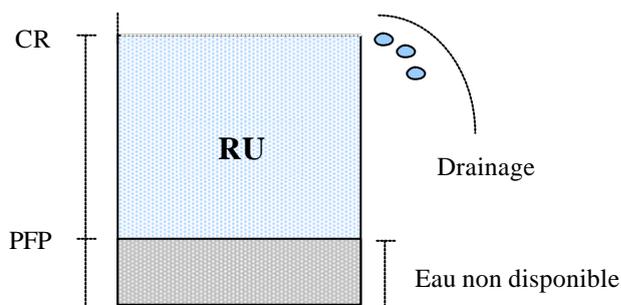


Figure 4. Approche analogique. Cas d'un réservoir.

L'infiltration et le drainage sont aussi en conséquence simulés selon une analogie de réservoir :

$$\text{Si } RH_{m-1} + P_m + I_m < R_{um}$$

$$\text{Alors, } RH_m = RH_{m-1} + P_m + I_m ; D_m = 0$$

$$\text{Si } RH_{m-1} + P_m + I_m > R_{Um}$$

$$\text{Alors, } RH_m = R_U ; D_m = RH_{m-1} + P_m + I_m - R_{Um}$$

C'est-à-dire, si la réserve hydrique (ou quantité d'eau dans la réserve utile) au pas de temps précédent plus la pluie et l'irrigation au pas de temps actuel sont inférieures à la réserve utile au pas de temps présent, alors la nouvelle réserve hydrique sera le résultat des apports par précipitation et irrigation de au même pas de temps plus sa réserve hydrique, il n'y aura pas de drainage. Par contre, si la condition est dépassée, alors la réserve hydrique sera au maximum et le drainage sera le résultat des apports plus la réserve hydrique au pas de temps moins la réserve utile.

Une approche analogique comme celle-ci est peu sensible à la variation des paramètres par rapport aux approches empiriques ou mécanistes, elle devient plus robuste et moins complexe grâce à la diminution du nombre de paramètres mis en jeu. Ceci permet une interprétation et une utilisation facile par rapport aux méthodes empiriques ou mécanistes (Voltz, 2002)

3.4.1. Estimation de l'évapotranspiration réelle (ETR).

Le modèle fait une estimation globale empirique de l'ETR selon les relations suivantes :

$$\text{Si } RH_m \geq R_{DUm}$$

$$\text{Alors, } ETR_m = ETM_m$$

$$\text{Si } RH_m < R_{DUm}$$

$$\text{Alors, } ETR_m = ETM_m * RH_m / R_{DUm}$$

$$RH_{m+1} = RH_m - ETR_m$$

C'est-à-dire, si la réserve hydrique actuelle est supérieure à la réserve difficilement utilisable il n'y aura pas de stress hydrique dans le système et l'ETR sera donc égale à l'ETM au pas de temps considéré. Par contre, si la condition n'est pas remplie il aura un stress hydrique dans le système et l'ETR sera affectée pour un facteur qui exprime une réserve hydrique relative (Voltz, 2002).

En fin, la réserve hydrique de l'étape temporelle suivante sera la différence entre la réserve hydrique de l'étape précédente et l'ETR de l'étape actuelle.

L'évapotranspiration maximale (ETM) est calculée en fonction de l'évapotranspiration potentielle (ETP) au travers du facteur de culture (K_c) selon la relation donnée pour la FAO (Allen et al 1998) suivante :

$$ETM = K_c \times ETP$$

L'annexe A présente les valeurs de K_c pour les différentes cultures choisies.

3.5. Calcul du rendement des cultures

Etant donné que les associations de petits producteurs disposent rarement des données nécessaires pour l'application de modèles de croissance des plantes, permettant de calculer les rendements, on a choisi d'utiliser une relation empirique publiée par la FAO. Doorembos (1986) propose une relation entre le rendement relatif (Y_a/Y_m) et l'évapotranspiration relative (ET_a/ET_m) à travers un coefficient (K_y) , selon l'équation suivante:

$$(1 - Y_a/Y_m) = K_y (1 - ET_a/ET_m)$$

La variable à résoudre dans cette équation sera le rendement actuel (Y_a). Les valeurs de l'évapotranspiration actuelle ET_a (ou ETR dans notre cas) et l'évapotranspiration maximale ET_m , sont calculées pour chaque période de production en fonction des résultats du bilan hydrique.

Par leurs parts, les rendements maximaux (Y_m) et les valeurs du K_y sont des valeurs empiriques données dans le document de la FAO (Doorembos, 1986) et qui sont présentées dans l'annexe A.

3.6. Bilans coût-bénéfice

Pour exprimer la relation coût-bénéfice pour chaque culture considérée, on calculera la marge exprimée en argent d'aujourd'hui, c'est-à-dire la somme des recettes moins la somme des coûts, sur la période de temps considérée (Gomez, 2002).

Pour exprimer la relation coût-bénéfice de chaque stratégie, on tiendra compte de l'investissement relié au système d'irrigation, et on utilisera la Valeur Presente Nette (VPN). Tout comme pour la marge, toutes les recettes et déficits futurs sont transformés en argent d'aujourd'hui. Pour ce faire la relation suivante est appliquée :

$$VPN = VP - I$$

$$\text{Où, } VP = S ((B_n - C_n) / (1+i)^n)$$

Avec:

I = investissement

VP = Valeur présente

B_n = recettes pour la période de calcul n

C_n = Coûts pour la période n

i = taux d'intérêt

n = période de calcul

Les bénéfices et les coûts seront calculés pour chaque semestre simulé (ceci est la période de calcul) et présentés en terme d'argent d'aujourd'hui en utilisant cette relation. La [figure 5](#) montre le concept graphiquement au pas de temps $t = 1$, $t = 2$ et $t = 3$.

- $t = 1$: Considère l'investissement, les coûts et les bénéfices individuels par semestre.
- $t = 2$: Considère la VP (soit positive soit négative) des coûts et bénéfices en temps actuel.
- $t = 3$: Considère la VPN (soit positive soit négative) du projet.

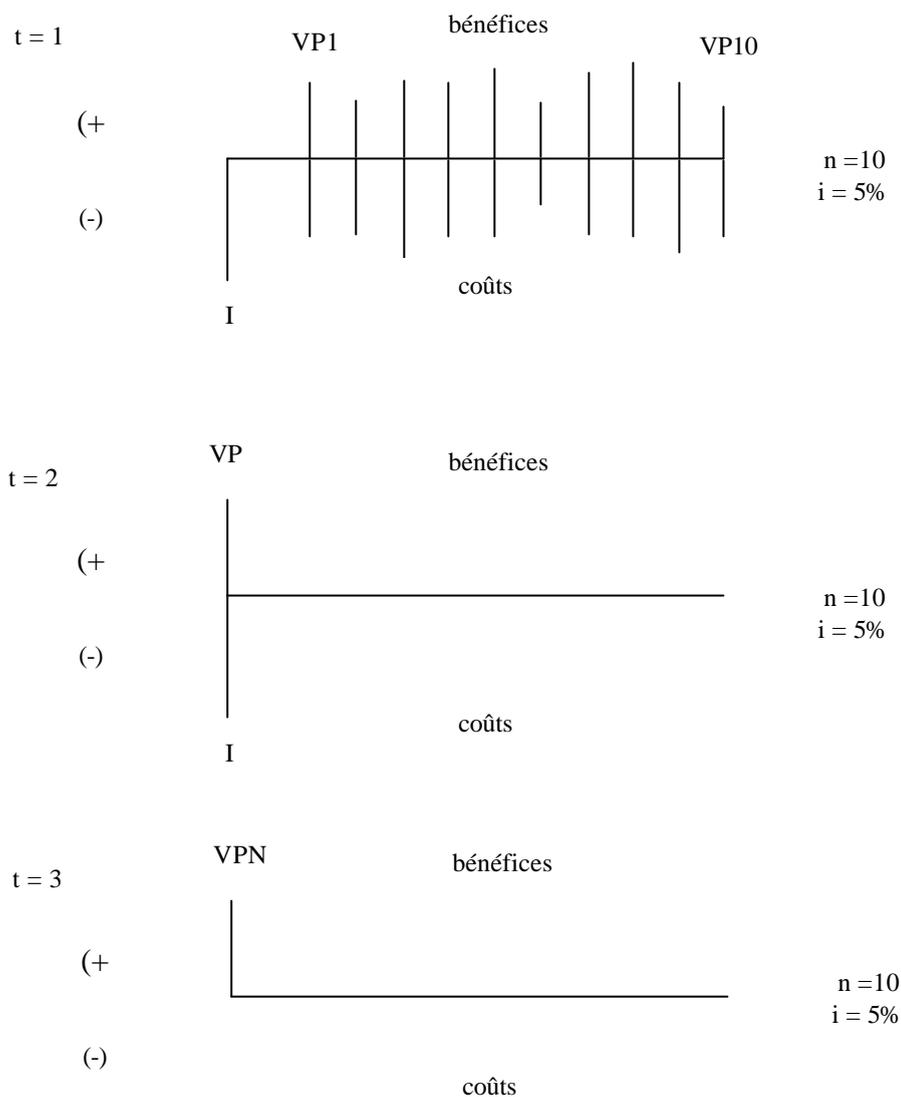


Figure 5. Représentation graphique de la VPN

Si la VPN est négative, ceci implique que le projet est déficitaire, ou au contraire si elle est positive elle indique un profit. Quand la VPN est nulle on dira que le projet est indifférent.

Cette procédure peut être réalisée facilement sur une feuille de calcul en connaissant bien sûr les coûts de production, les rendements des cultures par hectare ainsi que les prix moyens maximaux et minimaux de vente sur le marché.

3.7. Recherche de la stratégie optimale du point de vue économique pour chacun des scénarios

Les approches d'optimisation telles que la programmation linéaire ou quadratique sont des procédures mathématiques permettant de trouver l'allocation optimale de ressources limitées. Elles sont constituées d'une fonction «objectif» et d'une série de contraintes. Dans notre cas, la fonction «objectif» est de maximiser la valeur présente nette (ou marge exprimée en argent d'aujourd'hui), elle-même étant fonction des variables recherchées, soient les surfaces destinées aux différentes cultures et les surfaces irriguées. Les contraintes sont déterminées par la disponibilité en terres agricoles, la disponibilité en eau d'irrigation et la disponibilité en main d'œuvre. Si la relation entre les variables de décision et le résultat exprimé dans la fonction «objectif» est linéaire, ce qui est notre cas, on peut utiliser la programmation linéaire. On a utilisé le logiciel LINGO 7.0. puisqu'il permet d'élaborer des fichiers de programmation simples, qui sont plus faciles à utiliser que les fonctions d'optimisation des feuilles de calcul (Estrada, 1999). Les fonctions «objectif» et les contraintes utilisées seront montrées lors de la présentation des résultats.

3.8. Méthodologie pour l'application du critère de Savage (critère du regret maximal)

On considérera comme critère d'évaluation de chaque stratégie, le regret maximum supporté lorsque cette solution est choisie. Puisqu'on cherche rationnellement à limiter les regrets, on choisira la décision qui minimise le regret maximum qu'elle entraîne pour une série de scénarios (Vallin et Vanderpooten, 2002).

La structure algorithmique du critère de Savage peut être synthétisée de la façon suivante. Si on note $g(a_i e_j)$ le gain associé à la décision a_i (stratégie) dans l'état e_j (scénario), le regret s'exprime par :

$$r(a_i e_j) = \max g(a_i e_j) - g(a_i e_j)$$

l'évaluation, pour a_i , du critère proposé est alors :

$$c(a_i) = \max r(a_i e_j)$$

L'action a^* choisie est celle qui minimise $c(a_i)$:

$$c(a^*) = \max c(a_i)$$

Un tableau de regrets, $r(a_i e_j)$ peut être créé pour agiler l'analyse :

Décision (ou stratégie)	Scénario			Regret maximum $c(a_i)$
	e_1	e_2	e_n	
a_1	$a_1 e_1$	$a_1 e_2$	$a_1 e_n$	$c(a_1)$
a_2	$a_2 e_1$	$a_2 e_2$	$a_2 e_n$	$c(a_2)$
a_n	$a_n e_1$	$a_n e_2$	$a_n e_n$	$c(a_n)$

4. Chapitre 4 : Application de la méthodologie proposée au village de El Turpial, Colombie, en guise de première démonstration

4.1. Description de la zone d'étude

La communauté d'El Turpial est située dans la région de Cháviva, juridiction de la municipalité de Puerto López, exactement à 80 km sur la route qui conduit à Puerto Gaitán. La Communauté apparaît comme le résultat d'une invasion des terrains par des colons qui proviennent des départements de Boyacá et Tolima, et qui habitent ces terres depuis 15 ans sans avoir de titres de propriété.

Actuellement, la communauté est représentée pour 15 familles qui occupent une surface totale de 152.34 Ha. Elles sont toutes autonomes sur leurs propriétés et les utilisent en fonction de leur convenance et des ressources disponibles. Le village compte avec importantes sources d'eau. La principale source correspond à la rivière Meta située au nord du village, d'autres moins importantes, comme le caño Turpial et le Turpialito, se trouvent à l'est et au sud du village respectivement. Ils disposent aussi d'un puits profond qu'ils utilisent principalement pour l'approvisionnement en eau pour la consommation humaine, les animaux domestiques et l'élevage. Pendant les nuits l'eau est pompée pour alimenter la moitié de la communauté le jour suivant, tandis que l'autre partie reste sans ce service reçoit de l'eau le jour d'après. Il n'existe pas un système d'irrigation, ils doivent profiter au maximum de l'époque des pluies pour la semence des cultures. On a fait une estimation a-priori de la disponibilité maximale en eau pour l'irrigation de 3460 m³ par an.

La communauté attend la distribution d'énergie électrique pour la fin 2002. En attendant, quelques propriétés ont un capteur solaire, avec lequel les familles peuvent faire fonctionner l'éclairage et quelques petits appareils électroménagers. La pompe qui dessert le puits du village est dotée d'une centrale électrique à essence.

Les enquêtes ont montré que l'économie de cette communauté est principalement de subsistance. Quelques fois ils commercialisent, à petite échelle sur Puerto Gaitán, quelques produits comme le manioc et le maïs ; mais à cause des coûts de transport l'effort à faire est très grand et peu rentable. De façon générale ils ensemencent le manioc avec lequel ils obtiennent quelques bénéfices, le maïs et les pâtures servant de source d'alimentation pour les oiseaux domestiques, les cochons et l'élevage. Quelques familles sont spécialisées dans la production des fruits et des vergers tandis que d'autres subsistent par la vente de lait et de bétail. Certains travaillent en offrant leur main d'œuvre dans d'autres propriétés voisines.

La main d'œuvre est limitée à la disponibilité des chefs de famille du village, c'est-à-dire qu'on ne peut compter qu'avec 15 ou maximum 16 personnes pour les labours agricoles communautaires.

Les sols de la zone proche du fleuve Meta sont fertiles et facilement mécanisables, tandis que les autres sont des oxysols typiques de l'Altiplano colombienne, acides et de fertilité médiocre. Les habitants n'ont aucun type de machinerie pour la réalisation des labours agricoles et louent parfois un tracteur au village voisin ou labourent le sol manuellement pour l'ensemencement.

Ils ne font pas beaucoup d'extraction de ressources de la forêt, seulement le bois de chauffage pour cuisiner. Heureusement et en contradiction avec d'autres communautés en Colombie, ils sont conscients que la permanence de la forêt est très importante, non seulement pour la faune qu'elle loge, mais pour la conservation et la qualité de l'eau.

Il y a une école qui dispose d'un professeur. L'infrastructure physique dispose de deux salles de classe, une unité sanitaire, un terrain de jeux multiple et une chambre pour le logement du professeur. Il existe un service de restaurant scolaire qui est offert par l'Institut Colombien de Bien-être Familial (ICBF).

4.1.1. Utilisation actuelle du sol.

Les enquêtes ont montré qu'El Turpial a une surface totale de 152.35 Ha distribuée selon le tableau suivant:

Tableau 1. Utilisation actuelle du sol.

Pratique	Surface (Ha)
Forêt	41.13
pâturages introduit	40.05
Jachères	24.26
Pâturages natifs	15.91
Manioc	11.8
Maïs	7.45
Banane plantain	5.1
Arbres fruitiers	3.73
Zone d'inondation	1.59
Ecole	1.32

En conclusion, sur les 152.35 Ha disponibles, approximativement 30 Ha sont actuellement destinés à l'exploitation agricole.

4.2. Choix des cultures considérées dans les simulations

Selon les activités agricoles actuelles et les désirs des agriculteurs du village on a décidé de considérer, dans un premier temps, pour les simulations les cultures de maïs, manioc, banane plantain, pastèque, curossol , avocat et potiron.

Cette sélection correspond aux résultats des analyses des enquêtes qui ont montré l'intérêt de la communauté pour la production soit pour un intérêt économique, soit parce qu'il s'agit d'une activité agricole établie ou simplement pour le désir d'explorer les opportunités de nouveaux produits sur différents marchés.

Pour le cas des cultures d'une période de croissance (période d'établissement, période végétative, période de floraison, formation de produit et maturation) inférieure à 180 jours seront réalisées des rotations annuelles décrites dans le [tableau 2](#):

Tableau 2. Rotations annuelles considérées pour les cultures inférieures à 180 jours.

Rotation	1^{er} semestre	2^{ème} semestre
Maïs - maïs	Maïs	Maïs
Maïs - pastèque	Maïs	Pastèque
Maïs - potiron	Maïs	Potiron

Initialement la méthodologie proposée ne cherche pas l'augmentation de l'exploitation agricole actuelle mais l'optimisation de cette surface. Autrement dit, on va préserver les mêmes distributions et on cherchera la stratégie idéale pour les organiser d'une façon plus rentable. On va considérer aussi les cultures d'avocat et de curossol qui apparaissent peu dans l'utilisation actuelle du sol (sous la rubrique arbres fruitiers), mais sont un désir de la communauté.

Les cultures de manioc et de banane plantain seront considérées pour notre cas comme des cultures anti-risque, c'est-à-dire, qu'on va assurer une production minimale de ces cultures soit pour l'autoconsommation soit pour le marché (ces produits sont de facile commercialisation).

Le **tableau 3** présente la distribution des surfaces de culture choisies prise en compte pour la simulation.

Tableau 3. Distribution des cultures prise en compte pour la simulation.

Pratique	Surface (Ha)
Rotations, Curossol et Avocat	Supérieur ou inférieur à 17
Manioc	Supérieur ou égale à 8
Banane plantain	Supérieur ou égale à 5
Total	30

Il est clair que les surfaces des rotations de curossol et d'avocat ne sont pas fixes. Dans le cas où le manioc ou la banane plantain seraient plus rentables que les autres, ils pourraient occuper une surface supérieure aux 8 ou 5 Ha respectivement mais jamais une surface inférieure à cette limite.

4.3. Définition des scénarios à considérer

Faire varier les résultats de chaque stratégie considérée en fonction des scénarios va montrer, en terme de relation coûts-bénéfices, une série de cas possibles comme résultat de la combinaison.

Le [tableau 4](#) présente la façon que la méthodologie utilise dans l'analyse des cas et la présentation des résultats. Il s'agit d'une organisation matricielle de n colonnes qui représentent les scénarios et m lignes qui représentent les stratégies.

Tableau 4. Organisation matricielle des scénarios, stratégies et cas.

scénarios stratégies	Scénario 1	Scénario 2	Scénario 3	Scénario n
Solution optimale	Rentabilité. Cas 1-1			
Stratégie 1				
Stratégie 2				
Stratégie m				Rentabilité cas n-m

On va considérer initialement les quatre scénarios suivants :

- Une bonne disponibilité en eau pour l'irrigation et de bons prix.

Celui-là correspond au scénario le plus optimiste et correspond au cas où il n'existe pas de limitation de la ressource et où la production des cultures est prévue sur une période intéressante de demande (bons prix).

- Une réduction importante des prix mais une bonne disponibilité en eau.

Il est possible que s'il n'existe pas de restrictions sur de la disponibilité en eau d'irrigation au moment de la récolte, le marché peut présenter une diminution considérable des prix comme résultat d'une demande faible du produit. Ces types de situations sont communs en Colombie à cause de la viabilité qu'ont les différents commerçants pour l'importation des produits alimentaires ou à cause aussi des situations exceptionnelles comme la détérioration du produit, du retard pour la récolte, etc.

- Une disponibilité limitée de la ressource mais de bons prix.

On doit prendre en compte une situation pendant laquelle le marché a une nécessité importante du produit, situation qui a comme effet l'augmentation des prix, mais l'eau pour l'irrigation est très limitée. On va considérer cette limitation comme la moitié de l'eau totale disponible dans le scénario de bonne disponibilité.

- Une disponibilité limitée de la ressource et une réduction des prix.

Ceci est le scénario le plus pessimiste mais qui pourrait se présenter pour les raisons exprimées dans les scénarios deux et trois où on parle des causes possibles de la réduction des prix et de la disponibilité en eau d'irrigation (moitié de l'eau disponible).

4.4. Calcul de la marge brute pour chacune des composantes du système de production

4.4.1. Estimation du déficit en eau au moyen d'un bilan hydrique et modélisation du stockage de l'eau dans le sol

Estimation approximative des paramètres des sols

Une étude développée pour le CIAT sur la municipalité de Puerto López ([Rubiano, 2001](#)) a révélé les caractéristiques de sol suivantes pour le village d'El Turpial:

Tableau 5. Caractéristiques physico-chimiques du sol d’El Turpial.

Variable	0-5 cm	5-10 cm	10-20 cm	20-40 cm
Perméabilité initiale (cm/j)	31.8	4.05	5.06	52.99
Densité apparente	1.34	1.57	1.56	1.36
Densité réelle	2.65	2.65	2.65	2.65
Conductivité saturation (cm/h)	19.34	0.20	0.24	32.84
Porosité totale	53.79	42.02	42.54	55.39
Porosité résiduelle	8.40	2.00	2.60	12.80
Macroporosité	17.27	6.50	6.31	22.69
PH	4.44	4.69	4.93	5.1
Teneur M.O	3.27	2.18	1.54	1.13
Teneur C	1.9	1.27	0.89	0.66
% sable	38.46	34.71	27.21	23.46
% limon	29.7	25.95	25.95	25.95
% argile	31.83	39.33	46.83	50.58
Texture	FA	FA	A	A

Estimation approximative de la distribution de la précipitation et de l’ETP

Pour le modèle qui nous intéresse les analyses de précipitation et d’évapotranspiration ont déjà été réalisées. Cette information est le résultat de l’application de la méthode d’interpolation en utilisant la fonction *spline* (Hutchinson, 1997) et qui fait partie des résultats du projet d’évaluation d’opportunités pour des cultures traditionnelles en Colombie utilisant les logiciels Anusplin et Anuclim (León, 1999), réalisés au CIAT et à l’Université Nationale de Colombie.

Un des objectifs du projet mentionné était l’obtention des surfaces climatiques moyennes mensuelles de précipitation, température maximale, température minimale, radiation et évaporation potentielle de tout le territoire colombien. Pour son obtention, on a utilisé des données climatiques de plus de 1000 stations météorologiques distribuées sur le territoire avec

des registres historiques de 10 et 15 ans. Ces surfaces ont été testées et validées en fonction des résultats statistiques obtenus après le processus d'interpolation et par comparaison avec d'autres sources d'information du CIAT.

Dans tous les cas, les résultats ont été représentés comme des grilles matricielles sous le logiciel ArcView avec une résolution au kilomètre carré et ils sont l'information de base pour l'outil appelé Climcrop (Leon, 2000) qui permet principalement la zonification de 120 cultures d'intérêt économique en Colombie en fonction du climat.

Pour le cadre de notre projet on a utilisé, à travers une consultation en ArcView 3.2, l'information moyenne mensuelle des surfaces de précipitation et d'évapotranspiration trouvée sur les coordonnées géographiques correspondants à la localisation d'El Turpial.

Le [tableau 6](#) présente les valeurs moyennes mensuelles obtenues pour El Turpial à partir des surfaces climatiques décrites :

Tableau 6. Valeurs de précipitation et d'évapotranspiration d'El Turpial.

Mois	Précipitation (mm)	Evapotranspiration (mm)
Janvier	24	178
Février	52	186
Mars	125	178
Avril	312	166
Mai	361	168
Juin	360	159
Juillet	334	164
Août	284	178
Septembre	266	182
Octobre	292	170
Novembre	160	179
Décembre	57	177

Déficits d'eau calculés pour chaque type de culture

Les tableaux suivants présentent l'estimation du bilan hydrique et déficit hydrique pour chaque culture choisie.

Rotation maïs – maïs

Bilan hydrique de la première année.

Culture	Mois	ETP	Pluie	Kc	ETM	RU	RDU	RH1	Drainage	ETR	RHf	Déficit
Jachère	1	178	24	0,4	71,2	150,8	90,48	29	0	22,82	30,17	60,3
Jachère	2	186	52	0,4	74,4	150,8	90,48	30,17	0	24,8	57,36	33,11
Jachère	3	178	125	0,4	71,2	150,8	90,48	57,36	31,56	45,13	105,66	0
Mais	4	166	312	0,6	99,6	150,8	90,48	105,66	266,86	99,6	51,2	39,28
Mais	5	168	361	0,6	100,8	150,8	90,48	51,2	261,4	57,03	93,76	0
Mais	6	159	360	0,6	95,4	150,8	90,48	93,76	302,96	95,4	55,4	35,08
Jachère	7	164	334	0,4	65,6	150,8	90,48	55,4	238,6	40,16	110,63	0
Mais	8	178	284	0,6	106,8	150,8	90,48	110,63	243,83	106,8	44	46,48
Mais	9	182	266	0,6	109,2	150,8	90,48	44	159,2	53,1	97,69	0
Mais	10	170	292	0,6	102	150,8	90,48	97,69	238,89	102	48,8	41,68
Jachère	11	179	160	0,4	71,6	150,8	90,48	48,8	58	38,61	112,18	0
Jachère	12	177	57	0,4	70,8	150,8	90,48	112,18	18,38	70,8	80	10,48

Rotation maïs – Pastèque

Bilan hydrique de la première année.

Culture	Mois	ETP	Pluie	Kc	ETM	RU	RDU	RH1	Drainage	ETR	RHf	Déficit
Jachère	1	178	24	0,4	71,2	150,8	90,48	29	0	22,82	30,17	60,3
Jachère	2	186	52	0,4	74,4	150,8	90,48	30,17	0	24,8	57,36	33,11
Jachère	3	178	125	0,4	71,2	150,8	90,48	57,36	31,56	45,13	105,66	0
Mais	4	166	312	0,6	99,6	150,8	90,48	105,66	266,86	99,6	51,2	39,28
Mais	5	168	361	0,6	100,8	150,8	90,48	51,2	261,4	57,03	93,76	0
Mais	6	159	360	0,6	95,4	150,8	90,48	93,76	302,96	95,4	55,4	35,08
Jachère	7	164	334	0,4	65,6	150,8	90,48	55,4	238,6	40,16	110,63	0
Pastèque	8	178	284	0,75	133,5	150,8	90,48	110,63	243,83	133,5	17,3	73,18
Pastèque	9	182	266	0,75	136,5	150,8	90,48	17,3	132,5	26,09	124,7	0
Pastèque	10	170	292	0,75	127,5	150,8	90,48	124,7	265,9	127,5	23,3	67,18
Jachère	11	179	160	0,4	71,6	150,8	90,48	23,3	32,5	18,43	132,36	0
Jachère	12	177	57	0,4	70,8	150,8	90,48	132,36	38,56	70,8	80	10,48

Rotation mais – Potiron

Bilan hydrique de la première année.

Culture	Mois	ETP	Pluie	Kc	ETM	RU	RDU	RH1	Drainage	ETR	RHf	Déficit
Jachère	1	178	24	0,4	71,2	150,8	90,48	29	0	22,82	30,17	60,3
Jachère	2	186	52	0,4	74,4	150,8	90,48	30,17	0	24,8	57,36	33,11
Jachère	3	178	125	0,4	71,2	150,8	90,48	57,36	31,56	45,13	105,66	0
Mais	4	166	312	0,6	99,6	150,8	90,48	105,66	266,86	99,6	51,2	39,28
Mais	5	168	361	0,6	100,8	150,8	90,48	51,2	261,4	57,03	93,76	0
Mais	6	159	360	0,6	95,4	150,8	90,48	93,76	302,96	95,4	55,4	35,08
Jachère	7	164	334	0,4	65,6	150,8	90,48	55,4	238,6	40,16	110,63	0
Potiron	8	178	284	0,8	142,4	150,8	90,48	110,63	243,83	142,4	8,4	82,08
Potiron	9	182	266	0,8	145,6	150,8	90,48	8,4	123,6	13,51	137,28	0
Potiron	10	170	292	0,8	136	150,8	90,48	137,28	278,48	136	14,8	75,68
Jachère	11	179	160	0,4	71,6	150,8	90,48	14,8	24	11,71	139,08	0
Jachère	12	177	57	0,4	70,8	150,8	90,48	139,08	45,28	70,8	80	10,48

Curossol

Bilan hydrique des deux premières années de production.

Culture	Mois	ETP	Pluie	Kc	ETM	RU	RDU	RH1	Drainage	ETR	RHf	Déficit
Jachère	1	178	24	0,4	71,2	150,8	90,48	29	0	22,82	30,17	60,3
Jachère	2	186	52	0,4	74,4	150,8	90,48	30,17	0	24,8	57,36	33,11
Jachère	3	178	125	0,4	71,2	150,8	90,48	57,36	31,56	45,13	105,66	0
Curossol1	4	166	312	0,35	58,1	150,8	90,48	105,66	266,86	58,1	92,7	0
Curossol1	5	168	361	0,35	58,8	150,8	90,48	92,7	302,9	58,8	92	0
Curossol1	6	159	360	0,35	55,65	150,8	90,48	92	301,2	55,65	95,15	0
Curossol1	7	164	334	0,35	57,4	150,8	90,48	95,15	278,35	57,4	93,4	0
Curossol1	8	178	284	0,35	62,3	150,8	90,48	93,4	226,6	62,3	88,5	1,98
Curossol1	9	182	266	0,35	63,7	150,8	90,48	88,5	203,7	62,3	88,49	1,98
Curossol1	10	170	292	0,35	59,5	150,8	90,48	88,49	229,69	58,19	92,6	0
Curossol1	11	179	160	0,35	62,65	150,8	90,48	92,6	101,8	62,65	88,15	2,33
Curossol1	12	177	57	0,35	61,95	150,8	90,48	88,15	0	60,35	84,79	5,68
Curossol1	13	178	24	0,35	62,3	150,8	90,48	84,79	0	58,38	50,4	40,07
Curossol1	14	186	52	0,35	65,1	150,8	90,48	50,4	0	36,26	66,13	24,34
Curossol1	15	178	125	0,35	62,3	150,8	90,48	66,13	40,33	45,53	105,26	0
Curossol2	16	166	312	0,4	66,4	150,8	90,48	105,26	266,46	66,4	84,4	6,08
Curossol2	17	168	361	0,4	67,2	150,8	90,48	84,4	294,6	62,68	88,11	2,36
Curossol2	18	159	360	0,4	63,6	150,8	90,48	88,11	297,31	61,93	88,86	1,61
Curossol2	19	164	334	0,4	65,6	150,8	90,48	88,86	272,06	64,42	86,37	4,1
Curossol2	20	178	284	0,4	71,2	150,8	90,48	86,37	219,57	67,96	82,83	7,64
Curossol2	21	182	266	0,4	72,8	150,8	90,48	82,83	198,03	66,64	84,15	6,32
Curossol2	22	170	292	0,4	68	150,8	90,48	84,15	225,35	63,24	87,55	2,92
Curossol2	23	179	160	0,4	71,6	150,8	90,48	87,55	96,75	69,28	81,51	8,96
Curossol2	24	177	57	0,4	70,8	150,8	90,48	81,51	0	63,78	74,72	15,75
Curossol2	25	178	24	0,4	71,2	150,8	90,48	74,72	0	58,79	39,92	50,55
Curossol2	26	186	52	0,4	74,4	150,8	90,48	39,92	0	32,82	59,09	31,38
Curossol2	27	178	125	0,4	71,2	150,8	90,48	59,09	33,29	46,49	104,3	0

Avocat

Bilan hydrique des deux premiers années de production

Culture	Mois	ETP	Pluie	Kc	ETM	RU	RDU	RH1	Drainage	ETR	RHf	Déficit
Jachère	1	178	24	0,4	71,2	150,8	90,48	29	0	22,82	30,17	60,3
Jachère	2	186	52	0,4	74,4	150,8	90,48	30,17	0	24,8	57,36	33,11
Jachère	3	178	125	0,4	71,2	150,8	90,48	57,36	31,56	45,13	105,66	0
Avocat1	4	166	312	0,5	83	150,8	90,48	105,66	266,86	83	67,8	22,68
Avocat1	5	168	361	0,5	84	150,8	90,48	67,8	278	62,94	87,85	2,62
Avocat1	6	159	360	0,5	79,5	150,8	90,48	87,85	297,05	77,18	73,61	16,86
Avocat1	7	164	334	0,5	82	150,8	90,48	73,61	256,81	66,71	84,08	6,39
Avocat1	8	178	284	0,5	89	150,8	90,48	84,08	217,28	82,7	68,09	22,38
Avocat1	9	182	266	0,5	91	150,8	90,48	68,09	183,29	68,48	82,31	8,16
Avocat1	10	170	292	0,5	85	150,8	90,48	82,31	223,51	77,32	73,47	17
Avocat1	11	179	160	0,5	89,5	150,8	90,48	73,47	82,67	72,67	78,12	12,35
Avocat1	12	177	57	0,5	88,5	150,8	90,48	78,12	0	76,41	58,7	31,77
Avocat1	13	178	24	0,5	89	150,8	90,48	58,7	0	57,73	24,96	65,51
Avocat1	14	186	52	0,5	93	150,8	90,48	24,96	0	25,65	51,3	39,17
Avocat1	15	178	125	0,5	89	150,8	90,48	51,3	25,5	50,46	100,33	0
Avocat2	16	166	312	0,55	91,3	150,8	90,48	100,33	261,53	91,3	59,5	30,98
Avocat2	17	168	361	0,55	92,4	150,8	90,48	59,5	269,7	60,76	90,03	0,44
Avocat2	18	159	360	0,55	87,45	150,8	90,48	90,03	299,23	87,01	63,78	26,69
Avocat2	19	164	334	0,55	90,2	150,8	90,48	63,78	246,98	63,58	87,21	3,26
Avocat2	20	178	284	0,55	97,9	150,8	90,48	87,21	220,41	94,36	56,43	34,04
Avocat2	21	182	266	0,55	100,1	150,8	90,48	56,43	171,63	62,42	88,37	2,1
Avocat2	22	170	292	0,55	93,5	150,8	90,48	88,37	229,57	91,31	59,48	30,99
Avocat2	23	179	160	0,55	98,45	150,8	90,48	59,48	68,68	64,71	86,08	4,39
Avocat2	24	177	57	0,55	97,35	150,8	90,48	86,08	0	92,61	50,46	40,01
Avocat2	25	178	24	0,55	97,9	150,8	90,48	50,46	0	54,59	19,86	70,61
Avocat2	26	186	52	0,55	102,3	150,8	90,48	19,86	0	22,45	49,4	41,07
Avocat2	27	178	125	0,55	97,9	150,8	90,48	49,4	23,6	53,45	97,34	0

Manioc

Bilan hydrique de la première année.

Culture	Mois	ETP	Pluie	Kc	ETM	RU	RDU	RH1	Drainage	ETR	RHf	Déficit
Jachère	1	178	24	0,4	71,2	150,8	90,48	29	0	22,82	30,17	60,3
Jachère	2	186	52	0,4	74,4	150,8	90,48	30,17	0	24,8	57,36	33,11
Jachère	3	178	125	0,4	71,2	150,8	90,48	57,36	31,56	45,13	105,66	0
Manioc	4	166	312	0,5	83	150,8	90,48	105,66	266,86	83	67,8	22,68
Manioc	5	168	361	0,5	84	150,8	90,48	67,8	278	62,94	87,85	2,62
Manioc	6	159	360	0,5	79,5	150,8	90,48	87,85	297,05	77,18	73,61	16,86
Manioc	7	164	334	0,5	82	150,8	90,48	73,61	256,81	66,71	84,08	6,39
Manioc	8	178	284	0,5	89	150,8	90,48	84,08	217,28	82,7	68,09	22,38
Manioc	9	182	266	0,5	91	150,8	90,48	68,09	183,29	68,48	82,31	8,16
Manioc	10	170	292	0,5	85	150,8	90,48	82,31	223,51	77,32	73,47	17
Manioc	11	179	160	0,5	89,5	150,8	90,48	73,47	82,67	72,67	78,12	12,35
Manioc	12	177	57	0,5	88,5	150,8	90,48	78,12	0	76,41	58,7	31,77
Manioc	13	178	24	0,5	89	150,8	90,48	58,7	0	57,73	24,96	65,51

Banane plantain

Bilan hydrique des deux premières années de production

Culture	Mois	ETP	Pluie	Kc	ETM	RU	RDU	RH1	Drainage	ETR	RHf	Déficit
Jachère	1	178	24	0,4	71,2	150,8	90,48	29	0	22,82	30,17	60,3
Jachère	2	186	52	0,4	74,4	150,8	90,48	30,17	0	24,8	57,36	33,11
Jachère	3	178	125	0,4	71,2	150,8	90,48	57,36	31,56	45,13	105,66	0
Plantain1	4	166	312	0,7	116,2	150,8	90,48	105,66	266,86	116,2	34,6	55,88
Plantain1	5	168	361	0,7	117,6	150,8	90,48	34,6	244,8	44,97	105,82	0
Plantain1	6	159	360	0,7	111,3	150,8	90,48	105,82	315,02	111,3	39,5	50,98
Plantain1	7	164	334	0,7	114,8	150,8	90,48	39,5	222,7	50,11	100,68	0
Plantain1	8	178	284	0,7	124,6	150,8	90,48	100,68	233,88	124,6	26,2	64,28
Plantain1	9	182	266	0,7	127,4	150,8	90,48	26,2	141,4	36,89	113,9	0
Plantain1	10	170	292	0,7	119	150,8	90,48	113,9	255,1	119	31,8	58,68
Plantain1	11	179	160	0,7	125,3	150,8	90,48	31,8	41	44,03	106,76	0
Plantain1	12	177	57	0,7	123,9	150,8	90,48	106,76	12,96	123,9	26,9	63,58
Plantain1	13	178	24	0,7	124,6	150,8	90,48	26,9	0	37,04	13,85	76,62
Plantain1	14	186	52	0,7	130,2	150,8	90,48	13,85	0	19,93	45,91	44,56
Plantain1	15	178	125	0,7	124,6	150,8	90,48	45,91	20,11	63,22	87,57	2,9
Plantain2	16	166	312	1,1	182,6	150,8	90,48	87,57	248,77	176,72	0	90,48
Plantain2	17	168	361	1,1	184,8	150,8	90,48	0	210,2	0	150,8	0
Plantain2	18	159	360	1,1	174,9	150,8	90,48	150,8	360	174,9	0	90,48
Plantain2	19	164	334	1,1	180,4	150,8	90,48	0	183,2	0	150,8	0
Plantain2	20	178	284	1,1	195,8	150,8	90,48	150,8	284	195,8	0	90,48
Plantain2	21	182	266	1,1	200,2	150,8	90,48	0	115,2	0	150,8	0
Plantain2	22	170	292	1,1	187	150,8	90,48	150,8	292	187	0	90,48
Plantain2	23	179	160	1,1	196,9	150,8	90,48	0	9,2	0	150,8	0
Plantain2	24	177	57	1,1	194,7	150,8	90,48	150,8	57	194,7	0	90,48
Plantain2	25	178	24	1,1	195,8	150,8	90,48	0	0	0	24	66,48
Plantain2	26	186	52	1,1	204,6	150,8	90,48	24	0	54,27	21,72	68,75
Plantain2	27	178	125	1,1	195,8	150,8	90,48	21,72	0	47	99,71	0

4.4.2. Calcul du rendement des cultures

Les tableaux suivants présentent l'estimation des rendements des cultures choisies à partir des résultats obtenus pour le bilan hydrique. Les valeurs synthétisées des rendements optimaux sont présentées dans l' [annexe A](#).

Rotation maïs – maïs

Rendements semestriels pendant 5 ans.

Culture	Semestre	YM	YA	ETM	ETA	Ky
Maïs	1	3500	2067,66	512,6	344,78	1,25
Maïs	2	3500	2547,39	526	411,47	1,25
Maïs	3	3500	2499,45	512,6	395,37	1,25
Maïs	4	3500	2547,39	526	411,47	1,25
Maïs	5	3500	2499,45	512,6	395,37	1,25
Maïs	6	3500	2547,39	526	411,47	1,25
Maïs	7	3500	2499,45	512,6	395,37	1,25
Maïs	8	3500	2547,39	526	411,47	1,25
Maïs	9	3500	2499,45	512,6	395,37	1,25
Maïs	10	3500	2479,68	561,8	430,78	1,25

Rotation maïs – Pastèque

Rendements semestriels pendant 5 ans.

Culture	Semestre	YM	YA	ETM	ETA	Ky
Maïs	1	3500	2067,66	512,6	344,78	1,25
Pastèque	2	20000	13132,22	605,5	416,48	1,1
Maïs	3	3500	2499,45	512,6	395,37	1,25
Pastèque	4	20000	13132,22	605,5	416,48	1,1
Maïs	5	3500	2499,45	512,6	395,37	1,25
Pastèque	6	20000	13132,22	605,5	416,48	1,1
Maïs	7	3500	2499,45	512,6	395,37	1,25
Pastèque	8	20000	13132,22	605,5	416,48	1,1
Maïs	9	3500	2499,45	512,6	395,37	1,25
Pastèque	10	20000	12244,76	668,15	432,62	1,1

Rotation maïs – Potiron

Rendements semestriels pendant 5 ans.

Culture	Semestre	YM	YA	ETM	ETA	Ky
Maïs	1	3500	2067,66	512,6	344,78	1,25
Potiron	2	20000	11743,54	632	414,58	1,2
Maïs	3	3500	2499,45	512,6	395,37	1,25
Potiron	4	20000	11743,54	632	414,58	1,2
Maïs	5	3500	2499,45	512,6	395,37	1,25
Potiron	6	20000	11743,54	632	414,58	1,2
Maïs	7	3500	2499,45	512,6	395,37	1,25
Potiron	8	20000	11743,54	632	414,58	1,2
Maïs	9	3500	2499,45	512,6	395,37	1,25
Potiron	10	20000	10540,87	703,6	426,29	1,2

Curossol

Rendements semestriels pendant 5 ans.

Culture	Semestre	YM	YA	ETM	ETA	Ky
Curossol1	1	0	0	389,35	265,3	1,1
Curossol2	3	0	0	386,9	331,18	1,1
Curossol3	5	2000	1548,89	414	329,11	1,1
Curossol4	7	4000	3030,53	463,3	361,22	1,1
Curossol5	9	6000	3752,61	616,1	406,31	1,1

Avocat

Rendements semestriels pendant 5 ans.

Culture	Semestre	YM	YA	ETM	ETA	Ky
Avocat1	1	0	0	463,3	315,87	1,2
Avocat2	3	0	0	542,15	372,91	1,2
Avocat3	5	2400	1352,2	618,55	393,51	1,2
Avocat4	7	4800	2361,49	672,75	387,94	1,2
Avocat5	9	6400	3148,65	672,75	387,94	1,2

Manioc

Rendements semestriels pendant 5 ans.

Culture	Semestre	YM	YA	ETM	ETA	Ky
Manioc	1	18000	11126,5	463,3	315,87	1,2
Manioc	3	18000	11924,07	481,1	345,77	1,2
Manioc	5	18000	11924,07	481,1	345,77	1,2
Manioc	7	18000	11924,07	481,1	345,77	1,2
Manioc	9	18000	11924,07	481,1	345,77	1,2

Banane plantain

Rendements semestriels pendant 5 ans.

Culture	Semestre	YM	YA	ETM	ETA	Ky
Plantain1	1	12000	6539,58	561,9	365,22	1,3
Plantain2	3	15000	5481,87	921,7	471,81	1,3
Plantain3	5	15000	3357,72	1138,5	458,77	1,3
Plantain1	7	12000	2593,92	941,3	373,74	1,3
Plantain2	9	15000	5481,87	921,7	471,81	1,3

4.4.3. L'investissement, les bénéfices et les coûts

On a considéré initialement un investissement unique qui corresponde au système d'irrigation. Puisque les estimations sont faites pour une période de 5 ans, on n'a pas considéré une valeur de sauvetage pour le système à la fin de la période. En théorie, la plus part du temps, à la fin le système est tellement détérioré que sa vente ne représente pas une grande aide pour la communauté.

Il faut dire que l'argent utilisé pour les cultures, sa main d'œuvre, son entretien et toutes les activités pour avoir une production ne sont pas considérés dans le cadre de ce projet comme un investissement mais comme un coût qui est pris en compte à la fin de chaque semestre.

En effet, on a considéré deux types de coûts différents : les coûts correspondant à la mise en œuvre et à l'entretien des cultures et le coût total de l'eau.

Les coûts suivants sont considérés comme des coûts de production : les engrais et produits phytosanitaires, l'emballage, les machines, la main d'œuvre, les équipements et le matériel végétal, l'administration, l'assistance technique, les imprévus et la location.

Par contre, pour le coût total de l'eau, on inclut tous les coûts qu'impliquent les différentes opérations pour mettre l'eau à la disposition des plantes comme la mobilisation de la ressource, transport de l'eau jusqu'aux parcelles, mise en pression et distribution aux plantes et le coût de l'eau naturelle.

Pour notre cas la mobilisation, le transport et la mise en pression, peuvent être payés à travers une tarification de l'eau, mais la distribution aux plantes est payée individuellement pour chaque irrigateur et elle doit s'additionner aux coûts fixés de la parcelle ([Morardet et al](#)).

Le coût naturel de la ressource va varier en fonction des lois ou des dispositions administratives établies soit par le gouvernement soit par les corporations autonomes régionales. Un exemple de ce type de gestion correspond à la Loi 373 du 6 juin de 1997, par

laquelle le Congrès National de République de la Colombie établit le programme pour l'utilisation efficace et l'économie de l'eau.

Pour l'évaluation économique dans le cadre de ce projet on a fixé ces coûts selon ceux montrés dans l'[annexe B](#).

Enfin, les bénéfices des cas simulés sont fonction des prix d'achat et vente de la production sur le marché. Selon les registres historiques des marchés en Colombie, faits par la Corporación Colombia Internacional (CCI, 2002), on a pu définir deux types de prix différents pour chacune des cultures prises en compte. Le premier correspond au moment où la demande du produit sur le marché est élevée (bons prix) et le deuxième correspond au moment où la demande est faible (mauvais prix).

4.4.4. Calcul de la marge à partir des résultats des deux étapes précédentes

Estimation des prix de vente des produits

Les prix de vente considérés pour les différents produits ont été extraits du Systeme d'Information de Prix du Secteur Agricole (SIPSA) qui est géré par la Corporation Colombie International (CCI). (CCI,2002)

Le SIPSA a été désigné pour la systématisation, l'unification et la consolidation de la collecte, classification, administration, analyse et diffusion continue de l'information des prix des produits agricoles qui sont présentés dans les grands marchés en Colombie. L'information du SIPSA est divulguée dans plusieurs journaux de circulation nationale et régionale et appuyée par des commentaires à la télévision et à la radio.

Après une analyse de la fluctuation mensuelle des prix des années 2000, 2001 et 2002, on a trouvé pour les différents produits considérés les valeurs maximales et minimales présentées dans l'[annexe C](#).

Estimation des coûts de production

Les coûts de production pour chacune des cultures ont été pris sur la base de données Cufrucol (Fajardo, 2001). A travers cette base de données il est possible de connaître, entre autre, les variables telles que les coûts de production, les caractéristiques et les besoins biophysiques de plus de 120 cultures d'intérêt économique en Colombie.

L'[annexe D](#) présente les coûts de production obtenus de Cufrucol pour les cultures choisies.

Estimation de la VPN pour les systèmes cultures choisies

En fonction des coûts de production, des prix de vente et des rendements calculés on a utilisé une feuille de calcul pour l'estimation de la VPN de chaque système de culture. Le [tableau 7](#) présente les résultats de cette estimation :

Tableau 7. Estimation de la VPN pour les cultures proposées.

Système de culture	Bon prix Rendement max	Mauvais prix Rendement max	Bon prix Rendement calculé	Mauvais prix Rendement calculé
Mais – mais	11656847	2564946	7674058	1120096
Mais – pastèque	66898768	19058051	42129295	10456143
Mais – potiron	57501771	11392844	27959050	309540
Manioc	53131636	6373288	34119502	3144694
Curossol	13755266	-8584832	6069043	-9438709
Avocat	11036350	6455417	2785068	474055
Banane plantain	35501897	15665966	6784417	42788

Prix donnés en pesos colombiens (US\$ 1 = 2500 pesos).

4.5. Recherche de la solution optimale pour chacun des scénarios

Le [tableau 8](#) présente les résultats globaux obtenus du processus d'optimisation en utilisant le logiciel LINGO 7.0 pour l'application de la programmation linéaire. Les résultats détaillés et la codification du modèle sont présentés dans l'[annexe E](#).

Tableau 8. Résultats du processus d'optimisation.

Variables	scénario 1	scénario 2	scénario 3	Scénario 4
Fonction objectif	1,22E+09	2,70E+08	1,18E+09	2,58E+08
Surface rotation maïs	0	0	0	0
Surface rotation maïs irrigué	0	0	0	0
Surface rotation pastèque	9	9	13	13
Surface rotation pastèque irriguée	8	8	4	4
Surface rotation potiron	0	0	0	0
Surface rotation potiron irrigué	0	0	0	0
Surface curossol	0	ne s'applique pas	0	ne s'applique pas
Surface curossol irrigué	0	ne s'applique pas	0	ne s'applique pas
Surface avocat	0	0	0	0
Surface avocat irrigué	0	0	0	0
Surface manioc	8	8	8	8
Surface plantain	5	5	5	5
eau disponible	124	124	0	0
Travail disponible	0	0	79,42	79,42

4.6. Définition des stratégies à considérer

A partir des résultats obtenus du modèle optimal on a commencé à définir les stratégies en fonction de 3 groupes principaux :

- **Groupe 1** : Stratégies des solutions optimales dans l'un ou l'autre des scénarios.

Ce groupe sera composé des résultats de la solution optimale sur chaque scénario. C'est-à-dire que les résultats optimaux pour les scénarios 1, 2, 3 et 4 seront considérés comme les premières quatre stratégies du modèle. Par exemple, la première stratégie correspond au calcul de la rentabilité sur 5 ans de 9 Ha de pastèque non-irriguée, 8 Ha de pastèque irriguée, 8 Ha de manioc et 5 Ha de plantain ; ceci correspond au résultat optimal du premier scénario.

Or, comme les surfaces pour les scénarios 1 et 2 et les scénarios 3 et 4 sont les mêmes, le groupe est simplifié uniquement à deux stratégies :

- **Stratégie 1** : Considérer 9 Ha de maïs - pastèque non-irriguée, 8 Ha de maïs - pastèque irriguée, 8 Ha de manioc et 5 Ha de plantain.
- **Stratégie 2** : Considérer 13 Ha de maïs - pastèque non-irriguée, 4 Ha de maïs - pastèque irriguée, 8 Ha de manioc et 5 Ha de plantain.

- **Groupe 2** : Non-irrigation.

Dans ce groupe on va considérer qu'aucune des cultures n'est irriguée. Pour la définition des stratégies de ce groupe un nouveau processus d'optimisation doit être lancé, mais cette fois il faut enlever du modèle les rotations et les autres cultures qui seront normalement irriguées (curossol irrigué, avocat irrigué, mais-pastèque irriguée, etc). Le [tableau 9](#) présente le résultat de cette simulation :

Tableau 9. Résultats du processus d'optimisation sans irrigation.

Variables	scénario 1	scénario 2	Scénario 3	scénario 4
Function objectif	0.1023E+10	0.2031E+09	0.1023E+10	0.2031E+09
Surface rotation mais	0	0	0	0
Surface rotation mais irrigue	ne s'applique pas	ne s'applique pas	ne s'applique pas	ne s'applique pas
Surface rotation pastèque	17	17	17	17
Surface rotation pastèque irriguee	ne s'applique pas	ne s'applique pas	ne s'applique pas	ne s'applique pas
Surface rotation potiron	0	0	0	0
Surface rotation potiron irrigue	ne s'applique pas	ne s'applique pas	ne s'applique pas	ne s'applique pas
Surface rotation curossol	0	ne s'applique pas	0	ne s'applique pas
Surface rotation curossol irrigue	ne s'applique pas	ne s'applique pas	0	ne s'applique pas
Surface avocat	0	0	0	0
Surface avocat irrigue	ne s'applique pas	ne s'applique pas	ne s'applique pas	ne s'applique pas
Surface manioc	8	8	8	8
Surface plantain	5	5	5	5
eau disponible	17300	17300	17300	17300
Travail disponible	160	160	160	160

Comme dans le premier groupe, l'idée est aussi de former quatre nouvelles stratégies à partir des résultats optimaux pour chaque scénario. Mais le tableau montre que pour ce groupe seulement une stratégie peut être considérée :

- **Stratégie 3:** Considérer 17 Ha de mais - pastèque non-irriguée, 8 Ha de manioc et 5 Ha de plantain.

- **Groupe 3** : Irrigation sans la rotation mais - pastèque.

On n'a pas encore analysé les résultats obtenus de l'optimisation, mais sur ce point il est clair que la rotation mais – pastèque irriguée et non irriguée présente la solution la plus rentable dans tous les cas considérés, même pour les scénarios les plus pessimistes. En fonction à

cette réponse on s'est demandé : Que serait la solution optimale si la rotation mais – pastèque irriguée et non irriguée est enlevée du modèle pour des raisons environnementales ?

Cette question a permis de considérer un troisième groupe de stratégies. Encore une fois un nouveau processus d'optimisation est lancé sans considérer la rotation mentionnée comme partie de la solution. Le [tableau 10](#) montre les résultats obtenus.

Tableau 10. Résultats du processus d'optimisation sans mais - pastèque.

Variables	scénario 1	Scénario 2	Scénario 3	scénario 4
Function objectif	0.1019E+10	0.1507E+09	0.9449E+09	0.1021E+09
Surface rotation mais	0	0	0	0
Surface rotation mais irrigue	0	0	0	0
Surface rotation pastèque	ne s'applique pas	ne s'applique pas	ne s'applique pas	ne s'applique pas
Surface rotation pastèque irriguee	ne s'applique pas	ne s'applique pas	ne s'applique pas	ne s'applique pas
Surface rotation potiron	8	0	4.7	4
Surface rotation potiron irrigue	9	11	3.8	0
Surface rotation curossol	0	ne s'applique pas	0	ne s'applique pas
Surface rotation curossol irrigue	0	ne s'applique pas	0	ne s'applique pas
Surface avocat	0	0	0	0
Surface avocat irrigue	0	0	0	0
Surface manioc	8	8	16.5	19
Surface plantain	5	5	5	5
Travail disponible	0	0	0	0
Surface disponible	0	6	0	2

Cette fois, les résultats sont différents pour chacun des scénarios, ce qui permet de formuler les quatre dernières stratégies :

- **Stratégie 4** : Considérer 8 Ha de mais - potiron non-irrigué, 9 Ha de mais - potiron irrigué, 8 Ha de manioc et 5 Ha de plantain.
- **Stratégie 5** : Considérer 11 Ha mais - potiron irrigué, 8 Ha de manioc et 5 Ha de plantain.
- **Stratégie 6** : Considérer 4,7 Ha de mais - potiron non-irrigué, 3,8 Ha de mais - potiron irrigué, 16,5 Ha de manioc et 5 Ha de plantain.
- **Stratégie 7** : Considérer 4 Ha mais - potiron non irrigué, 19 Ha de manioc et 5 Ha de plantain

4.7. Evaluation économique pour chacun des cas correspondant à toutes les combinaisons de stratégies et de scénarios

En synthèse, la matrice de scénarios et stratégies (tableau 4), pour l'application du modèle dans le cas d'El Turpial, a été constituée pour un ensemble de 4 scénarios et 7 stratégies. Le tableau 11 montre la matrice avec l'évaluation économique pour les cas correspondants, et avec la solution optimale trouvée pour chaque groupe :

Tableau 11. Matrice de l'évaluation économique pour les stratégies proposées

Stratégies	scénario 1	scénario 2	scénario 3	scénario 4
Groupe 1	0.1221E+10	0.2719E+09	0.1123E+10	0.2378E+09
Stratégie 1	0.1221E+10	0.2719E+09	1.11E+09	2.27E+08
Stratégie 2	0.1122E+10	0.2375E+09	0.1123E+10	0.2378E+09
Groupe 2	0.1023E+10	0.2031E+09	0.1023E+10	0.2031E+09
Stratégie 3	0.1023E+10	0.2031E+09	0.1023E+10	0.2031E+09
Groupe 3	0.1019E+10	0.1507E+09	0.9449E+09	0.1021E+09
Stratégie 4	0.1019E+10	1.3E+08	8.90E+08	6.45E+07
Stratégie 5	0.9393E+09	0.1507E+09	7.18E+08	5.85E+07
Stratégie 6	0.9448E+09	0.9589E+08	0.9449E+09	0.9589E+08
Stratégie 7	0.7940E+09	0.6120E+08	0.7940E+09	0.6120E+08

4.8. Application du critère de Savage,

L'application du critère de Savage a permis l'obtention des regrets maximaux pour chacune des stratégies proposées. Le tableau 12 montre les résultats :

Tableau 12. Regrets maximaux.

Stratégies	Scénario 1	scénario 2	scénario 3	scénario 4	Regret maximum
Groupe 1	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
Stratégie 1	0.00E+00	0.00E+00	1.11E+07	1.05E+07	1.11E+07
Stratégie 2	9.90E+07	3.44E+07	0.00E+00	0.00E+00	9.90E+07
Groupe 2	1.98E+08	6.88E+07	1.00E+08	3.47E+07	1.98E+08
Stratégie 3	1.98E+08	6.88E+07	1.00E+08	3.47E+07	1.98E+08
Groupe 3	2.02E+08	1.21E+08	1.78E+08	1.36E+08	2.02E+08
Stratégie 4	2.02E+08	1.42E+08	2.33E+08	1.73E+08	2.33E+08
Stratégie 5	2.82E+08	1.21E+08	4.05E+08	1.79E+08	4.05E+08
Stratégie 6	2.76E+08	1.76E+08	1.78E+08	1.42E+08	2.76E+08
Stratégie 7	4.27E+08	2.11E+08	3.29E+08	1.77E+08	4.27E+08

5. Chapitre 5 : Interprétation des résultats de la simulation

5.1. Analyse de la solution optimale et ses stratégies

5.1.1. Scénario 1, optimiste, bons prix et bonne disponibilité en eau d'irrigation

Comme on a vu, la stratégie optimale obtenue pour ce scénario permettra l'exploitation de 4 cultures différentes : 9 Ha de la rotation maïs - pastèque non irriguée, 8 Ha de la rotation maïs - pastèque irriguée, 8 Ha de manioc et 5 Ha de banane plantain. C'est-à-dire que toute la surface disponible (30 Ha) peut être exploitée et seulement 8 Ha seront irrigués, mais cette stratégie n'utilise pas la totalité de l'eau disponible. Le facteur qui limite l'irrigation d'une plus grande surface de la rotation maïs-pastèque est la disponibilité de la main d'œuvre.

Il faut remarquer que pour ce scénario et aussi pour tous les autres, les cultures d'avocat, de curossol et la rotation maïs – maïs ne font jamais partie d'une solution optimale.

Les prix duaux de la stratégie 1 ([annexe E-1](#)), qui est optimale pour le scénario 1, montrent deux aspects importants : Elle peut être plus rentable encore si les surfaces dénommées d'anti-risque (manioc et banane plantain) sont réduites (ou si la surface totale est plus importante) et/ou si la disponibilité de la marge de travail augmente. En effet, pour chaque hectare de manioc ou de banane plantain qu'on arrête d'exploiter, la solution objective va augmenter de $2.03 \cdot 10^7$ et $6 \cdot 10^7$ pesos respectivement puisqu'on pourra y cultiver la rotation maïs-pastèque; pour chaque hectare additionnel à la surface totale la solution augmentera de $2.98 \cdot 10^7$ pesos et chaque jour de travail additionnel va rapporter $1.22 \cdot 10^6$ pesos à la fonction « objectif ».

Les coûts réduits de chaque stratégie sur ce scénario montrent que les autres cultures, à l'exception de la rotation maïs - potiron non-irriguée, sont très loin d'être dans la solution optimale. Par exemple la VPN de la rotation maïs - maïs (irriguée et non-irriguée) doit être augmentée en moyenne 4.5 fois pour considérer au moins un hectare de cette rotation dans la

solution et celle du curossol (irrigué et non-irrigué) presque 9 fois pour avoir le même effet, l'avocat non irrigué plus de 15 fois, les autres résultats sont présentés dans l'[annexe E-1](#).

En comparant les stratégies 1 et 2 (correspondant au groupe 1), il est logique que la première, qui pour ce scénario est justement optimale, soit plus rentable que la deuxième. Cependant on verra que cette différence n'est pas aussi élevée qu'elle ne l'est pour le scénario 2.

Avec ces résultats on peut constater que le fait d'avoir une production anti-risque aussi importante (13 Ha) limite la rentabilité de la production ; cependant, ces produits sont souvent consommés sur place et il serait très risqué de sacrifier la diversité agricole et la sécurité alimentaire pour augmenter la rentabilité.

5.1.2. Scénario 2 : bons prix et bonne disponibilité en eau d'irrigation

Une remarque très important à faire est que le système de culture du curossol irrigué et non irrigué n'a pas été considéré comme une solution rentable avant même de lancer la simulation pour ce scénario à cause des valeurs négatives obtenues pendant l'estimation de la VPN pour des mauvais prix.

Sur les résultats de l'optimisation pour ce scénario, on voit que la distribution de la surface est la même que dans le scénario précédent. Les prix duaux montrent que pour chaque hectare de manioc et de banane plantain qu'on laisse d'exploiter la solution objective va augmenter en $1.16 \cdot 10^7$ pesos et $1.90 \cdot 10^7$ pesos respectivement. Pour chaque hectare additionnel à la surface totale la solution augmentera $6.15 \cdot 10^6$ pesos et chaque jour de travail additionnel par année va apporter $4.30 \cdot 10^5$ pesos (sur 5 ans) à la fonction objectif.

Les coûts réduits montrent que les systèmes de maïs - maïs non-irrigués et maïs - potiron irrigués ne sont pas très loin d'être dans la solution optimale.

En comparant ces stratégies on trouve encore que la stratégie 1 est plus rentable que la deuxième, mais cette fois la différence entre les deux est très importante par rapport au premier scénario.

5.1.3. Scénario 3 : bons prix et disponibilité en eau limitée

Pour ce cas on trouve que, comme dans les scénarios 1 et 2, la totalité de la surface peut être exploitée mais de façon différente: 13 Ha de rotation maïs - pastèque, 4 Ha de rotation maïs - pastèque irriguée, 8 Ha de manioc et 5 Ha de banane plantain. La totalité de l'eau d'irrigation disponible (en ce cas $1730 \text{ m}^3/\text{an}$) est utilisée. Ceci amène à ce que la disponibilité de la ressource en eau devienne un facteur restrictif en ensemble avec les cultures de manioc, banane plantain et la surface totale disponible. Chaque hectare de manioc ou de banane plantain non exploité va incrémenter la rentabilité en $8 \cdot 10^6$ et $3.53 \cdot 10^7$ pesos respectivement. Pour chaque hectare additionnel de surface la solution augmentera $4.21 \cdot 10^7$ pesos et $7.9 \cdot 10^3$ pour chaque mètre cube d'eau de plus. La main d'œuvre n'est plus un facteur restrictif.

Dans ce cas, la stratégie 2 devient plus rentable que la première. Ceci représente clairement l'effet d'une faible disponibilité en eau d'irrigation. A partir des résultats on peut déduire qu'avec une disponibilité de la ressource limitée il est possible d'irriguer un maximum de 4 Ha, cependant la stratégie 1 propose d'irriguer 8 Ha. L'idéal serait d'interpréter cet effet en disant que les 8 Ha seront irrigués mais il manquera de la ressource pendant la période d'irrigation. Ceci nous conduit à l'estimation d'un nouveau bilan hydrique pour calculer les rendements avec la quantité d'eau ajoutée mais qui est insuffisante pour avoir un rendement maximal. Cependant, pour simplifier les calculs, on a décidé d'interpréter cet effet en disant que sur 8 Ha, seulement quatre seront irrigués et les restants ne le seront pas, mais ces deniers vont inclure le coût de l'investissement. Une situation de ce type n'est pas très loin de la réalité, les agriculteurs peuvent faire un investissement pour les 8 Ha, éventuellement prévoir que la ressource sera limitée et assurer la production maximale sur 4 Ha en laissant les autres sans irrigation et avoir pour ceux-ci les rendements « normaux ».

En fonction des coûts réduits on voit que la totalité d'autres cultures sont très loin d'être dans la solution optimale.

5.1.4. Scénario 4, pessimiste : prix faibles et disponibilité en eau limitée

Ce scénario présente les valeurs de rentabilité les plus faibles de toute la solution. De la même façon que pour le scénario 2, la culture de curossol n'a pas été prise en compte pour la simulation à cause des valeurs négatives après l'estimation de la VPN.

Comme dans tous les autres cas, la totalité de la surface est utilisée et la distribution est la même que celle trouvée pour le scénario 3. Les prix duaux de cette solution montrent encore une fois que les surfaces de manioc et de banane plantain sont restrictives ($7.3 \cdot 10^6$ et $1.04 \cdot 10^7$ pesos respectivement pour chaque hectare) avec la surface totale ($1.04 \cdot 10^7$ pesos pour chaque hectare) et la disponibilité en eau d'irrigation ($4 \cdot 10^3$ pesos pour chaque m^3).

Pour ce cas aussi la stratégie 2 devient plus rentable que la première. On a pris la même distribution de la ressource en eau sur les 8 Ha de la rotation mais-pastèque que dans le scénario 3.

Les coûts réduits montrent que la rotation mais – mais, mais - potiron irrigué, et pour la première fois l'avocat ne sont pas très loin d'être considérés dans la solution optimale.

5.2. La solution optimale selon le critère de Savage.

Le [tableau 13](#) montre que la solution optimale selon le critère de Savage, c'est-à-dire celle qui présente la plus faible valeur du regret maximal, correspond à la première stratégie qui entraîne un regret maximum de $1,11 \cdot 10^7$ pesos. On rappelle que cette stratégie, analysée en détail en [5.1.1](#), et qui présente la rentabilité la plus importante sur le scénario 1 propose : 9 Ha de la rotation mais - pastèque non irrigué, 8 Ha de la rotation mais - pastèque irriguée, 8 Ha de manioc et 5 Ha de banane plantain.

La stratégie suivante en importance, qui se trouve très loin de la plus favorable (selon Savage), correspond à la deuxième stratégie. Comme on le voit, les solutions les plus favorables sont les stratégies dérivées de la solution optimale (groupe 1), ce qui est tout à fait normal.

La stratégie 3, qui considère la non-irrigation comme une éventuelle condition, correspond à la troisième alternative plus favorable. Néanmoins, on trouve que cette solution propose l'exploitation de 17 Ha de la rotation maïs – pastèque, et avec cette alternative une question se pose : Les agriculteurs sont-ils prêts à maintenir une quantité aussi grande de cette culture ? Avec la rentabilité trouvée pour cette rotation, il est peut-être plus intéressant pour les agriculteurs de former une exploitation technique et très organisée avec cette rotation comme on discutera dans le chapitre suivant.

En supposant qu'une exploitation de la pastèque ne corresponde pas du tout à l'intérêt des agriculteurs, on peut analyser les alternatives proposées par les dernières stratégies. Ici, c'est la rotation maïs – potiron (pour les stratégies 4 et 5) et le manioc (pour les stratégies 6 et 7) qui se trouvent très loin de la solution optimale, elles deviennent comme possibles solutions viables du modèle ; et ce sont les stratégies 4 et 6 qui présentent les plus faibles regrets maximaux, respectivement.

6. Discussion

6.1. L'application de la méthodologie pour le cas d'El Turpial.

Après l'application pratique pour le cas d'El Turpial on doit remarquer que les résultats obtenus sont fonction de différentes stratégies proposées comme exemples de simulation et qui éventuellement pourraient intéresser au centre de décision grâce à leur proximité de la solution optimale, mais il est important de mettre en œuvre des nouvelles stratégies proposées par les acteurs pour une meilleure exploitation de la méthodologie développée.

En effet, le principal objectif de la méthodologie consiste à trouver la solution la plus robuste entre un ensemble de possibles solutions. Dans le cadre de ce projet cet ensemble de solutions est initialement trouvé à travers d'une analyse économique de différentes stratégies sous différents scénarios. L'obtention d'une solution optimale est uniquement un point de départ pour la proposition de différentes stratégies qui peuvent être considérées dans le modèle et qui doivent montrer leur robustesse, dans ce cas en appliquant le critère de Savage, pour les considérer comme des solutions favorables. Mais ce qui a manqué dans ce projet est d'une part la retro alimentation du modèle en considérant les opinions du centre de décision, cependant, on croit que si la méthodologie a bien marché avec des stratégies possiblement intéressantes, il est probable qu'elle marche aussi bien avec de nouvelles stratégies ou scénarios proposés par les acteurs ; et d'autre part la validation des solutions pour les considérer comme solutions robustes.

Vallin et Vanderpooten (2002), ont montré que le critère de Savage est viable pour trouver une solution optimale en fonction d'un critère unique, mais est-il aussi viable pour trouver une solution robuste ?. La question est encore posée. Dans notre cas cette hypothèse n'a pas pu être testée, il manque une dernière preuve pour tester cette hypothèse qui corresponde définir la vraie « position » de l'alternative choisie par rapport à l'optimale.

6.2. Quelles améliorations pourraient souhaiter les utilisateurs (Limites de la méthodologie) et avenir possible de perfectionnement

Le fait d'avoir un seul critère dans le modèle, la rentabilité, donne naissance à un modèle très simple qui malheureusement ne représente pas les préoccupations des agriculteurs. Estrada et al. (1999) dans l'utilisation des modèles de simulation pour l'évaluation ex-ante remarquent l'importance d'avoir plusieurs critères pour l'analyse économique des exploitations agricoles.

Aussi, dans l'établissement des scénarios, par manque de temps, seulement la variation des prix et de la disponibilité en eau d'irrigation ont été considérés. En effet, les risques environnementaux, les risques de mévente, les risques hydriques et les pénalités agricoles, entre autre, sont des éventualités dont il faut tenir compte car elles peuvent éventuellement faire varier drastiquement l'alternative choisie.

Pour les scénarios que nous avons considéré, la rotation maïs-pastèque a donné les résultats économiques les plus favorables, elle est rentable même sur les conditions les plus mauvaises, mais en sachant que la pastèque demande des quantités importantes de pesticides et que son transport n'est pas évident, doit-elle être retenue comme une solution optimale ?. Peut-être que non, mais ce serait une nouvelle hypothèse à tester.

Pour se faire la mise en œuvre d'une analyse multicritère peut devenir révélatrice et très intéressante. La méthode ELECTRE I par exemple, qui se base sur une approche de surclassement, peut permettre de trouver un sous-ensemble de solutions plus favorables et un autre de solutions moins favorables à partir d'une ensemble de solutions efficaces (Romero, 1996).

6.3. Maïs – pastèque comme un possible système commercial ?

Les résultats de notre modèle d'optimisation ont montré que : la rotation maïs – pastèque est très rentable même lorsque la disponibilité en eau d'irrigation est faible et les prix sont mauvais et que la surface anti-risque agit sur les solutions optimales (selon le critère de Savage) comme un facteur restrictif pour la rentabilité. En effet, si nous supprimions du modèle la surface de manioc et de banane plantain de n'importe quel scénario, les 30 Ha

pourraient être exploités avec la rotation mais - pastèque irriguée et non-irriguée (la surface varie en fonction du scénario). Or, si après une analyse multicritère et la considération de scénarios additionnels cette option s'avère toujours la plus intéressante, il serait intéressant développer sur El Turpial un projet d'exploitation organisé sur la culture de cette rotation. De la main d'œuvre supplémentaire pourrait être embauchée en périodes de semence et de récolte, pour enlever les contraintes à ce niveau et permettre l'irrigation d'une surface plus importante. Les promoteurs de ce projet devront établir des engagements avec des acheteurs et des transporteurs pour éviter le risque de ne pas pouvoir vendre la récolte. Si ces engagements sont pris, la nécessité d'une production d'autoconsommation devient moins importante. Néanmoins, la culture du manioc et du plantain reste intéressante car elle permet d'avoir accès aux produits de consommation courante sans se rendre à la ville pour les acheter au prix vendu au consommateur.

7. Conclusions

Ce chapitre sera consacré à déterminer si la méthodologie développée et l'application pratique sur El Turpial sont des moyens suffisants pour répondre aux questions et à l'hypothèse posées dans le premier chapitre.

Comme on avait dit, cette méthodologie doit permettre une interaction *aller-retour* avec la communauté pour trouver les alternatives les plus favorables pour l'exploitation agricole et elle permettrait aux acteurs locaux de répondre aux questions suivantes :

- Au niveau économique, vaut-il la peine de faire un projet d'irrigation dans ce village, avec les cultures existant actuellement?

La réponse c'est peut être. En effet, si bien les résultats obtenus en utilisant le modèle ont montré qu'une exploitation plus organisée de la rotation mais-pastèque (irriguée et non irriguée), de manioc et de banane plantain peuvent devenir très rentables même dans le scénario le plus pessimiste parmi ceux qui ont été considérés. Par contre, il pourrait y avoir d'autres scénarios pessimistes pour lesquels cette option ne serait pas rentable, par exemple celui d'un risque environnemental.

Or, la solution optimale n'inclue l'exploitation ni d'avocat, ni de curossol ni d'autres rotations qui existent actuellement, on a teste que ces cultures, surtout ceux de curossol et d'avocat sont très loin de participer dans la solution optimale sous tous les scénarios.

- Si oui, et dans les cas où la ressource en eau est limitée, quelle devrait être la stratégie de distribution de l'eau entre les cultures et les agriculteurs ?

Si l'irrigation s'avère intéressante mais que la d'irrigation est limitée (scénarios 3 et 4), l'application de la méthodologie a montré que la stratégie 2 devient la plus favorable, i.e d'irriguer seulement une partie de ce que l'on aurait pu irriguer sans cette contrainte. Avec cette solution les agriculteurs sont obligés d'avoir une coopération parmi eux et éventuellement alterner l'accès à l'eau entre eux d'année en année. L'idée d'une exploitation

individuelle, où chacun travaille sur sa petite parcelle, n'est pas prise en compte. Les producteurs doivent penser comme une communauté et non en fonction des intérêts particuliers. Ceci est vrai même lorsque l'eau n'est pas limitée, car le système d'irrigation devra être géré par la communauté. Cependant, la gestion d'une ressource limitée apporte une motivation supplémentaire à la coopération.

- Avec la disponibilité de l'irrigation, serait-il plus profitable de changer la proportion de cultures pour augmenter les surfaces cultivées avec des produits de haute valeur commerciale ?

Avec les résultats obtenus on a montré que pour augmenter la rentabilité, la proportion de surfaces actuelles doit changer. La pastèque, un produit de haute valeur commerciale, s'avère l'option la plus rentable lorsqu'elle est irriguée, et même sans irrigation sous les conditions climatiques simulées, sous les scénarios de mauvais et de bons prix. Si on prenait un horizon de temps plus élevé, par exemple 10 ans, l'avocat, le cresson et autres arbres fruitiers pourraient devenir des options commerciales intéressantes. De nouvelles stratégies incluant d'autres produits à haute valeur commerciale, pourraient être incluses dans la liste de possibilités. Cependant, la culture de ces produits peut avoir des conséquences environnementales néfastes, à cause de l'augmentation de l'intensité des labours, causant une détérioration des sols, et une utilisation accrue des engrais et des produits phytosanitaires. La diversité des cultures est aussi maintenant devenue un indicateur de « durabilité » des systèmes agraires. Avant de prendre une telle décision, une analyse multicritère devrait être réalisée.

- Quelles seraient les stratégies les plus robustes, qui diminuent le risque de perdre beaucoup dans des conditions adverses de prix du marché et de disponibilité de l'eau, mais qui permettraient aussi de profiter des conditions favorables ?

Selon les résultats obtenus, la stratégie 1 correspond exactement aux caractéristiques présentées dans cette question. Néanmoins, encore un fois il faut remarquer l'importance d'une analyse multicritère en fonction de la discussion dans le dernier chapitre.

Au niveau de la recherche méthodologique, on voudrait démontrer ou réfuter l'hypothèse suivante :

- Le critère de Savage, appliqué sur une analyse économique, peut être utilisé pour indiquer la «robustesse» des stratégies considérées sous différents scénarios. Il peut être intégré ensuite dans une analyse multicritère qui comporte des considérations environnementales

Parmi les stratégies qui ont été évaluées dans ce rapport, la stratégie la plus favorable selon le critère de Savage était en effet une stratégie robuste, puisqu'elle donnait de bons résultats peu importe le scénario. Ceci ne prouve cependant pas que le critère de Savage donne toujours une solution robuste. Dans notre cas, nous avons eu de la chance car la pastèque présentait un prix de vente avantageux, même en faible demande. Nous avons vu que lorsque nous enlevions la pastèque de l'analyse, on obtenait différentes solutions optimales pour chacun des scénarios. Pour pouvoir prouver que l'application du critère de Savage donne toujours une solution robuste, il faudrait entreprendre une preuve mathématique selon la définition de robustesse donnée par Vincke (1998). Cette preuve mathématique n'a malheureusement pas pu faire partie de ce rapport, à cause des contraintes de temps. Cependant on peut affirmer que le critère de Savage peut être utilisé comme «un» indicateur pouvant être utilisé dans la détermination de la robustesse, et qui peut être combiné avec d'autres, comme la perte économique maximale, par exemple. Selon Vincke (1998), une solution est robuste si elle donne de bons résultats dans tous les scénarios, même si elle n'est pas l'optimale pour tous (ou même aucun) de ces scénarios. La notion de «bons résultats» pourrait être exprimée, en partie, comme étant l'écart par rapport à l'optimal, ce qui est en fait le regret. Cependant, l'application du critère de Savage peut mener au choix d'une stratégie qui présente des pertes économiques dans un scénario pessimiste, en autant que le regret ainsi occasionné soit plus faible que celui de ne pas profiter de ses bons résultats dans un scénario optimiste. On en conclut donc qu'une solution rencontrant le critère de Savage peut ne pas être robuste. Ce critère devrait être complété par d'autres critères, ou par l'application d'un seuil de résultat acceptable, pour exclure toutes les stratégies ne rencontrant pas des exigences minimales de rendement dans les scénarios pessimistes.

Notre hypothèse ne consistait pas non plus à démontrer que le critère de Savage est «le meilleur» critère de robustesse. Pour cela, il faudrait comparer les résultats de l'application de ce critère, dans un grand nombre de situations, avec l'application d'autres critères ou approches de recherche de solutions robustes.

Bibliographie

ALLEN, R., PEREIRA, L., RAES, D., SMITH, M.(1998). Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements. *FAO Irrigation and Drainage Paper 56*. Food and Agriculture Organisation of the United Nations.

BECU, N. (2001). Modélisation de la gestion de l'eau d'irrigation à l'échelle d'un bassin versant et exploration du système via simulations – Une approche basée sur les systèmes multi-agents – Le cas du bassin versant du Mae Uam (Nord Thaïlande). Mémoire de DEA Sciences de l'Eau dans l'Environnement Continental, Montpellier. 122 p et annexes.

CCI. Corporación Colombia Internacional. Sistema de Información De Precios del Sector Agropecuario – SIPSA. – [en ligne]. [Colombie]. [Consultée le 04.08.02] Disponible sur Internet < URL : <http://www.cci.org.co/informacion/sipsa/index.html>

DINAR, A., KECK, A. (1996). Private irrigation investment in Colombia : effects of violence, macroeconomic policy, and environmental conditions. *Agricultural Economics*, 16. 1-15.

DOOREMBOS, J. (1986). Yield Response to Water. *FAO Irrigation and Drainage Paper 33*. Food and Agriculture Organisation of the United Nations. 179 p.

ESTRADA, R., CHAPARRO, O., RIVERA, B. (1999).. Utilización de los Modelos de Simulación para Evaluación Ex-ante. Instrumentos Metodológicos para la Toma de Decisiones en el Manejo de los Recursos Naturales, 8, 3 : 7 – 42.

FAJARDO, A. (2000). Base de Datos de Cultivos y Frutas de Colombia – CUFRUCOL. Centro Internacional de Agricultura Tropical – CIAT. Cali – Colombia. CD-ROM.

FAO. (1994). Ouvrages de régulation et de distribution de l'eau. Gestion des eaux en irrigation. Manuel de formation; 8 . Rome. Italie. VIII

FAYSSE, N. (2001). L'influence des règles collectives d'allocation de l'eau sur les choix stratégiques des agriculteurs. Des petits périmètres irrigués tunisiens aux prélèvements en rivière dans le bassin de l'Adour. Thèse de doctorat de l'Université de Paris X Nanterre. Paris. 232 pp et annexes.

GARCIA, F. Projets applicatifs : Agro-environnement, maintenance et fiabilité. – [en ligne]. [France]. [Consultée le 21.08.02] Disponible sur Internet < URL : <http://www.inra.fr/bia/T/garcia/projets.fr.html>

GOMEZ, G. Evaluación de alternativas de inversión : Analisis matemático y financiero de proyectos. – [en ligne]. [Colombie]. [Consultée le 03.06.02] Disponible sur Internet < URL : <http://www.gestiopolis.com/canales/financiera/articulos/22/cauetio.htm>

HUTCHINSON, M. (1997). ANUSPLIN version 3.2. Center for resource and environmental studies, the Australian National University. Canberra, Australia.

IIMI. (1994). Decision support system (DSS) for water distribution management : Theory and practice. IIMI Working Paper; 31. Colombo. Sri-Lanka. VII

KOUVELIS, P. and YU, G. (1997). Robust discrete optimisation and its applications, Kluwer.

LEON, J. (1999). Evaluación de oportunidades para cultivos tradicionales y no tradicionales empelando los programas ANUSPLIN y ANUCLIM. Stage Universitario, Universidad Nacional de Colombia, Departamento de Ingeniería Agrícola. 188 p.

LEON, J. (2000). CLIMCROP version 1.3. Centro Internacional de Agricultura Tropical CIAT, Universidad Nacional de Colombia. Cali – Colombia. CD-ROM.

MORARDET S., PALACIO V. (Eds), GLEYSSES G., RIEU T. et PLATON J. Guide méthodologique pour l'évaluation économique des projets d'irrigation. Document de travail. Cemagref, UR Irrigation, Montpellier.

PRESIDENCIA DE LA REPUBLICA. (2001). AgroVisión Colombia 2025. Presidencia de la República, Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural. Cambio para construir la paz. Bogotá. 139 p.

ROMERO, C. (1996). Análisis de las decisiones multicriterio. Publicaciones de Ingeniería de sistemas. ISDEFE : Madrid. 115 p.

ROY, B. (1985). Méthodologie multicritère d'aide à la décision. Economica : Paris.

ROY, B. (1997). Un chaînon manquant en RO-AD : les conclusions robustes, Cahier du Lansade N. 144, Université de Paris Dauphine.

RUBIANO, Y. (2001). Datos de campo para el Municipio de Puerto López, Meta. Centro Internacional de Agricultura Tropical CIAT. Programas de investigación PE-2 y PE-4.

SCHRAGE, L. (1997). Optimization Modeling with LINDO. 5Th edition. Duxbury: Chicago. 459 p.

VALLIN, Ph. et VANDERPOOTEN, D. (2002). Aide à la décision Une approche par les cas. 2^{ème} édition. Ellipses : Paris. 224 p.

VINCKE, Ph. (1989). L'aide multicritère à la décision. Editions de l'Université libre de Bruxelles, Bruxelles, Belgique. 179 p.

VINCKE, Ph. (1998). Robust solutions and methods in decision-aid. Institut de Statistique et de Recherche Opérationnelle, Université Libre de Bruxelles, Bruxelles, Belgique, IS-MG98 /01, 20 p.

VINCKE, Ph. (2002). Aide à la décision et gestion de l'environnement: concepts, outils, applications Présentation orale au la Journée thématique "Aide à la décision et développement durable". Dans le cadre de la «Semaine de l'Université Libre de Bruxelles à l'UQAM »28 mars 2002, Université du Québec à Montréal, Canada.

VOLTZ, M (2002). Cours Modélisation Hydrologique du DEA "Sciences de l'Eau dans l'Environnement Continental", Modélisation du bilan hydrique du sol sous couvert. ENGREF.

Liste de figures et de tableaux

Figure 1. Démarche scientifique de l'aide à la décision	18
Figure 2. Etapes de la méthodologie proposée.....	30
Figure 3. Représentation schématique du bilan hydrique	31
Figure 4. Approche analogique. Cas d'un réservoir.....	31
Figure 5. Représentation graphique de la VPN.....	35
Tableau 1. Utilisation actuelle du sol.....	40
Tableau 2. Rotations annuelles considérées pour les cultures inférieures à 180 jours.....	41
Tableau 3. Distribution des cultures prise en compte pour la simulation.	41
Tableau 4. Organisation matricielle des scénarios, stratégies et cas.....	42
Tableau 5. Caractéristiques physico-chimiques du sol d'El Turpial.....	44
Tableau 6. Valeurs de précipitation et d'évapotranspiration d'El Turpial.	45
Tableau 7. Estimation de la VPN pour les cultures proposées.....	54
Tableau 8. Résultats du processus d'optimisation.	55
Tableau 9. Résultats du processus d'optimisation sans irrigation.....	56
Tableau 10. Résultats du processus d'optimisation sans maïs - pastèque.....	57
Tableau 11. Matrice de l'évaluation économique pour les stratégies proposées	58
Tableau 12. Regrets maximaux.	59

Annexes

ANNEXE A

Rendements maximaux et valeurs de coefficients K_c et K_y pour les différentes cultures choisies.

Culture	K_c	K_y	YM (ton/Ha)
Mais	0.4 – 1.2	1.25	3500
Pastèque	0.4 – 1.0	1.1	20000
Potiron	0.5 – 1.0	1.2	20000
Curossol	0.4 – 1.2	1.1	12000
Avocat	0.45 – 0.65	1.2	12000
Manioc	0.3 – 1.1	1.2	18000
Banane plantain	1.0 – 1.2	1.3	15000

Les valeurs des coefficients K_c et K_y correspondent aux valeurs recommandables pour la FAO ([Doorembos, 1986](#)). Les rendements maximaux ont été pris de la base de données Cufrucol ([Fajardo, 2001](#)).

ANNEXE B

Coûts de l'eau fixés dans le cadre de cette recherche.

Variable	*Coût tentatif
mobilisation de la ressource (par Ha)	1.000.000
transport de l'eau jusqu'aux parcelles (par Ha)	1.000.000
mise en pression et distribution aux plantes (par Ha)	1.000.000
coût de l'eau naturelle (par m ³)	50
Coûts non prévus (par Ha)	500.000

* Valeur donnée en pesos colombiens (US\$ 1 = 2500 pesos)

Les valeurs sont estimées selon la recommandation de la Corporation Autonome Régionale de l'Orinoquia – Corporinoquia.

ANNEXE C

Prix minimaux et maximaux moyennes des produites sur le marché.

Culture	*Prix minimal	*Prix maximal
Mais	400	700
Pastèque	300	800
Potiron	216	800
Curossol	850	3000
Avocat	1400	1789
Manioc	200	800
Banane plantain	320	800

* Prix donnés en pesos colombiens (US\$ 1 = 2500 pesos). Corporacion Colombia Internacional (CCI, 2002).

ANNEXE D

Coûts de production des cultures choisies.

Culture	Produits agrochimies	Enveloppes	Machine	Main d'œuvre	Matériel végétale	Administration	Assistance	Autres	logement	Coûts Totaux
Mais	292732	56000	210700	56000	72500	20638	20638	20638	129997	879843
Manioc	345752.2	290000	119000	384000	263500	42067.566	42067.566	42067.566	130000	1658454.898
Pastèque	615093	0	156000	648000	16000	43052.79	43052.79	43052.79	80000	1644251.37
Potiron	1704814	300000	223000	1143000	21500	94569	94569	94569	130000	3806021
Avocat année 1	162296	0	0	1080000	705760	58441.68	58441.68	58441.68	0	2123381.04
Avocat année 2	281500	0	0	684000	60000	30765	30765	30765	0	1117795
Avocat année 3	393100	50000	0	696000	60000	35973	35973	35973	0	1307019
Avocat année 4	512304	100000	0	1188000	78000	56349.12	56349.12	56349.12	0	2047351.36
Avocat année 5	623904	150000	0	1116000	369160	67771.92	67771.92	67771.92	0	2462379.76
Avocat année 6	750712	150000	0	1152000	60000	63381.36	63381.36	63381.36	0	2302856.08
Avocat année 7	862312	0	0	1224000	60000	64389.36	64389.36	64389.36	0	2339480.08
Avocat année 8	973912	50000	0	1284000	60000	71037.36	71037.36	71037.36	0	2581024.08
Avocat année 9	973912	0	0	1284000	60000	69537.36	69537.36	69537.36	0	2526524.08
Avocat année 10	973912	50000	0	1284000	369160	80312.16	80312.16	80312.16	0	2918008.48
Curossol année 1	295640	0	0	3084000	779160	124764	124764	124764	0	4158800
Curossol année 2	349270	0	0	2232000	120000	81038,1	81038,1	81038,1	0	2701270
Curossol année 3	516900	135000	0	2772000	120000	106317	106317	106317	0	3543900
Curossol année 4	634650	180000	0	2940000	120000	116239,5	116239,5	116239,5	0	3874650
Curossol année 5	882400	0	0	2388000	432000	111072	111072	111072	0	3702400
Curossol année 6	834020	225000	0	3012000	120000	125730,6	125730,6	125730,6	0	4191020
Curossol année 7	944350	0	0	2856000	120000	117610,5	117610,5	117610,5	0	3920350
Curossol année 8	1036100	0	0	2856000	120000	120363	120363	120363	0	4012100
Curossol année 9	1060100	315000	0	2616000	120000	123333	123333	123333	0	4111100
Curossol année 10	1054100	0	0	2676000	120000	115503	115503	115503	0	3850100
B. Plantain année 1	680892	0	125500	662500	499800	59060.76	59060.76	59060.76	130000	2275874.28
B. Plantain année 2	568440	0	0	1080000	60000	51253.2	51253.2	51253.2	130000	1992199.6
B. Plantain année 3	452940	0	0	1560000	60000	62188.2	62188.2	62188.2	130000	2389504.6

Fajardo, 2001.

ANNEXE E

ANNEXE E-1

- **Programme en LINGO 7.0 pour l'optimisation du scénario 1.**

```
!Cet exemple repondra a la question "comment doit-on repartir l'eau entre
les cultures et quelle combinaison faire, en spécifiant, dans les
contraints une surface minimale pour le manioc et le plantain"
!Scenario 1: Bon prix, pas de limites de disponibilite de l'eau
!les cultures considerees sont les suivantes:
!MAIS: rotation mais-mais sans irrigation du mais dans le deuxième semestre
!PAS: mais-pastèque sans irrigation de la pastèque dans le deuxième
semestre
!POT: rotation mais-potiron sans irrigation du potiron;
!CUR: Curossol sans irrigation
!AVIR: Avocat sans irrigation
!PLA: plantain
!MAN: manioc
!MAISIR: rotation mais-mais avec irrigation du mais dans le deuxième
semestre
!PASIR: mais-pastèque avec irrigation de la pastèque dans le deuxième
semestre
!POTIR: rotation mais-potiron avec irrigation du potiron;
!CURIR: Curossol sans irrigation
!AVIR: Avocat avec irrigation
!
!Les variables;
!Aire ou surface cultivée: "A" suivi du code de la culture;
!Marge de rentabilité pour 5 ans: "VPN" suivi du code de la culture;

VPNMAIS=7674058;
VPNMAISIR=11656847;
VPNPAS=42129295;
VPNPASIR=66898768;
VPNPOT=27959050;
VPNPOTIR=57501771;
VPNCUR=6069043;
VPNCURIR=13755266;
VPNAV=2785068;
VPNAVIR=11036350;
VPNMAN=34119502;
VPNPLA=6784417;

wMAIS1 = 10;
wMAISIR1 = 30;
wPAS1 = 10;
wPASIR1 = 30;
wPOT1 = 10;
wPOTIR1 = 30;
wCUR1 = 30;
wCURIR1 = 80;
wAV1 = 30;
wAVIR1 = 100;
wMAN1 = 10;
wPLA1 = 30;
```

!Besoin en eau (m3): "EAU" suivi du code de la culture;

EAUMASIR=1625;
EAUPASIR=2147;
EAUPOTIR=2321;
EAUCURIR=1201;
EAUAVIR=2775;

!Fonction objectif (maximiser la valeur présente nette VPN sur 10 semestres);

[objectif] max = VPNMAIS * AMAIS + VPNMAISIR * AMAISIR + VPNPAS * APAS +
VPNPASIR * APASIR + VPNPOT * APOT + VPNPOTIR * APOTIR + VPNCUR * ACUR +
VPNCURIR * ACURIR + VPNAV * AAV + VPNAVIR * AAVIR + VPNMAN * AMAN + VPNPLA
* APLA;

!Restrictions, cas surfaces cltures bloquées (la proportion d'irrigation est la seule inconnue ;

[surface_totale] AMAIS + AMAISIR + APOT + APAS + APASIR + APOTIR + AMAN +
APLA + ACUR + AAV + AAVIR + ACURIR <= 30;
[surface_MANIOC] AMAN >= 8;
[surface_PLANTAIN] APLA >= 5;

!Restrictions, disponibilité d'eau;

[eaudisponible]
EAUMASIR*AMAISIR+EAUPASIR*APASIR+EAUPOTIR*APOTIR+EAUCURIR*ACURIR+EAUAVIR*A
AVIR<= 17300;

!Restrictions, Disponibilité de la marge de travail;

[wavril] wmaisir1 * AMAISIR + wPASIR1 * APASIR + wPOTIR1 * APOTIR + wCURIR1
* ACURIR + wAVIR1 * AAVIR + wMAIS1 * AMAIS + wPAS1 * APAS + wPOT1 * APOT +
wCUR1 * ACUR + wAV1 * AAV + wMAN1 * AMAN + wPLA1 * APLA + 10 * AMAN <= 16 *
1 * 40;

- **Résultats de l'optimisation pour le scénario 1.**

Global optimal solution found at step: 4
 Objective value: 0.1221232E+10

Variable	Value	Reduced Cost
VPNMAIS	7674058.	0.0000000
VPNMAISIR	0.1165685E+08	0.0000000
VPNPAS	0.4212930E+08	0.0000000
VPNPASIR	0.6689877E+08	0.0000000
VPNPOT	0.2795905E+08	0.0000000
VPNPOTIR	0.5750177E+08	0.0000000
VPNCUR	6069043.	0.0000000
VPNCURIR	0.1375527E+08	0.0000000
VPNAV	2785068.	0.0000000
VPNAVIR	0.1103635E+08	0.0000000
VPNMAN	0.3411950E+08	0.0000000
VPNPLA	6784417.	0.0000000
WMAIS1	10.00000	0.0000000
WMAISIR1	30.00000	0.0000000
WPAS1	10.00000	0.0000000
WPASIR1	30.00000	0.0000000
WPOT1	10.00000	0.0000000
WPOTIR1	30.00000	0.0000000
WCUR1	30.00000	0.0000000
WCURIR1	80.00000	0.0000000
WAV1	30.00000	0.0000000
WAVIR1	100.0000	0.0000000
WMAN1	10.00000	0.0000000
WPLA1	30.00000	0.0000000
EAUMASIR	1625.000	0.0000000
EAUPASIR	2147.000	0.0000000
EAUPOTIR	2321.000	0.0000000
EAUCURIR	1201.000	0.0000000
EAUAVIR	2775.000	0.0000000
AMASIS	0.0000000	0.3445524E+08
AMASIR	0.0000000	0.5524192E+08
APAS	9.000000	0.2793968E-08
APASIR	8.000000	0.0000000
APOT	0.0000000	0.1417025E+08
APOTIR	0.0000000	9396997.
ACUR	0.0000000	0.6082972E+08
ACURIR	0.0000000	0.1150672E+09
AAV	0.0000000	0.6411370E+08
AAVIR	0.0000000	0.1425556E+09
AMAN	8.000000	0.1862645E-08
APLA	5.000000	0.0000000

Row	Slack or Surplus	Dual Price
1	0.0000000	0.0000000
2	0.0000000	0.0000000
3	0.0000000	9.000000
4	0.0000000	8.000000
5	0.0000000	0.0000000
6	0.0000000	0.0000000

7	0.0000000	0.0000000
8	0.0000000	0.0000000
9	0.0000000	0.0000000
10	0.0000000	0.0000000
11	0.0000000	8.000000
12	0.0000000	5.000000
13	0.0000000	0.0000000
14	0.0000000	0.0000000
15	0.0000000	-0.1114626E+08
16	0.0000000	-9907789.
17	0.0000000	0.0000000
18	0.0000000	0.0000000
19	0.0000000	0.0000000
20	0.0000000	0.0000000
21	0.0000000	0.0000000
22	0.0000000	0.0000000
23	0.0000000	-9907789.
24	0.0000000	-6192368.
25	0.0000000	0.0000000
26	0.0000000	0.0000000
27	0.0000000	0.0000000
28	0.0000000	0.0000000
29	0.0000000	0.0000000
OBJECTIF	0.1221232E+10	1.000000
SURFACE_TOTALE	0.0000000	0.2974456E+08
SURFACE_MANIOC	0.0000000	-0.2039453E+08
SURFACE_PLANTAIN	0.0000000	-0.6011435E+08
EAUDISPONIBLE	124.0000	0.0000000
WAVRIL	0.0000000	1238474.

ANNEXE E-2

• Programme en LINGO 7.0 pour l'optimisation du scénario 2

```
!Cet exemple repondra a la question "comment doit-on repartir l'eau entre
les cultures et quelle combinaison faire, en spécifiant, dans les
contraints une surface minimale pour le manioc et le plantain"
!!Scenario 2: Mauvaises prix, pas de limites de disponibilite de l'eau
!les cultures considerees sont les suivantes:
!MAIS: rotation mais-mais sans irrigation du mais dans le deuxième semestre
!PAS: mais-pastèque sans irrigation de la pastèque dans le deuxième
semestre
!POT: rotation mais-potiron sans irrigation du potiron;
!CUR: Curossol sans irrigation
!AVIR: Avocat sans irrigation
!PLA: plantain
!MAN: manioc
!MAISIR: rotation mais-mais avec irrigation du mais dans le deuxième
semestre
!PASIR: mais-pastèque avec irrigation de la pastèque dans le deuxième
semestre
!POTIR: rotation mais-potiron avec irrigation du potiron;
!CURIR: Curossol sans irrigation
!AVIR: Avocat avec irrigation
!
!Les variables;
!Aire ou surface cultivée: "A" suivi du code de la culture;
!Marge de rentabilité pour 5 ans: "VPN" suivi du code de la culture;

VPNMAIS=1120096;
VPNMAISIR=2564946;
VPNPAS=10456143;
VPNPASIR=19058051;
VPNPOT=309540;
VPNPOTIR=11392844;
VPNAV=474055;
VPNAVIR=6455417;
VPNMAN=3144694;
VPNPLA=42788;

wMAIS1 = 10;
wMAISIR1 = 30;
wPAS1 = 10;
wPASIR1 = 30;
wPOT1 = 10;
wPOTIR1 = 30;
wAV1 = 30;
wAVIR1 = 100;
wMAN1 = 10;
wPLA1 = 30;

!Besoin en eau (m3): "EAU" suivi du code de la culture;

EAUMAISIR=1625;
EAUPASIR=2147;
```

EAUPOTIR=2321;

EAUAVIR=2775;

!Fonction objectif (maximiser la valeur présente nette VPN sur 10 semestres);

[objectif] max = VPNMAIS * AMAIS + VPNMAISIR * AMAISIR + VPNPAS * APAS + VPNPASIR * APASIR + VPNPOT * APOT + VPNPOTIR * APOTIR + VPNAV * AAV + VPNAVIR * AAVIR + VPNMAN * AMAN + VPNPLA * APLA;

!Restrictions, cas surfaces clatures bloquées (la proportion d'irrigation est la seule inconnue ;

[surface_totale] AMAIS + AMAISIR + APOT + APAS + APASIR + APOTIR + AMAN + APLA + AAV + AAVIR <= 30;

[surface_MANIOC] AMAN >= 8;

[surface_PLANTAIN] APLA >= 5;

!Restrictions, disponibilité d'eau;

[eaudisponible]

EAUMASIR*AMASIR+EAUPASIR*APASIR+EAUPOTIR*APOTIR+EAUAVIR*AAVIR<= 17300;

!Restrictions, Disponibilité de la marge de travail;

[wavril] wmaisir1 * AMAISIR + wpasir1 * APASIR + wpotir1 * APOTIR + wavir1 * AAVIR + wmais1 * AMAIS + wpas1 * APAS + wpot1 * APOT + wav1 * AAV + wman1 * AMAN + wpla1 * APLA + 10 * AMAN <= 16 * 1 * 40;

- **Résultats de l'optimisation pour le scénario 2.**

Global optimal solution found at step: 4
 Objective value: 0.2719412E+09

Variable	Value	Reduced Cost
VPNMAIS	1120096.	0.0000000
VPNMAISIR	2564946.	0.0000000
VPNPAS	0.1045614E+08	0.0000000
VPNPASIR	0.1905805E+08	0.0000000
VPNPOT	309540.0	0.0000000
VPNPOTIR	0.1139284E+08	0.0000000
VPNAV	474055.0	0.0000000
VPNAVIR	6455417.	0.0000000
VPNMAN	3144694.	0.0000000
VPNPLA	42788.00	0.0000000
WMAIS1	10.00000	0.0000000
WMAISIR1	30.00000	0.0000000
WPAS1	10.00000	0.0000000
WPASIR1	30.00000	0.0000000
WPOT1	10.00000	0.0000000
WPOTIR1	30.00000	0.0000000
WAV1	30.00000	0.0000000
WAVIR1	100.0000	0.0000000
WMAN1	10.00000	0.0000000
WPLA1	30.00000	0.0000000
EAUMASIR	1625.000	0.0000000
EAUPASIR	2147.000	0.0000000
EAUPOTIR	2321.000	0.0000000
EAUAVIR	2775.000	0.0000000
AMASIS	0.0000000	9336047.
AMASISIR	0.0000000	0.1649310E+08
APAS	9.000000	0.0000000
APASIR	8.000000	0.0000000
APOT	0.0000000	0.1014660E+08
APOTIR	0.0000000	7665207.
AAV	0.0000000	0.1858400E+08
AAVIR	0.0000000	0.4270931E+08
AMAN	8.000000	0.0000000
APLA	5.000000	0.0000000

Row	Slack or Surplus	Dual Price
1	0.0000000	0.0000000
2	0.0000000	0.0000000
3	0.0000000	9.000000
4	0.0000000	8.000000
5	0.0000000	0.0000000
6	0.0000000	0.0000000
7	0.0000000	0.0000000
8	0.0000000	0.0000000
9	0.0000000	8.000000
10	0.0000000	5.000000
11	0.0000000	0.0000000
12	0.0000000	0.0000000
13	0.0000000	-3870859.
14	0.0000000	-3440763.

15	0.0000000	0.0000000
16	0.0000000	0.0000000
17	0.0000000	0.0000000
18	0.0000000	0.0000000
19	0.0000000	-3440763.
20	0.0000000	-2150477.
21	0.0000000	0.0000000
22	0.0000000	0.0000000
23	0.0000000	0.0000000
24	0.0000000	0.0000000
OBJECTIF	0.2719412E+09	1.000000
SURFACE_TOTALE	0.0000000	6155189.
SURFACE_MANIOC	0.0000000	-0.1161240E+08
SURFACE_PLANTAIN	0.0000000	-0.1901526E+08
EAUDISPONIBLE	124.0000	0.0000000
WAVRIL	0.0000000	430095.4

ANNEXE E-3

- **Programme en LINGO 7.0 pour l'optimisation du scénario 3**

```
!Cet exemple repondra a la question "comment doit-on repartir l'eau entre
les cultures et quelle combinaison faire, en spécifiant, dans les
contraints une surface minimale pour le manioc et le plantain"
!Scenario 3: Bon prix, limites de disponibilite de l'eau
!les cultures considerees sont les suivantes:
!MAIS: rotation mais-mais sans irrigation du mais dans le deuxième semestre
!PAS: mais-pastèque sans irrigation de la pastèque dans le deuxième
semestre
!POT: rotation mais-potiron sans irrigation du potiron;
!CUR: Curossol sans irrigation
!AVIR: Avocat sans irrigation
!PLA: plantain
!MAN: manioc
!MAISIR: rotation mais-mais avec irrigation du mais dans le deuxième
semestre
!PASIR: mais-pastèque avec irrigation de la pastèque dans le deuxième
semestre
!POTIR: rotation mais-potiron avec irrigation du potiron;
!CURIR: Curossol sans irrigation
!AVIR: Avocat avec irrigation
!
!Les variables;
!Aire ou surface cultivée: "A" suivi du code de la culture;
!Marge de rentabilité pour 5 ans: "VPN" suivi du code de la culture;

VPNMAIS=7674058;
VPNMAISIR=11656847;
VPNPAS=42129295;
VPNPASIR=66898768;
VPNPOT=27959050;
VPNPOTIR=57501771;
VPNCUR=6069043;
VPNCURIR=13755266;
VPNAV=2785068;
VPNAVIR=11036350;
VPNMAN=34119502;
VPNPLA=6784417;

wMAIS1 = 10;
wMAISIR1 = 30;
wPAS1 = 10;
wPASIR1 = 30;
wPOT1 = 10;
wPOTIR1 = 30;
wCUR1 = 30;
wCURIR1 = 80;
wAV1 = 30;
wAVIR1 = 100;
wMAN1 = 10;
wPLA1 = 30;
```

```
!Besoin en eau (m3): "EAU" suivi du code de la culture;
```

```
EAUMAISIR=1625;  
EAUPASIR=2147;  
EAUPOTIR=2321;  
EAUCURIR=1201;  
EAUAVIR=2775;
```

```
!Fonction objectif (maximiser la valeur présente nette VPN sur 10 semestres);
```

```
[objectif] max = VPNMAIS * AMAIS + VPNMAISIR * AMAISIR + VPNPAS * APAS +  
VPNPASIR * APASIR + VPNPOT * APOT + VPNPOTIR * APOTIR + VPNCUR * ACUR +  
VPNCURIR * ACURIR + VPNAV * AAV + VPNAVIR * AAVIR + VPNMAN * AMAN + VPNPLA  
* APLA;
```

```
!Restrictions, cas surfaces cltures bloquées (la proportion d'irrigation est la seule inconnue ;
```

```
[surface_totale] AMAIS + AMAISIR + APOT + APAS + APASIR + APOTIR + AMAN +  
APLA + ACUR + AAV + AAVIR + ACURIR <= 30;  
[surface_MANIOC] AMAN >= 8;  
[surface_PLANTAIN] APLA >= 5;
```

```
!Restrictions, disponibilité d'eau;
```

```
[eaudisponible]  
EAUMAISIR*AMAISIR+EAUPASIR*APASIR+EAUPOTIR*APOTIR+EAUCURIR*ACURIR+EAUAVIR*AAVIR<= 8650;
```

```
!Restrictions, Disponibilité de la marge de travail;
```

```
[wavril] wmaisir1 * AMAISIR + wPASIR1 * APASIR + wPOTIR1 * APOTIR + wCURIR1  
* ACURIR + wAVIR1 * AAVIR + wMAIS1 * AMAIS + wPAS1 * APAS + wPOT1 * APOT +  
wCUR1 * ACUR + wAV1 * AAV + wMAN1 * AMAN + wPLA1 * APLA + 10 * AMAN <= 16 *  
1 * 40;
```

- **Résultats de l'optimisation pour le scénario 3.**

Global optimal solution found at step:

4

Objective value:

0.1122869E+10

Variable	Value	Reduced Cost
VPNMAIS	7674058.	0.0000000
VPNMAISIR	0.1165685E+08	0.0000000
VPNPAS	0.4212930E+08	0.0000000
VPNPASIR	0.6689877E+08	0.0000000
VPNPOT	0.2795905E+08	0.0000000
VPNPOTIR	0.5750177E+08	0.0000000
VPNCUR	6069043.	0.0000000
VPNCURIR	0.1375527E+08	0.0000000
VPNAV	2785068.	0.0000000
VPNAVIR	0.1103635E+08	0.0000000
VPNMAN	0.3411950E+08	0.0000000
VPNPLA	6784417.	0.0000000
WMAIS1	10.00000	0.0000000
WMAISIR1	30.00000	0.0000000
WPAS1	10.00000	0.0000000
WPASIR1	30.00000	0.0000000
WPOT1	10.00000	0.0000000
WPOTIR1	30.00000	0.0000000
WCUR1	30.00000	0.0000000
WCURIR1	80.00000	0.0000000
WAV1	30.00000	0.0000000
WAVIR1	100.0000	0.0000000
WMAN1	10.00000	0.0000000
WPLA1	30.00000	0.0000000
EAUMASIR	1625.000	0.0000000
EAUPASIR	2147.000	0.0000000
EAUPOTIR	2321.000	0.0000000
EAUCURIR	1201.000	0.0000000
EAUAVIR	2775.000	0.0000000
AMASIS	0.0000000	0.3445524E+08
AMASIR	0.0000000	0.4921972E+08
APAS	12.97112	0.0000000
APASIR	4.028878	0.0000000
APOT	0.0000000	0.1417024E+08
APOTIR	0.0000000	0.1140440E+08
ACUR	0.0000000	0.3606025E+08
ACURIR	0.0000000	0.4222971E+08
AAV	0.0000000	0.3934423E+08
AAVIR	0.0000000	0.6310752E+08
AMAN	8.000000	0.0000000
APLA	5.000000	0.0000000

Row	Slack or Surplus	Dual Price
1	0.0000000	0.0000000
2	0.0000000	0.0000000
3	0.0000000	12.97070
4	0.0000000	4.028320
5	0.0000000	0.0000000
6	0.0000000	0.0000000
7	0.0000000	0.0000000
8	0.0000000	0.0000000
9	0.0000000	0.0000000
10	0.0000000	0.0000000
11	0.0000000	8.000000

12	0.0000000	5.000000
13	0.0000000	0.0000000
14	0.0000000	0.0000000
15	0.0000000	0.0000000
16	0.0000000	0.0000000
17	0.0000000	0.0000000
18	0.0000000	0.0000000
19	0.0000000	0.0000000
20	0.0000000	0.0000000
21	0.0000000	0.0000000
22	0.0000000	0.0000000
23	0.0000000	0.0000000
24	0.0000000	0.0000000
25	0.0000000	0.0000000
26	0.0000000	-46480.29
27	0.0000000	0.0000000
28	0.0000000	0.0000000
29	0.0000000	0.0000000
OBJECTIF	0.1122869E+10	1.000000
SURFACE_TOTALE	0.0000000	0.4212930E+08
SURFACE_MANIOC	0.0000000	-8009793.
SURFACE_PLANTAIN	0.0000000	-0.3534488E+08
EAUDISPONIBLE	0.0000000	11536.78
WAVRIL	79.42245	0.0000000

- **Programme en LINGO 7.0 pour l'optimisation du scénario 4**

```
!Cet exemple repondra a la question "comment doit-on repartir l'eau entre
les cultures et quelle combinaison faire, en spécifiant, dans les
contraints une surface minimale pour le manioc et le plantain"
!!Scenario 4: Mauvaises prix, limites de disponibilite de l'eau
!les cultures considerees sont les suivantes:
!MAIS: rotation mais-mais sans irrigation du mais dans le deuxième semestre
!PAS: mais-pastèque sans irrigation de la pastèque dans le deuxième
semestre
!POT: rotation mais-potiron sans irrigation du potiron;
!CUR: Curossol sans irrigation
!AVIR: Avocat sans irrigation
!PLA: plantain
!MAN: manioc
!MAISIR: rotation mais-mais avec irrigation du mais dans le deuxième
semestre
!PASIR: mais-pastèque avec irrigation de la pastèque dans le deuxième
semestre
!POTIR: rotation mais-potiron avec irrigation du potiron;
!CURIR: Curossol sans irrigation
!AVIR: Avocat avec irrigation
!
!Les variables;
!Aire ou surface cultivée: "A" suivi du code de la culture;
!Marge de rentabilité pour 5 ans: "VPN" suivi du code de la culture;

VPNMAIS=1120096;
VPNMAISIR=2564946;
VPNPAS=10456143;
VPNPASIR=19058051;
VPNPOT=309540;
VPNPOTIR=11392844;
VPNAV=474055;
VPNAVIR=6455417;
VPNMAN=3144694;
VPNPLA=42788;

wMAIS1 = 10;
wMAISIR1 = 30;
wPAS1 = 10;
wPASIR1 = 30;
wPOT1 = 10;
wPOTIR1 = 30;
wAV1 = 30;
wAVIR1 = 100;
wMAN1 = 10;
wPLA1 = 30;

!Besoin en eau (m3): "EAU" suivi du code de la culture;

EAUMASIR=1625;
EAUPASIR=2147;
EAUPOTIR=2321;
EAUAVIR=2775;

!Fonction objectif (maximiser la valeur présente nette VPN sur 10
semestres);
```

```

[objectif] max = VPNMAIS * AMAIS + VPNMAISIR * AMAISIR + VPNPAS * APAS +
VPNPASIR * APASIR + VPNPOT * APOT + VPNPOTIR * APOTIR + VPNAV * AAV +
VPNAVIR * AAVIR + VPNMAN * AMAN + VPNPLA * APLA;

!Restrictions, cas surfaces clatures bloquées (la proportion d'irrigation
est la seule inconnue ;

[surface_totale] AMAIS + AMAISIR + APOT + APAS + APASIR + APOTIR + AMAN +
APLA + AAV + AAVIR <= 30;
[surface_MANIOC] AMAN >= 8;
[surface_PLANTAIN] APLA >= 5;

!Restrictions, disponibilité d'eau;

[eaudisponible]
EAUMASIR*AMASIR+EAUPASIR*APASIR+EAUPOTIR*APOTIR+EAUAVIR*AAVIR<= 8650;

!Restrictions, Disponibilité de la marge de travail;

[wavril] wmaisir1 * AMAISIR + wpasir1 * APASIR + wpotir1 * APOTIR + wavir1
* AAVIR + wmais1 * AMAIS + wpas1 * APAS + wpot1 * APOT + wav1 * AAV + wman1
* AMAN + wpla1 * APLA + 10 * AMAN <= 16 * 1 * 40;

```

- **Résultats de l'optimisation pour le scénario 4.**

Global optimal solution found at step:

4

Objective value:

0.2377820E+09

Variable	Value	Reduced Cost
VPNMAIS	1120096.	0.0000000
VPNMAISIR	2564946.	0.0000000
VPNPAS	0.1045614E+08	0.0000000
VPNPASIR	0.1905805E+08	0.0000000
VPNPOT	309540.0	0.0000000
VPNPOTIR	0.1139284E+08	0.0000000
VPNAV	474055.0	0.0000000
VPNAVIR	6455417.	0.0000000
VPNMAN	3144694.	0.0000000
VPNPLA	42788.00	0.0000000
WMAIS1	10.00000	0.0000000
WMAISIR1	30.00000	0.0000000
WPAS1	10.00000	0.0000000
WPASIR1	30.00000	0.0000000
WPOT1	10.00000	0.0000000
WPOTIR1	30.00000	0.0000000
WAV1	30.00000	0.0000000
WAVIR1	100.0000	0.0000000
WMAN1	10.00000	0.0000000
WPLA1	30.00000	0.0000000
EAUMASIR	1625.000	0.0000000
EAUPASIR	2147.000	0.0000000
EAUPOTIR	2321.000	0.0000000
EAUAVIR	2775.000	0.0000000
AMASIS	0.0000000	9336047.
AMASISIR	0.0000000	0.1440172E+08
APAS	12.97112	0.0000000
APASIR	4.028878	0.0000000
APOT	0.0000000	0.1014660E+08
APOTIR	0.0000000	8362334.
AAV	0.0000000	9982088.
AAVIR	0.0000000	0.1511870E+08
AMAN	8.000000	0.0000000
APLA	5.000000	0.0000000

Row	Slack or Surplus	Dual Price
1	0.0000000	0.0000000
2	0.0000000	0.0000000
3	0.0000000	12.97119
4	0.0000000	4.028931
5	0.0000000	0.0000000
6	0.0000000	0.0000000
7	0.0000000	0.0000000
8	0.0000000	0.0000000
9	0.0000000	8.000000
10	0.0000000	5.000000
11	0.0000000	0.0000000
12	0.0000000	0.0000000
13	0.0000000	0.0000000
14	0.0000000	0.0000000
15	0.0000000	0.0000000
16	0.0000000	0.0000000
17	0.0000000	0.0000000
18	0.0000000	0.0000000
19	0.0000000	0.0000000
20	0.0000000	0.0000000
21	0.0000000	0.0000000
22	0.0000000	-16141.61

23	0.0000000	0.0000000
24	0.0000000	0.0000000
OBJECTIF	0.2377820E+09	1.000000
SURFACE_TOTALE	0.0000000	0.1045614E+08
SURFACE_MANIOC	0.0000000	-7311449.
SURFACE_PLANTAIN	0.0000000	-0.1041336E+08
EAUDISPONIBLE	0.0000000	4006.478
WAVRIL	79.42245	0.0000000