

CIHEAM



Centre
International
de Hautes Etudes
Agronomiques Méditerranéennes

*International
Centre for
Advanced
Mediterranean Agronomic Studies*

Thèse / Thesis

requis pour
l'obtention du Titre

*submitted
for the Degree of*

Master of Science

**Les mécanismes d'allocation
intersectorielle et intra annuelle
de l'eau : le cas particulier
des centrales hydroélectriques
et de l'irrigation**

Rémi Vigo

Série "Master of Science" n°74
2005

**Institut Agronomique Méditerranéen de
Montpellier**



**Les mécanismes d'allocation
intersectorielle et intra annuelle
de l'eau : le cas particulier
des centrales hydroélectriques
et de l'irrigation**

Rémi Vigo

Série "Master of Science" n°74
2005

**Les mécanismes d'allocation intersectorielle et intra annuelle de l'eau :
Le cas particulier des centrales hydroélectriques et de l'irrigation**

Rémi Vigo

Série "*Master of Science*" n°74
2005

Série Thèses et Masters

Ce *Master* est le numéro 74 de la série Thèses et *Masters* de l'Institut Agronomique Méditerranéen de Montpellier.

Cette collection réunit les thèses *Master of Science* du CIHEAM-IAMM ayant obtenu la mention « Publication », ainsi que les travaux doctoraux réalisés dans le cadre des activités scientifiques et pédagogiques de l'Institut et de ses enseignants-chercheurs.

La thèse *Master of Science* du Centre International de Hautes Etudes Agronomiques Méditerranéennes :

Les mécanismes d'allocation intersectorielle et intra annuelle de l'eau : le cas particulier des centrales hydroélectriques et de l'irrigation.

a été soutenue par Rémi Vigo mai 2003 devant le jury suivant :

M. G. Flichman, enseignant-chercheur, CIHEAM-IAM Montpellier, Président

Mme S. Morardet, chercheur, CEMAGREF, Montpellier Membre

Mme F. Jacquet, enseignant-chercheur, CIHEAM-IAMM, Montpellier Membre

Le travail de recherche a été encadré par Mme F. Jacquet.

Le texte a été mis en forme pour cette publication par l'Atelier d'édition de l'Institut de Montpellier.

CIHEAM-IAMM
Institut Agronomique Méditerranéen de
Montpellier

Directeur : Vincent Dollé

3191, route de Mende – BP 5056
34093 Montpellier cedex 05
Tél. 04 67 04 60 00
Fax : 04 67 54 25 27
<http://www.iamm.fr>

L'Institut Agronomique Méditerranéen
n'entend donner aucune approbation ni improbation
aux opinions émises dans cette thèse

Ces opinions n'engagent que leur auteur

ISBN : 2-85352-303-9. ISSN : 0989-473X

Numéros à commander au :
CIHEAM-IAMM
Bureau des Publications
e-mail : balmeffrezol@iamm.fr

Prix : 50 €

© CIHEAM, 2005

**Les mécanismes d'allocation intersectorielle et intra annuelle de l'eau :
Le cas particulier des centrales hydroélectriques et de l'irrigation**

Rémi Vigo

Série "*Master of Science*" n°74
2005

Fiche bibliographique

Vigo (Rémi) — *Les mécanismes d'allocation intersectorielle et intra annuelle de l'eau : le cas particulier des centrales hydroélectriques et de l'irrigation* - Montpellier : CIHEAM-IAMM, 2003 – 111 p. (thèse Master of Science, IAMM, 2005, Série Thèses et Masters n°74)

Résumé : L'objet de notre étude a été de déterminer s'il existe pour les différents utilisateurs de la ressource en eau stockée dans les barrages hydroélectriques des procédures de gestion concertées qui permettent de dégager un plus grand bénéfice pour la société dans son ensemble. Afin de le déterminer, nous avons en correspondance avec le principe de l'optimalité Parétienne dans la programmation multi objectif, appliqué la méthode de programmation stochastique discrète. Les résultats de notre travail ont permis de déterminer : tout d'abord qu'au moins un des objectifs de l'activité hydroélectrique n'est pas en conflit avec l'objectif de l'activité agricole ; ensuite que la gestion concertée de la ressource en eau, si elle respecte les hypothèses que nous avons émises, permet effectivement de dégager une plus value par rapport aux modes de gestion individuelle. Nous n'avons développé que quelques unes des modalités de coopération possible entre les deux secteurs, aussi en reste-t-il certainement d'autres qui devront être explorées afin de répondre à la volonté de l'Etat concernant l'ouverture des barrages hydroélectriques au multi usage.

Mots-clés : Allocation de l'eau – optimalité parétienne – Programmation stochastique discrète – gestion concertée – hydroélectricité – agriculture – multi usage – prise de décision séquentielle.

The mechanisms of intersectoral and intra-annual water allotment: the special case of hydroelectric power stations and irrigation

Abstract: *The aim of the study was to determine whether concerted management procedures exist for the various users of water impounded by hydroelectric dams in order to give greater benefit to society as a whole. This was performed by applying the discrete stochastic programming method in relation with Paretian optimality in multi objective programming. The results first showed that at least one objective of hydroelectric activity does not conflict with the farming objective and then showed that if the concerted management of water resources respects the hypothesis put forward, it is indeed possible to do better than individual management methods. Only a few of the possible procedures for cooperation between the two sectors are discussed and there are certainly others that should be explored to respond to the government's wish to make hydroelectric dams multi-use facilities.*

Keywords: *Water allotment, Paretian optimality, discrete stochastic programming, concerted management, hydroelectricity, agriculture, multi-use, sequential decision making*

Remerciements

Merci à Florence JACQUET qui m'a guidé à travers les méandres de la programmation stochastique discrète.

Merci à Guillermo FLICHMAN pour ses idées et ses conseils.

Merci à Philippe LEGRUSSE qui m'a donné du travail quand la bise fut venue et que je me trouvais fort dépourvu.

Merci à mes parents qui m'ont patiemment (et parfois impatiemment) soutenu au cours de mes longues, très longues, études.

Merci aux amis d'ici et d'ailleurs que j'ai pu rencontrer au CIHEAM-M.

Merci aux chercheurs et étudiants qui ont eu l'amabilité d'écrire tous ces ouvrages dont je me suis inspiré pour ma thèse.

Table des matières

Liste des sigles	3
Liste des figures	4
Introduction générale	5
I. Augmentation de la demande.....	5
II. Stabilisation de l'offre.....	6
III. Une pression croissante sur les ressources hydriques	6
Chapitre I. L'eau pour l'hydroélectricité et l'irrigation	
I. Intérêt de la ressource pour les secteurs.....	9
1. La part de l'énergie hydroélectrique.....	9
2. La part de l'agriculture	10
II. La compatibilité des retenues d'eau à but énergétique et des besoins en irrigation pour l'agriculture.....	12
1. Compatibilité technique et économique.....	12
2. Compatibilité institutionnelle.....	14
Chapitre II. Méthodologie	
I. Objectifs et positionnement dans le cadre de la théorie économique	17
1. Le bien-être social dans les différentes théories	17
2. Intérêt et limites	21
II. Le bénéfice social maximal s'atteint par la théorie de l'efficacité économique, (H1).....	22
1. Définition.....	22
2. Intérêts et limites.....	23
III. Dissociation temporelle de la comparaison des bénéfices marginaux (H2).....	23
1. Priorité naturelle du concessionnaire hydroélectrique	24
2. Prise de décision séquentielle et théorie d'allocation des ressources	24
3. Limites	25
IV. La réutilisation de la ressource et la coopération entre les deux secteurs permet d'augmenter le bénéfice total des deux secteurs/le bénéfice social (H3).....	26
1. Justification de l'hypothèse	26
2. Les différentes formes que peut prendre la coopération	27
Chapitre III. Présentation du modèle	29
I. La programmation stochastique discrète.....	29
1. Nature séquentielle du processus de décision.....	29
2. Prise en compte du risque	29
3. Limites	30
II. L'horizon de modélisation	30
1. Durée de la période.....	30
2. Analyse des périodes déterminantes pour les secteurs étudiés	31
III. Spécification du problème de décision stochastique séquentielle	34
IV. Construction d'une fonction objectif.....	36
1. Terminologie et concepts fondamentaux	36
2. L'efficacité comme objectif.....	38
V. La programmation multi objectif dans notre modèle	40
1. L'approche multi objectif dans notre modèle.....	41
2. Optimalité parétienne.....	42
3. Méthode choisie.....	43

Chapitre IV. Le modèle	45
I. Modélisation de l'hydroélectricité	45
1. Modélisation du réservoir.....	45
2. Calcul du bénéfice marginal.....	50
3. Détermination de la fonction objectif de l'activité hydroélectrique.....	57
II. Modélisation de l'irrigation.....	59
1. Modélisation de la réserve utile (et autres caractéristiques agronomiques)	64
2. Calcul du bénéfice marginal.....	70
3. Fonction objectif.....	74
III. Modélisation des événements (états de la nature)	75
1. Définition de la loi de probabilité entre les différents états de la nature	75
 Chapitre V. Simulations	 79
I. Simulations sur les données initiales.....	79
1. Présentation du modèle de base.....	79
2. Simulations visant à vérifier la sensibilité du modèle par rapport aux données initiales	87
II. Simulations sur la fonction objectif.....	92
III. Simulations sur les hypothèses	92
1. Efficience économique (hypothèse 1)	95
2. Intégration de la prévision (hypothèse 2)	97
3. Réutilisation de la ressource (hypothèse 3)	99
 Conclusion	 103
 Bibliographie	 105

Liste des abréviations

EDF :	Electricité de France
ETM :	Evapotranspiration Moyenne
ETP :	EvapoTranspiration Potentielle
ETR :	Evapotranspiration Réelle
F :	Franc
Ha :	Hectare
HC :	Hauteur de chute
KWh :	Kilo Watt Heure
Kc :	Facteur cultural
M ³ :	Mètre cube
MG :	Maïs Grain
MS :	Maïs Semence
NRJ :	Electricité
Qx :	Quintaux
RU :	Réserve Utile
RUF :	Réserve Utile Facile
RS :	Réserve Utile Stress
S :	Superficie du barrage

Liste des figures

Tableau 1 : Volume des précipitations en m ³ par hectare	36
Figure 1 : Simulation de base ; prélèvements d'eau	80
Figure 2 : Simulation de base ; revenu	80
Figure 3 : Simulation un : prélèvements et profits de l'activité hydroélectricité	82
Figure 4 : Simulation un : valeur de l'eau en électricité.....	82
Figure 5 : Profit par activité en fonction du mode de conduite des cultures	84
Figure 6 : Rendement de l'activité hydroélectrique en fonction du mode de conduite de l'agriculture	85
Figure 7 : Déviation de la production électrique de l'unité par rapport à la demande d'EDF.....	85
Figure 8 : Revenu par activité en fonction du niveau initial (XI) du barrage.....	88
Figure 9 : Energie moyenne dégagée par la chute d'un m ³ d'eau	88
Figure 10 : Répartition des prélèvements d'eau par activité dans le cas d'un niveau initial du barrage (XI) égal à 600000m ³	89
Figure 11 : Répartition des prélèvements d'eau, niveau initial égal à 400000m ³	89
Figure 12 : Prélèvements pour l'électricité en fonction des dimensions du réservoir	90
Figure 13 : Revenu par secteur d'activité en fonction des dimensions de l'ouvrage	91
Figure 14 : Valeur dérivée de l'utilisation d'unm3 d'eau en fonction des dimensions du barrage	91
Figure 15 : Programmation multiobjectif : réalisation des objectifs par simulation	94
Figure 16 : Profit par simulation et par activité.....	94
Figure 17 Prélèvements d'eau en fonction du poids donné à chaque activité:	96
Figure 18 : Revenu en fonction de la pondération apportée à chaque activité	96
Figure 19 : Comparaison du revenu par activité et par type de simulation	98
Figure 20 : Comparaison des prélèvements d'eau entre la simulation de base et la simulation sur l'hypothèse deux	98
Figure 21 : Revenu des activités : la simulation de base par rapport à l'introduction de la possibilité de réutilisation	100
Figure 22 : Volume d'eau (m ³) utilisés pour l'irrigation et leurs origines	100
Figure 23 : Répartition des prélèvements directs et réutilisation pour le maïs grain.....	101
Figure 24 : Répartition des prélèvements directs et réutilisation pour le maïs semence	101
Figure 25 : Profit obtenu en fonction de la possibilité de recourir ou non à des prélèvements directs	102

Introduction générale

« Dans beaucoup de pays et régions du monde, les difficultés à satisfaire la demande croissante en ressources hydriques et à préserver leur qualité s'accroissent. » (Blanco Fonseca, 1999).

La question de la raréfaction des ressources en eau douce de bonne qualité et de l'importance qu'il était nécessaire de lui accorder a été amplement débattue au cours des dernières années. Cependant, il est nécessaire de relativiser le caractère dramatique du terme « raréfaction » car l'ONU considère qu'actuellement, les ressources en eau douce utilisées dans le monde ne correspondent approximativement qu'à la moitié des ressources disponibles. Dès lors, peut-on qualifier cette ressource de « rare », alors que son offre peut, potentiellement, être multipliée par deux ?

Nous allons donc déterminer, dans les trois points ci-dessous, s'il existe réellement une compétition grandissante pour l'utilisation de l'eau dans le monde, et quelles en sont les raisons.

I. Augmentation de la demande

1. Croissance démographique et augmentation de la demande en eau potable et pour les usages urbains

La demande d'eau pour des usages domestiques devrait croître considérablement dans les prochaines années dans les pays en voie de développement. Dans une étude récente, l'Organisation des Nations Unies rappelle que près de 1,1 milliard de personnes manquent d'eau potable et que 2,9 milliards de personnes ne disposent pas de services d'assainissement, et estime que les problèmes d'approvisionnement en eau dans les pays en voie de développement se verront aggravés par le taux élevé de croissance de la population et la concentration graduelle de la population dans les grandes villes (ONU, 1997 in Blanco).

A. Croissance démographique et augmentation de la demande en produits agro alimentaires

Au niveau de l'irrigation, entre 1960 et 1995, l'utilisation de l'eau en agriculture a augmenté de plus de 60 % au niveau mondial (ONU, 1997 in Blanco).

Si les prévisions sur les taux de croissance démographique se réalisent, alors la demande en produits agro alimentaires devrait suivre une évolution au moins parallèle, et le développement des périmètres irrigués apparaît comme une des rares alternatives (OGM¹, cultures hors sol) pouvant y répondre.

B. Multiplication des usages de l'eau

L'industrie nécessite de grands volumes d'eau, bien que la majeure partie retourne au système, mais sous la forme d'eaux résiduelles. Dans les pays les plus développés, l'usage industriel de l'eau tend à se stabiliser ou à diminuer, grâce aux possibilités que le recyclage de l'eau offre à ce secteur. En France, l'usage de l'eau dans l'industrie a diminué notablement (de 20 % depuis les années 1980), principalement grâce à la disparition d'industries traditionnelles très consommatrices d'eau, et grâce aux efforts réalisés pour améliorer l'efficacité énergétique et réduire la pollution (Montginoul et Rieu, 1996 in Blanco).

Au niveau mondial cependant, l'usage industriel de l'eau devrait augmenter considérablement dans les prochaines années, conséquence de l'augmentation des usages industriels de l'eau dans les pays en voie de développement.

¹ OGM : Organisme Génétiquement Modifié

II. Stabilisation de l'offre

1. Coût du développement de nouvelles sources d'eau

Il est important de rappeler que ce sont les sources d'eau les plus faciles d'accès, et donc nécessitant les coûts d'exploitation les plus faibles, qui ont été en priorité exploitées. Aussi, les coûts économiques et environnementaux élevés nécessaires à l'utilisation de nouvelles sources limitent leur potentiel de développement.

2. Pollution et diminution des réserves d'eau utilisable

Si l'on ne peut pas affirmer que la quantité de l'eau contenue sur terre diminue, il est important de faire la différence entre eau utilisable et eau non utilisable. Plus que la quantité, c'est aussi et surtout la qualité des ressources qu'il importe de préserver. Or cette qualité des ressources hydriques est menacée par l'utilisation massive d'intrants chimiques dans l'agriculture, par les effluents pollués des secteurs industriel et urbains. L'eau n'est donc plus réutilisable et ces volumes peuvent être considérés comme perdus (sauf au coût d'un traitement) pour l'activité humaine.

III. Une pression croissante sur les ressources hydriques

S'il est admis que l'offre d'eau ne présente pas un potentiel de croissance parallèle à celui de la demande, les situations de rareté de l'eau vont se multiplier, en conférant à l'eau une valeur sociale croissante, renforcée par la plus grande prise de conscience des problèmes environnementaux. En conséquence, il existe chaque fois moins de possibilités d'allouer plus d'eau aux usages agricoles et une plus grande pression pour transférer l'eau du secteur agricole vers les secteurs urbains et industriels.

Notre travail veut s'inscrire dans l'optique d'une meilleure gestion de la ressource eau entre les différents usages.

Objectif du travail de recherche :

Nous venons donc de mettre en évidence l'existence d'une concurrence forte, et qui s'intensifiera probablement dans les années à venir, entre les différents secteurs d'activités pour l'utilisation des ressources en eau. Cependant, cette tendance, et c'est là l'objet de notre travail, peut être enrayé par la mise en place de différentes pratiques d'utilisation coordonnée de la ressource. Nous pensons que les acteurs économiques qui sont actuellement en compétition, peuvent devenir partenaires dans la gestion de la ressource et en dériver un gain économique et social net. Cette constatation constitue le point de départ de notre réflexion.

En effet, dans une première partie, nous montrerons qu'une même unité d'eau peut être utilisée par un secteur amont, et être réutilisée par un secteur aval.

Dans une seconde partie, nous présenterons les modalités de double utilisation de la ressource, et les facteurs de décisions qui la justifient.

Dans la troisième et la quatrième partie, sera décrit le modèle informatique que nous avons réalisé, et qui a pour fonction de déterminer les modalités de double utilisation, tout en prenant en compte les aléas climatiques passés, présents et à venir.

La cinquième partie, enfin, sera consacrée à l'analyse des résultats des simulations effectuée, et de leur caractère probant (ou non) par rapport aux hypothèses émises de double utilisation de l'eau par des acteurs différents, et des gains qu'ils peuvent en retirer.

Afin de limiter le champ de notre étude, ce qui est souvent nécessaire lorsqu'on adopte un modèle de programmation stochastique, nous nous intéresserons au secteur de production hydroélectrique et à celui de l'agriculture, qui nous paraissent présenter un des plus forts potentiels de réutilisation de la ressource en eau.

Il sera néanmoins possible, par la suite, d'étendre ce modèle à d'autres secteurs d'activités, et peut-être pourra-t-on réduire par ce biais les antagonismes existants et qui vont en s'accroissant.

Chapitre I

L'eau pour l'hydroélectricité et pour l'irrigation

I. Intérêt de la ressource pour les secteurs

1. La part de l'énergie hydroélectrique

A. En France

« En France, l'eau est la première source d'énergie renouvelable. En 1999, la production d'énergie hydroélectrique d'EDF a totalisé 69 milliards de KWh, soit presque 15 % de la production totale d'EDF. Ainsi, grâce à l'énergie hydraulique, la France occupe le premier rang des producteurs d'électricité à partir d'énergie renouvelable de l'Union Européenne². (...) »

Les installations hydroélectriques d'EDF représentent actuellement une puissance installée de 23300 MW, soit 25 % de la puissance totale du parc de production national, l'équivalent de 25 réacteurs nucléaires de 900 MW. EDF exploite 550 centrales hydroélectriques (allant de quelques dizaines de kilowatts de puissance à plusieurs centaines de mégawatts), 220 barrages dont 150 grands barrages (plus de 20 m de haut). » (EDF, 2000)

On estime généralement que vers 2020 la consommation mondiale d'électricité devrait augmenter de 50 à 100 %. Si l'énergie hydraulique ne représente actuellement que 18 % de la production d'électricité, seulement 1/6^{ème} du potentiel est utilisé. Cette énergie, au regard de l'épuisement progressif des énergies fossiles pourrait apporter une réponse pour l'avenir.

B. La dimension des ressources en eau mobilisées

Les ressources en stock dans les grands lacs réservoirs s'élèvent en France à 11 milliards de m³ par an, volume qui dépasse l'écoulement mensuel moyen de l'ensemble des fleuves et rivières métropolitaines. Elles couvrent 11 % des ressources disponibles (Barraque, 1995 in Pillet). » « Les usages des ressources en stock dans les barrages réservoirs se répartissaient en 1990, entre l'usage hydroélectrique, présent sur 55 % des réservoirs, l'approvisionnement en eau potable, sur 19 %, l'irrigation sur 14 %, le soutien d'étiage sur 6 % et la navigation sur 3 % » (IFEN, 1993 in Pillet).

C. L'importance de la ressource dans ce secteur d'activité

a) Une production stable

La souplesse d'utilisation de l'énergie hydroélectrique permet d'abord d'économiser le combustible nucléaire et fossile. L'hydroélectricité ne dépendant pas des conditions d'achat de combustibles, elle permet de proposer aux consommateurs des tarifs plus stables.

b) La possibilité de stocker de l'électricité

Dans l'état actuel des techniques, les barrages sont la seule façon efficace de « stocker » de l'électricité, et donc d'offrir la souplesse nécessaire permettant de répondre aux fluctuations quotidiennes de la demande d'électricité. « En quelques minutes, une puissance de 14000 MW peut être disponible (2 minutes

² En 1998, la France a produit près de 70 milliards de kilowatt heures à partir d'énergie renouvelables, contre 48 milliards pour l'Italie, 29 pour l'Espagne, 21 pour l'Allemagne et 5 pour la Grande Bretagne en 1994.

suffisent à l'usine de Grand Maison dans les Alpes pour mettre à disposition ses 1800 MW de puissance, soit l'équivalent de deux tranches nucléaires de 900 MW)». (EDF, 2000)

Cette rapidité d'intervention permet de faire face dans un délai très court à des situations imprévues : les aléas climatiques qui modifient à la hausse la demande d'électricité, indisponibilité imprévue des moyens de production (combustible), incident sur le réseau de transport d'énergie.

« Cette souplesse de fonctionnement fait de l'hydroélectricité le régulateur du réseau électrique français. En permettant d'adapter constamment la production à la demande, l'énergie hydraulique est le complément idéal de la production nucléaire et thermique à flammes. » (EDF, 2000).

Elle permet ainsi d'atténuer et absorber le risque de rupture de l'offre pour EDF.

2. La part de l'agriculture

A. En France

L'irrigation s'est fortement développée en France depuis 1970.

Tableau 1. Evolution de l'irrigation en France de 1970 à 1995

	1970	1975	1979	1988	1990	1995
% d'équipement de la SAU*	1,8 %	2.2	4.5	6.3	7.4	8.9
% d'exploitations équipées	8.4 %	10.2	11.8	13.4	15	16.8

SAU* Surface Agricole Utile

Source : RGA (Recensement Général Agricole) in Rainelli, 1997.

B. La dimension des ressources en eau mobilisées

Actuellement, les besoins en eau d'irrigation en France sont évalués à 7,5 milliards de m³ par an. (IFEN, 1993 in Pillet)

Ils se répartissent comme suit :

- Régions méditerranéennes ; 9 années sur 10, besoin d'au moins 100 mm d'eau d'irrigation.
- Aquitaine, Midi-Pyrénées, Centre, Poitou-Charentes et Vallée du Rhône ; 7 années sur 10, besoin d'au moins 100 mm d'eau d'irrigation.

C. L'importance de la ressource dans ce secteur d'activité

a] *L'agriculture est une activité très intensive en eau*

Le processus physique de la production de biomasse nécessitant l'évaporation de grandes quantités d'eau, l'agriculture peut donc être principalement définie comme un utilisateur consommateur d'eau. Là où les précipitations sont insuffisantes ou très irrégulières, la mise en irrigation a permis d'augmenter ou stabiliser les rendements des cultures et de diversifier les productions (notamment celles à forte valeur ajoutée). Dans les dernières décades, le développement de l'irrigation a significativement contribué à la rapide croissance de la production agricole mondiale.

De plus, les caractéristiques particulières de l'eau font que le transport et la distribution de la ressource ne s'opère généralement pas sans une perte importante de volume par évaporation et infiltration (Blanco, 1999).

Le mode de gestion d'EDF

EDF dispose de plusieurs **types d'unités** de production d'énergie qui ont chacune des caractéristiques différentes quant à leur gestion. En effet, par exemple, la maintenance et la mise en place du combustible dans une centrale nucléaire nécessite trois mois alors que certaines actions doivent être réalisées d'une heure à l'autre.

C'est pourquoi les modèles nationaux et régionaux sont eux-mêmes divisés en trois niveaux.

- ❑ La prévision et le planning à **moyen terme**, qui prend place quelques fois par mois, sur un cadre/plan de 1 à 5 ans ;
- ❑ Le planning à **court terme**, qui se réalise plusieurs fois par jour pour une durée de quelques jours ;
- ❑ Le système en **temps réel**, qui peut durer entre quelques minutes et quelques heures.

Afin d'avoir une idée des **contraintes** et **objectifs** que peut avoir EDF en tant que concessionnaire de service public (même si ouverture partielle au marché européen de l'énergie), nous allons brièvement décrire les trois niveaux de planning d'EDF :

- ❑ La gestion nationale à moyen terme

Il s'agit du planning de réapprovisionnement des centrales thermiques, des opérations de maintenance et des lâchers d'eau. L'objectif est de réduire les **coûts** de production, et de satisfaire la **demande** avec une probabilité raisonnable. Schématiquement, EDF utilise l'énergie nucléaire pour satisfaire la demande de base, les sources d'énergies plus chères (gaz, fuel..) quand ce dernier n'est pas suffisant, et l'hydroélectricité pour les pics de demande. Les deux **indicateurs** principaux générés sont le **coût marginal** de la production d'électricité et la **valeur d'usage** de l'eau stockée dans les réservoirs.

- ❑ La gestion régionale à moyen terme

Comme les 18 réservoirs du parc hydroélectrique français possèdent des **caractéristiques différentes** (volume maximal, efficacité de génération, recharge en eau etc..), les économies qu'un même volume d'eau stockée peut permettre dans le futur sont différents. L'objectif est de **maximiser**, pour chaque ouvrage, la **valeur** de la génération estimée avec le coût marginal de l'électricité (économie futures).

Ce point est très important car c'est ce qui distingue la gestion d'EDF d'autres formes de gestion qui sont basées sur l'optimisation de la production électrique.

- ❑ La gestion à court terme et en temps réel

Au cours d'une journée, l'on peut considérer que la demande électrique et les entrées d'eau peuvent être estimées avec une grande **précision**, ce qui permet l'utilisation d'un modèle **déterministe**.

L'objectif, au niveau national, est de **minimiser les coûts** de production tout en satisfaisant la **demande** et en conservant une **réserve** de production pour le cas d'une soudaine augmentation de la demande ou d'une panne d'une unité.

b) Rareté de l'eau et sécurité alimentaire

On estime que l'irrigation a été l'un des principaux facteurs qui ont contribué à la rapide croissance de la production alimentaire enregistrée dans les dernières décades. Ainsi la FAO, à l'occasion du *Congrès Mondial de l'Alimentation*, célébrée en novembre 1996, a estimé que l'agriculture irriguée contribue actuellement à 49 % de la production mondiale d'aliments, alors qu'elle ne couvre que 17 % de la superficie cultivée. Elle estime que, dans le futur, 80 % de l'accroissement de la production alimentaire sera le fait des cultures irriguées. Mais si l'on compare cet accroissement à celui de la demande en produits alimentaires, on comprend qu'il sera de plus en plus difficile de satisfaire les besoins en eau pour l'irrigation.

Ainsi, certains auteurs (Seckler, 1996) estiment que le transfert d'eau en direction des secteurs industriel, urbain ou environnemental, affectera considérablement la capacité mondiale de production d'aliments. C'est à ce niveau que se positionne notre analyse qui, plutôt que de privilégier la dimension de compétition pour la ressource entre les secteurs industriels et agricoles, cherche à mettre en évidence les possibilités de coopération.

c) L'irrigation comme élément réducteur de risque

De nombreux travaux montrent que l'irrigation diminue le coefficient de variation inter annuelle des rendements des cultures relativement aux mêmes cultures non irriguées, ce qui a permis l'accès à certains marchés qui exigent une production stable et de grande qualité (ex : maïs semence) mais ce qui peut générer l'apparition d'autres risques (Boussard, 1997), notamment le risque de ne pas disposer de l'eau suffisante au moment précis.

II. La compatibilité des retenues d'eau à but énergétique et des besoins en irrigation pour l'agriculture

Nous venons de présenter les deux secteurs étudiés dans leurs dimensions et caractéristiques principales, tout en montrant quel enjeu l'utilisation des ressources en eau représente pour eux. On peut maintenant s'interroger pour savoir si ces deux secteurs sont vraiment antagonistes quant à l'appropriation de la ressource, ou s'il est au contraire possible de dépasser cette rivalité afin de l'allouer pour le meilleur profit des deux parties.

Il convient d'abord de vérifier si cette coopération est possible d'un point de vue technique et économique, avant que de déterminer si elle est souhaitée d'un point de vue institutionnel et politique.

1. Compatibilité technique et économique

A. La production hydroélectrique ; une simple utilisation non consomptive de l'eau

« Quand on se réfère aux utilisations de l'eau, il est courant de différencier entre les utilisations consomptives, qui impliquent la perte (par évaporation, etc..) d'une part significative du volume de l'eau utilisée, et les utilisations non consommatrices, quand pratiquement la totalité des volumes d'eau utilisés est restituée sans altération notable de leur qualité » (Blanco Fonseca, 1999). Peu d'activités humaines correspondent à la définition d'une utilisation non consommatrice de l'eau. L'agriculture consomme de grandes quantités d'eau par évapotranspiration, percolation etc. L'eau potable est consommée ou utilisée et dégradée (effluents urbains etc...). Les industries utilisent parfois de grandes quantités d'eau sans les consommer, avant de les rejeter dans le milieu. Cependant, elles altèrent en général les caractères physico-chimiques de cette eau, auquel cas elles ne peuvent pas être considérées comme des usages non consomptifs.

A l'exception de certaines industries non polluantes et des utilisations touristiques et paysagères, il n'y a guère que l'utilisation d'eau pour la génération d'énergie électrique qui puisse être qualifiée d'une utilisation non consomptive. L'eau utilisée peut donc être réutilisée.

Le sujet de cette thèse étant d'étudier les possibilités de réutilisation de cette ressource, non consommée, par l'agriculture, nous allons donc chercher dans un premier temps à déterminer quels sont les facteurs de compatibilité et de non compatibilité entre ces deux activités.

Cette compatibilité provient du caractère non consommif de l'utilisation de l'eau pour la génération d'énergie, qui s'observe dans les deux conditions ci-dessous :

a) Restitution de la quasi totalité des volumes d'eau utilisés

D'abord, bien qu'à court terme lors de la mise en service de l'ouvrage de rétention d'eau, il faille procéder à son remplissage jusqu'à un volume minimal permettant son fonctionnement (ce que nous qualifierons de « niveau bas »), et que cette quantité d'eau restera « captive » jusqu'à la destruction de l'ouvrage, elle sera néanmoins rendue au milieu naturel à terme.

Ensuite, bien qu'il existe des pertes d'eau par infiltration et évaporation au niveau des barrages, celles-ci restent limitées et retournent dans le cycle hydrologique naturel.

On peut donc considérer que « pratiquement la totalité des volumes d'eau utilisés est restituée » et devient disponible pour les activités agricoles situées en aval.

Remarque

Du point de vue de la quantité d'eau disponible, on estime que les barrages représentent un volume d'eau potentiellement disponible au moins égal à la demande agricole (7,5 milliards de m³ d'eau contenus dans les retenues de barrages, soit les trois quarts des réserves d'eau de surface en France ; source EDF).

b) Pas de modifications conséquentes des caractères physico-chimiques

En ce qui concerne cette seconde condition, l'eau utilisée (mais non consommée) par l'industrie énergétique ne fait l'objet d'aucune modification physico-chimique et elle est donc immédiatement réutilisable en l'état par les exploitations agricoles situées en aval. En effet, dans le cas des barrages hydroélectriques, l'eau n'est pas consommée mais simplement stockée puis utilisée et enfin relâchée, et ce sans altération de qualité (si ce n'est une légère élévation de température). Elle est donc libre de poursuivre son cycle naturel ainsi que d'être postérieurement réutilisée par d'autres agents économiques.

La qualité de l'offre correspond donc à la qualité voulue par la demande.

B. Problèmes d'ajustement

a) temporel (les cycles agricoles et de demande en énergie sont indépendants)

Alors que la demande d'eau d'irrigation est la plus forte au printemps et en été, la demande d'électricité est la plus forte en automne et en hiver : « En hiver, une baisse de température d'un degré Celsius augmente la puissance consommée en France de 1 giga Watt, sur environ 50 à 70 GW. » (Alexandre Parisot in *Science et vie* n°214). L'eau est donc relâchée à ce moment-là, sans réel bénéfice pour l'agriculture qui utilise déjà l'eau des précipitations.

Il faut à ce moment faire un choix.

Historiquement, EDF en tant que concessionnaire de la force hydraulique est habituellement prioritaire (de par sa localisation géographique en amont des superficies irriguées et de par sa priorité temporelle

dans le cycle climatique) dans l'utilisation de la ressource et l'utilise pour optimiser son bénéfice, en ne prenant que peu en compte les besoins futurs du secteur agricole.

b) spatiaux

L'eau relâchée par les barrages s'écoule gravitairement non plus en suivant son cours naturel, mais en suivant le lit artificiel aménagé pour cela par le concessionnaire hydroélectrique. Pour pouvoir récupérer cette eau, les agriculteurs situés en aval doivent donc investir dans des procédés de captation.

Cependant, l'établissement de ces systèmes s'accompagne de coûts de construction, de fonctionnement et d'organisation et maintenance. De plus, les terres situées à proximité du cours d'eau bénéficieront *de facto* d'une priorité naturelle, alors que les plus éloignées subiront les plus grands coûts tout en étant les plus mal fournies au niveau de l'irrigation.

2. Compatibilité institutionnelle

A. Evolution historique

L'ensemble des ressources en eau du territoire a été réparti en trois catégories principales dès 1898 par le Régime Général des Eaux :

- Les grands lacs réservoirs et aménagements hydroélectriques, ainsi que les rivières navigables et les lacs, disposent du statut de ressources *res publica* : elles appartiennent au domaine public ;
- Les « eaux closes » sont propriété privée des riverains ;
- L'ensemble des ressources restantes appartiennent à tous – *res communes* – ou à personne en particulier- *res nullius*.

La loi de 1919 relative à la production d'hydroélectricité, stipule que la force hydroélectrique appartient au domaine Public. L'Etat « ... a le pouvoir de disposer des marées, des lacs et des cours d'eau » (art. 1 de la loi sur l'eau).

La loi du 16 octobre 1919 rajoute que « nul ne peut disposer de l'énergie des marées, des lacs et des cours d'eau, quelque soit leur classement, sans concessions ni autorisations de l'Etat ». Ce texte est toujours en vigueur aujourd'hui et c'est donc l'Etat qui donne à EDF l'autorisation ou la concession pour exploiter un aménagement hydraulique.

En 1990, sous la pression des épisodes de sécheresse particulièrement marqués des années 1989-1990, une Convention Cadre fut passée entre l'Etat et EDF, afin de faciliter et d'encadrer en termes institutionnels l'ouverture des sites au multi-usage : le Protocole Sécheresse du 16 mai 1990.

Ainsi, « la mise à disposition de la ressource devait devenir la règle générale et non plus un événement exceptionnel imposé par l'urgence », événement géré auparavant par arrêtés préfectoraux, selon Michel Rocard, Premier Ministre, signataire de cette convention (Gouverne, 1994 in Pillet). Cette convention est dite proposée dans un souci de « rentabilité collective » (art 6). Mais la nouvelle loi sur l'Eau de 1992 prévoit que « la force motrice devient une des ressources de l'unité hydrographique locale. Les concessionnaires, l'usage hydroélectrique et autres usagers, deviennent des usagers comme les autres. »

Cependant, si la loi de 1992 stipule dans son article premier que « l'usage de l'eau appartient à tous... », elle rajoute néanmoins « ...dans le cadre des lois et règlements ainsi que des droits antérieurement établis » et par là ne revient en définitive pas sur le droit défini en 1898 par le Régime Général des Eaux. Toujours dans la loi sur l'eau de 1992, il est précisé que les objectifs de « préservation des écosystèmes..., de valorisation de l'eau comme ressource économique et de répartition de cette

ressource » (art 2) doivent chacun contribuer à « l'intérêt général » (art. 1). Pour sa part, le Protocole Sécheresse parle de « rentabilité économique...et collective » de la ressource.

L'intérêt du débat actuel vient du fait qu'au niveau local, autour des aménagements hydroélectriques, les demandes d'accès aux sites se sont multipliées, sous l'effet des tensions nées du développement des usages locaux et des épisodes de sécheresse sur les années 1989-1990, mais aussi et surtout compte tenu de l'arrivée à terme de la grande majorité des concessions hydroélectriques françaises prévues pour les années 2000-2020.

B. Obligation et difficultés de la gestion intégrée

- Définition et mise en œuvre des procédures de concertation

Appliquée à la gestion de l'eau en France, le terme de gestion concertée est d'usage pour qualifier les procédures d'élaboration des conventions d'ouverture au multi-usage des sites hydroélectriques et, plus généralement, des Schémas Directeur d'Aménagement et de Gestion de l'Eau (SDAGE) et des contrats de rivière. Les premiers sont le produit expérimental du protocole Sécheresse de 1990 signé entre EDF et l'Etat, les seconds le produit désormais institutionnalisé de la loi sur l'eau de 1992. Enfin, on note que le terme « concerté » n'était pas totalement inconnu en France puisque, dès 1964, il était appliqué à la définition des programmes quinquennaux des Agences de l'Eau.

Dans tous les cas, on constate que l'Etat fait participer les acteurs, mais sans pour autant renier son rôle de régulateur.

La définition juridique de « gestion concertée » est donnée dans La Loi sur l'Eau de 1992: « En France, en référence à la gestion traditionnelle et administrative de l'eau appliquée par mesures unilatérales de l'Etat, la gestion concertée désigne toute politique désormais conduite de manière multilatérale entre acteurs économiques locaux, sous contrôle éventuel de l'autorité régulatrice et appliquée à l'une des ressources de l'eau préalablement identifiée. » (loi sur l'eau de 1992) En définitive, la concertation vise avant tout à coordonner des usages existants, effectifs ou potentiels, soit par réajustement des politiques mises en œuvre par les usagers à titre individuel, soit parfois, par définition et mise en place de nouveaux moyens d'action. L'objectif est la gestion des tensions et interactions locales autour de la rareté des ressources. La collectivité ainsi que chacun des usagers espère à terme tirer profit de cette concertation.

Nous adopterons la définition : « politique de gestion décentralisée d'une ressource dont les bénéficiaires sont reconnus non appropriables, *a priori*, à titre individuel. »

L'application de la Loi sur l'Eau de 1992 pose cependant un certain nombre de questions :

- *Parmi la multitude d'acteurs locaux (associations de pêche et de chasse, riverains, industries utilisatrices d'eau, exploitants agricoles etc...), qui est susceptible d'être partenaire d'une gestion concertée et d'être reconnue comme tel par EDF ?*
- *Quel est le cadre légal qui s'applique à ces transactions et quelle forme juridique doivent prendre les accords qui en découlent ?*

En termes institutionnels, la question des contraintes et des possibilités institutionnelles offertes aux acteurs locaux se pose ainsi : « Dans quel cadre pourraient être examinées et effectuées ces transactions... ? » .

Parmi l'ensemble des interlocuteurs qui se présentaient à EDF, il fallait pouvoir identifier ceux qui étaient en position légale d'être partenaires d'une gestion concertée, et ceux qui ne l'étaient pas.

- Les difficultés (vide juridique et économique)

En termes économiques, se pose la question des bénéfices de la concertation et de l'assurance de leur redistribution au profit d'intérêts publics et non privés :

« une politique concertée contribue-t-elle à réaliser l'objectif pour lequel elle [était] mise en œuvre ? » et « comment s'assurer que le consensus contribue à une amélioration du bien-être collectif net ? » (revue de l'Agence de l'Eau).

Ceci revient à la question suivante : en cas d'ouverture des sites hydroélectriques au multi-usage, comment EDF, entreprise publique, peut-elle être assurée que les préjudices subis par la production hydroélectrique sont compensés par les gains du nouvel usage ?

Cas de transaction monétaire

Si le préjudice subi par EDF est facilement quantifiable en termes monétaires, les gains qui en résultent pour les autres acteurs sont eux parfois difficiles à estimer (agriculture, industries etc..) et dans certains cas n'entrent pas dans l'économie de marché (gains paysagers, écologiques etc...).

Quoiqu'il en soit, si l'ouverture des sites au multi usages doit se faire sur une base monétaire, comment estimer le montant des transactions ?

Est-ce le préjudice subi par EDF (diminution du surplus du producteur), le gain retiré par les bénéficiaires des lâchures (accroissement du surplus du producteur ou de la collectivité) ou encore le coût de mobilisation des nouvelles ressources (coût de l'accroissement de l'offre) ?

(Falgarone, Lesgards , 1993 in Blandine Pillet, 2001)

Parmi l'ensemble des modalités de gestion envisageables, il faut identifier les limites posées en cas de transaction monétaire.

« Dans le cas de lâchures des barrages EDF à des fins non énergétiques, sur quelles références peut-on asseoir le montant des transactions ?

Le préjudice subi par EDF (diminution du surplus du producteur), le gain retiré par les bénéficiaires des lâchures (accroissement du surplus du producteur ou de la collectivité) ou encore le coût de mobilisation des nouvelles ressources (coût de l'accroissement de l'offre) ?».
(Falgarone, Lesgards , 1993 in Blandine Pillet, 2001)

Enfin, parmi l'ensemble des clauses contractuelles envisageables, il existe également des possibilités d'évolution des conventions d'usage vers des « contrats d'assurance risque Sécheresse .. »

Chapitre II : Méthodologie

I. Objectifs et positionnement dans le cadre de la théorie économique

On l'a vu précédemment, si les différents acteurs (économiques et institutionnels) sont d'accord sur le principe de mettre en place des procédures de gestion concertée de la ressource dans le but d'atteindre un bénéfice social maximal, il demeure en pratique certains freins tenant principalement au fait que, dans l'absence d'une définition claire et précise de ce que le régulateur institutionnel entend par « la rentabilité collective maximale »³, les interprétations des acteurs sur sa nature et les moyens d'y parvenir varient.

L'objet de notre travail est donc d'aider à définir la rentabilité collective, ceci afin de favoriser la compréhension de la loi et de produire une information utile lors des processus de négociation et de gestion concertée de la ressource.

Afin de restreindre le champ de notre étude, nous allons nous intéresser à la compétition existant entre le secteur hydroélectrique et le secteur agricole pour l'utilisation de l'eau des barrages et aux possibilités de réutilisation, pour l'irrigation, de l'eau utilisée pour la génération d'électricité.

Cependant, notre approche consistera à aller au delà la dimension sectorielle de la gestion de la ressource.

Avant de préciser la définition de la rentabilité collective (ou bien-être social) que nous avons choisie, nous allons d'abord préciser les différentes dimensions qu'englobe ce terme.

1. Le « bien-être social » dans les différentes théories

L'allocation de l'eau peut se faire en fonction de différents principes parmi lesquels : l'efficacité technique dans l'utilisation de la ressource ; l'équité dans sa distribution ; les objectifs de santé publique et nutrition ; les considérations sur les impacts environnementaux ; les considérations sur les impacts fiscaux ; l'acceptabilité politique et publique des mesures de distribution de la ressource ; la durabilité des projets et leur faisabilité administrative etc...

Etant donné ce nombre très important de conceptions de ce qu'est le bénéfice social, plutôt que de faire une liste non exhaustive de ces différentes théories, nous allons, dans un premier sous-chapitre, déterminer les dimensions dans lesquelles toute théorie visant à déterminer la valeur sociale d'une ressource doit s'inscrire. Nous utiliserons postérieurement cette même grille d'analyse pour exposer la théorie de l'efficacité économique, au sens Parétien, que nous avons choisie.

Dans le second sous-chapitre, nous ferons un aparté concernant les externalités, les raisons pour lesquelles nous n'en traiterons pas dans notre travail, et leur rapide listage non exhaustif.

A. Les différentes dimensions d'une évaluation du bénéfice social

Comme le précise Anne Burill, dans une publication de l'Union Européenne de 1997, « Il faut souligner que le but ne devrait pas être d'optimiser l'efficacité au strict sens économique du mot, mais plus généralement de maximiser le bénéfice social net qui est généré par une quantité donnée d'eau ». (Burill, 1997)

³ Dans la continuité du protocole sécheresse de 1990, la loi sur l'eau de 1992 prévoit l'allocation de la ressource de manière à assurer une « ...rentabilité collective maximale », et a été confirmée par des directives européennes ultérieures.

L'importance de la différence, relevée ici entre ces deux concepts, tient au fait que certains usages de l'eau peuvent avoir peu de valeur économique mais une grande valeur pour la société.

On peut ordonner les composants de la valeur sociale de l'eau, sur la base du système de classification en 4 dimensions proposé par Anne Burill :

- Nature des composantes de la valeur ;
 - ✓ Reproduit sur un marché ;

C'est-à-dire les revenus monétaires, y compris les salaires, générés par l'utilisation d'eau ;

- ✓ Non reproduit sur un marché ;

Tous les autres. En général, il s'agit d'externalités qui ne peuvent être représentées sur un marché ou que l'administration préfère gérer de manière normative.

Exemple : les pouvoirs publics européens, bien que tentant parfois l'expérience de la mise en place de marchés de droit à polluer, ont opté pour l'édiction de lois ou règlement sur la pollution, pour l'instant en tout cas.

- Destinataires de la valeur ;
 - ✓ Individus

Ce sont les composantes de la valeur qui parvient à des acteurs individuels, ou à des groupes d'acteurs facilement identifiables.

Exemple : l'irrigation permet de baisser le coût de production des produits agroalimentaires et donc d'accroître la marge bénéficiaire des exploitants agricoles.

- ✓ Sociétal

C'est la valeur parvenant à la société en tant que tout, sans qu'il soit possible d'identifier précisément les individus ou groupes d'individus qui en bénéficient.

Exemple : la baisse des coûts de production permet de diminuer les prix de vente aux consommateurs, qui bénéficient donc indirectement de l'irrigation.

- Composants temporels
 - ✓ Présent

L'utilisation de la ressource naturelle génère une valeur qui parvient immédiatement aux acteurs.
Exemple : l'hydroélectricité produite est immédiatement vendue

- ✓ Futur

L'utilisation de la ressource naturelle génère une valeur qui ne parvient qu'après un délai plus ou moins long aux acteurs.

Exemple : l'emploi d'une quantité d'eau pour irriguer une culture à un moment précis de l'année (par exemple la phase de floraison) ne génère pas immédiatement une plus value. En effet, il convient d'attendre la récolte et la vente pour que cette valeur devienne une réalité pour l'exploitant agricole.

- Composants spatiaux

✓ Locaux

Une fois identifié les dimensions de la valeur décrites ci-dessus, il est nécessaire de déterminer si elles se réalisent ou non à l'intérieur de la région d'étude.

Exemple : pour reprendre l'exemple concernant les destinataires de la valeur, les agriculteurs bénéficiant de la baisse des coûts de production (individus) se trouvent sur le territoire étudié alors que, dans le cas d'une culture principalement destinée à l'exportation, la société bénéficiant de la baisse des prix en résultant se situe à l'extérieur de cette région d'étude.

✓ Etrangers

Par étranger, on n'entend pas ce qui est hors du territoire national, mais ce qui se situe à l'extérieur de la région d'étude considérée.

Remarque : dans chacune des dimensions décrites ci-dessus, nous avons mis en opposition les deux formes que peuvent prendre chaque dimension de la valeur.

Il ne s'agit pourtant pas de dualité antagoniste. En effet, l'utilisation d'une ressource naturelle peut très bien générer une valeur qui parvienne à la fois aux composantes locales et extérieures, qui profite à la fois à des individus et à la société dans son ensemble, qui soit à la fois représentée sur un marché et régulée par l'Etat, ou qui génère des revenus à la fois à court et à long terme.

B. Positionnement dans la grille d'analyse

Nous allons à présent inscrire l'approche de l'optimum économique Parétien que nous avons retenue dans cette grille d'analyse :

- **Nature des composantes de la valeur**

Nous ne prendrons en compte que les revenus monétaires découlant de l'écoulement de la production des secteurs sur les marchés énergétiques et agroalimentaires. Les salaires générés par l'utilisation d'eau sont volontairement ignorés afin de ne pas complexifier l'analyse.

- **Destinataires de la valeur**

Nous étudions deux groupes d'acteurs : un facilement identifiable qui est le concessionnaire hydroélectrique, l'autre étant un groupe d'agriculteurs supposé homogène et qui s'identifie par référence à la superficie modélisée. Ne nous basant pas sur un cas réel, ce groupe d'agriculteur homogène est plus facile à identifier qu'il ne le serait en réalité, du fait du démembrement des terres. Cependant ces deux catégories d'acteurs et leurs buts se confondent dans notre étude pour préfigurer une sorte de « mini-société », dont l'objectif est de maximiser la rentabilité collective.

- **Composants temporels**

Alors que le concessionnaire hydroélectrique vend immédiatement sa production, l'exploitant agricole doit, lui, attendre la fin du cycle de croissance des cultures avant que de pouvoir les écouler. D'où la nécessité d'aménager cette dualité, ce que nous ferons par notre seconde hypothèse (cf chapitre III).

- **Composants spatiaux**

Ici, les composants spatiaux sont non seulement locaux, puisque l'on ne prend en compte que l'ouvrage hydraulique particulier et non pas le groupe EDF dans son ensemble, mais encore plus spécifié car l'on ne considère pas l'ensemble des agriculteurs du bassin versant mais seulement un groupe homogène d'agriculteurs situés à proximité du barrage.

a) Les externalités

On le sait, en ce qui concerne la gestion des ressources hydriques, les externalités sont nombreuses et de grande importance, et sans doute leur évaluation justifierait à elle seule une autre thèse.

C'est pourquoi, plutôt que de les traiter de façon incomplète, nous n'allons pas les intégrer dans notre travail et nous nous bornons à les présenter rapidement dans les deux points ci-dessous :

- Externalités économiques et sociales

Les externalités découlant de la mise en place de procédures de coordination dans la gestion de la ressource naturelle entre les deux secteurs d'activité peuvent être, par exemple :

- création de travail et activités tiers ;
- meilleure gestion des stocks des intrants agricoles pouvant permettre aux agriculteurs de réaliser des économies ;
- la connaissance des volumes d'eau disponible pour l'irrigation permet de mieux maîtriser l'offre de produits agricoles, et donc conférerait aux agriculteurs un pouvoir de négociation plus important par rapport aux entreprises agroalimentaires ;
- plan de culture.

Si un plan de culture était réalisé (avec un roulement des agriculteurs dans leurs dates de culture), cela pourrait permettre un recours plus important aux CUMA (Coopératives d'Utilisation du Matériel Agricole) (avec donc une diminution des coûts proportionnels en équipement) et de mieux étaler la demande d'eau des agriculteurs et ainsi permettre à EDF de libérer un volume constant et faible (débit d'étaillage) plutôt que de gros lâchers.

- Externalités environnementales

La captation, le stockage et l'utilisation d'une ressource naturelle aussi importante que l'eau, entraîne obligatoirement un grand nombre d'externalités.

- modification des cycles naturels d'écoulement d'eau,
- maintien des agriculteurs et de leur fonction d'entretien du territoire rural,
- utilisation raisonnée et proportionnelle des intrants due à la diminution du risque sur les récoltes (on n'essaye plus de les sauver à tout prix en augmentant les doses d'engrais ou pesticides),
- intérêt paysager,
- non emploi d'énergie plus polluante par EDF (nucléaire, fossiles). Mais l'on peut estimer que le coût de cette externalité est pris (au moins partiellement) en compte dans le prix de l'énergie alternative.

C. Positionnement dans le cadre de l'analyse économique

Comme on l'a dit, nous positionnons notre approche dans le champ de la science économique. Mais ce travail aurait aussi pu s'effectuer en utilisant les outils de l'analyse sociologique, par exemple (dans ce cas, la rentabilité collective maximale serait celle perçue comme telle), ou biologique (effets sur la biodiversité, sur la santé humaine) etc..

Chacune de ces approches possède ses qualités intrinsèques et a le mérite de prendre en compte des facteurs ou impacts non négligeables et difficilement quantifiables d'un point de vue économique, et peut donc apporter beaucoup à l'état des connaissances.

Nous avons pourtant choisi le champ de l'analyse économique, avec ses qualités et imperfections pour les raisons que nous allons évoquer ici.

2. Intérêt et limites

a) Limites

- ❑ Il faut reconnaître que pour que l'outil économique puisse saisir l'essence de la réalité, il faut d'abord simplifier cette réalité au moyen de postulats contraignants (notamment dans cette thèse) et agréger certains agents en éliminant leurs différences les moins significatives.
- ❑ Ensuite, si certains comportements peuvent être modélisés et traduits par des fonctions mathématiques, il faut bien reconnaître que l'outil économique ne saurait rendre compte de la pensée humaine dans toute sa complexité.

b) Intérêts

Pourtant, nous avons choisi la théorie microéconomique car elle présente aussi des avantages certains :

- ❑ D'abord le langage économique est aujourd'hui commun et accessible à l'ensemble des acteurs présents sur le territoire.

En tant que professionnels, aussi bien EDF que les agriculteurs ont déjà évalué leur activité en termes économiques, et s'il est probable que les notions employées divergent légèrement (par exemple, il est probable que le bénéfice marginal dû à l'utilisation d'une unité d'eau tel que défini dans cette thèse ne corresponde que partiellement à celui calculé par les agents), l'information existera néanmoins, et il suffira de la retravailler superficiellement pour l'intégrer à notre propos.

- ❑ Là où les autres sciences émettent plutôt des appréciations de type qualitatif et difficilement comparables, l'analyse microéconomique évalue les avantages et inconvénients de chaque action sur un même barème et indique clairement une « solution » au problème, même s'il peut en exister d'autres. Bien sûr, la qualité de cette solution est largement dépendante de la qualité de l'analyse et est largement discutable par rapport au poids donné à chaque facteur.

C'est au vu de ses raisons que nous avons choisi l'outil microéconomique.

A. Présentation de la méthode en fonction des objectifs

Nous allons ici présenter succinctement les hypothèses sur lesquelles nous fondons notre travail et le sous-objectif auquel elles correspondent. Nous les développerons postérieurement dans les sections 2, 3 et 4 ci-après.

a) Hypothèse 1 : l'allocation de la ressource en fonction du critère de l'efficacité économique

Pour répondre à cette question, nous allons nous fonder sur une hypothèse de départ. Notre interprétation de ce concept se basera sur la théorie de l'efficacité économique, telle que décrite par la théorie néo classique, et qui précise la règle d'allocation d'une ressource entre deux activités afin d'obtenir le bien-être social maximum.

- Ainsi, notre première hypothèse

...sera que ce que le législateur entend par « meilleure rentabilité collective », est assimilable à l'efficacité économique : « le bénéfice marginal dérivé de l'utilisation de la ressource doit être le même en toutes les utilisations pour maximiser le bien-être social. » (Vilfredo Pareto in Blanco Fonseca, 1999)

b) Hypothèse 2 : l'intégration de la prévision

... exprimera, au regard du décalage des cycles naturels de demande en eau dans les deux secteurs, la nécessité de dissocier dans le temps la comparaison des bénéfices marginaux dans les deux activités.

c) Hypothèse 3 : la réutilisation de la ressource

La production d'énergie hydroélectrique utilisant mais ne consommant pas la ressource, la coopération entre les deux secteurs dans l'utilisation de l'eau permet d'augmenter le bénéfice total des deux secteurs.

II. Le bénéfice social maximal s'atteint par la théorie de l'efficacité économique (Hypothèse 2)

1. Définition

Notre première hypothèse est que ce que le législateur entend par « meilleure rentabilité collective » peut être atteint par la considération « du point de vue de l'efficacité économique, le bénéfice marginal dérivé de l'utilisation de la ressource doit être le même en toutes les utilisations pour maximiser le bien-être social. »

Cette définition est celle adoptée par l'économiste Italien Vilfredo Pareto (1896), qui a introduit le concept d'efficacité à l'économie du bien-être et qui par la suite a reçu son nom : Optimalité Parétienne.

« Suivant Pareto, « une allocation est efficace pour un ensemble donné des goûts des consommateurs, des ressources et de la technologie, s'il est impossible de trouver une autre allocation qui améliorerait le sort de quelqu'un et ne dégraderait le sort de personne » (Begg et al. 1989). Ce concept a été étendu à la théorie de la décision multicritère afin de différencier les solutions optimales dans le sens de Pareto de celles non optimales. Ainsi, on peut définir une solution optimale dans le sens de Pareto toute solution faisable de telle manière qu'il n'existe aucune autre solution qui permette d'atteindre des valeurs égales ou meilleures pour tous les critères considérés et une valeur strictement meilleure au moins pour un critère. Les solutions Pareto optimales sont aussi appelées solutions efficaces ou non dominées ». Slim Zekri (cours IAMM, 2001)

Le grand apport de cette théorie est qu'elle s'inscrit en paradigme à la théorie classique dont Adam Smith est un des Pères fondateurs.

Pour ce dernier, chaque individu rationnel poursuit un objectif qui est la maximisation de son profit individuel. La poursuite des intérêts individuels permettant, par l'intermédiaire du mécanisme de la « main invisible », de maximiser le profit total de la société.

Pareto nous dit au contraire qu'il faut dépasser la dimension sectorielle existant dans la gestion de la ressource, et ne plus considérer chaque activité séparément mais comme partie d'un tout.

Aussi, en se plaçant dans le cadre de l'analyse micro-économique, nous allons non plus considérer la gestion de l'eau d'irrigation et d'hydroélectricité du point de vue de deux acteurs distincts, mais comme deux activités différentes d'un même acteur (cette entité peut s'identifier à la société), et qui utilisent un input commun (l'eau). Ce gestionnaire unique aurait lui aussi pour objectif la maximisation de son revenu total (la rentabilité collective).

Un tel acteur, afin de parvenir à son objectif, allouerait cet input dans chaque activité jusqu'à ce que le bénéfice marginal dérivé de l'utilisation de cet intrant soit le même dans toutes les activités afin de maximiser la « rentabilité collective », comme le demande la loi de 1992.

Remarque :

Pour rendre justice à Adam Smith, il faut rappeler qu'il n'existe pas de marché libre sur l'eau, en France. Or, si un tel marché existait, la théorie néoclassique prévoit que le jeu de l'offre et de la demande et des mécanismes de prix qui y sont associés, empêcherait qu'une activité accapare une ressource au détriment d'une autre activité qui pourrait en dégager une plus grande valeur.

2. Intérêts et limites

A. Intérêts

On a opté pour la théorie de l'efficacité économique comme la plus indiquée car elle présente plusieurs avantages :

- Neutralité

Il existe une certaine neutralité, d'un point de vue économique, dans ce concept puisque il ne prend pas partie d'allouer l'intégralité de la ressource à tel ou tel secteur d'activité, mais qu'il laisse la possibilité de la partager.

Si le bénéfice marginal peut être supérieur dans une activité à un moment, cela peut être après la situation inverse car le bénéfice marginal est une fonction décroissante et donc plus on alloue d'eau à un secteur, plus son bénéfice marginal décroît et donc l'autre secteur présentera à un moment un bénéfice marginal supérieur.

- Familiarité de la notion de bénéfice

Le bénéfice est une notion de comptabilité que les deux types d'agents ont l'habitude d'appréhender. Même si notre calcul du bénéfice marginal est sans doute différent du leur, il n'en reste pas moins qu'il leur sera sans doute plus facile de communiquer et raisonner sur cette valeur que si on leur parlait du surplus total de la société, à l'échelle de la région et/ou de la nation. Du point de vue de la récolte d'information, cette notion ne met en relation que les 2 acteurs concernés et il sera donc plus facile d'obtenir la totalité des informations que si l'on devait chercher des informations sur des agents qui ne sont pas forcément présents.

- Une architecture modulable

Bien qu'en réalité la compétition pour l'usage de la ressource se fasse non seulement entre ces deux secteurs mais aussi avec d'autres agents (eau potable, industrie, activité paysagère...), l'architecture de construction de ce travail autorise tout à fait l'ajout d'autres activités puisque le calcul du bénéfice marginal de l'utilisation de la ressource se fait de façon indépendante dans chaque secteur.

De la même façon, on peut déterminer le bénéfice marginal de l'utilisation de l'eau pour l'alimentation en eau potable, l'industrie ou autre, et ainsi la décision d'allocation peut se faire selon la même règle de l'efficacité économique.

C'est donc une architecture modulable, et si dans ce travail, nous nous limitons à l'étude de deux secteurs, la structure reste valide pour l'ajout d'autres secteurs.

III. Dissociation temporelle du bénéfice marginal

(Hypothèse 2)

S'il est certain que les agriculteurs ainsi qu'EDF prennent en compte et anticipent les conditions-météo climatiques pour les intégrer à la gestion de la ressource, ils le font séparément, sans se concerter ni se

coordonner. Or, nous émettons l'hypothèse qu'il est possible d'optimiser cette gestion si l'on prend en compte la nature séquentielle de l'information.

Ainsi les acteurs réalisent une anticipation des conditions météo-climatiques pour effectuer leur gestion de la ressource, mais chacun anticipe séparément. Or l'intérêt de considérer conjointement cette nature séquentielle de l'information permet d'optimiser cette gestion pour les deux activités séparément.

L'information sur un secteur peut se traduire par un supplément d'information pour l'autre secteur. Par exemple, si, dans le cas d'une gestion non coordonnée, au début du printemps, l'agriculteur ne disposait avant pour toute information sur sa disponibilité d'eau future que des probabilités météoclimatiques, il possèdera une information supplémentaire sur le niveau d'eau réel du barrage hydroélectrique à la fin de l'hiver grâce à l'échange d'information ; il connaîtra ainsi le volume d'eau qu'il pourra espérer prélever.

De même, si EDF connaît l'assolement choisi par les agriculteurs, elle pourra affiner la probabilité de la demande d'eau des agriculteurs et le moment où elle se réalisera (cultures primeur, d'hiver, d'été ou nécessitant peu d'eau ou beaucoup). L'information dans un secteur peut donc bénéficier à l'autre. L'originalité de notre modèle stochastique est aussi de ne pas considérer le temps comme une contrainte, mais comme apportant, à chaque période, un supplément d'information pour effectuer les ajustements nécessaires. Ainsi, en fonction des conditions météoclimatiques et du niveau du barrage, on préconisera l'assolement et le planning d'irrigation, qui permettront un emploi optimum de la ressource.

Nous allons rappeler dans un premier point pourquoi le concessionnaire hydroélectrique bénéficie d'une priorité naturelle dans l'utilisation de la ressource, puis dans un second point, nous expliquerons en quoi la méthode de modélisation choisie requiert la dissociation temporelle de la comparaison des bénéfices.

1. Priorité naturelle du concessionnaire hydroélectrique

Le concessionnaire hydroélectrique est dans une situation de priorité physique et technique par rapport aux agriculteurs.

A. Priorité dans le cycle de l'eau

En France métropolitaine, la majeure partie des précipitations se réalise durant la période d'octobre à avril. A partir d'avril et pour une courte période, la fonte des neiges apporte un surcroît d'eau. L'offre naturelle d'eau est donc plus importante à ce moment qu'aux saisons dites sèches (printemps, été). Comme nous l'avons déjà précisé dans le premier chapitre, la demande d'eau pour la génération de l'énergie hydroélectrique est aussi à son sommet à ce moment-là de l'année. EDF dispose donc d'une priorité naturelle pour l'utilisation de cette eau.

B. Priorité géographique et d'infrastructure

Les barrages hydroélectriques, dans le cas de notre région d'étude comme bien souvent dans la réalité, sont situés en amont des superficies agricoles. Ils sont conçus de façon à capter le maximum des eaux superficielles de leur bassin versant et donc limitent d'autant le volume d'eau pouvant parvenir par écoulement naturel aux exploitations agricoles.

Dès lors, la ressource contenue dans le réservoir n'est relâchée qu'une fois la demande d'EDF satisfaite, et ce au détriment de la demande d'eau agricole.

2. Prise de décision séquentielle et théorie d'allocation des ressources

Dans notre modèle, il existe six périodes correspondant à ce même cycle naturel de l'eau. A chaque période, une décision est prise quant à l'allocation de la ressource. Si l'on se place dans une situation où l'avenir est inconnu, et donc la préférence pour le présent infinie, alors au moment de chaque prise de décision, il faut allouer la ressource à l'activité pour laquelle on en dérive le plus grand bénéfice marginal

instantané. Mais cette façon de procéder ne nous semble pas efficiente, au sens de Pareto, et ce pour deux raisons :

a] Connaissance probabiliste des états de la nature futurs

Nous nous plaçons dans une situation d'avenir incertain et non d'avenir inconnu. En effet, par l'expérience, par le retraitement statistique des données météorologiques passées, les acteurs peuvent anticiper les probabilités de disponibilité d'eau future, avec une plus ou moins grande marge d'erreur. (connaissance probabiliste du futur).

□ Allocation intra-sectorielle

En tant qu'agents économiques rationnels, ils prennent naturellement en compte cette information pour effectuer la gestion de leur activité, tout en ayant conscience des risques dus à la non réalisation de ces anticipations. De plus, dans la réalité, ils raisonnent en terme d'exercice fiscal et donc cherchent à maximiser le profit de l'année, plus que celui de la période en cours. C'est pourquoi, afin de représenter ces caractéristiques, nous allons nous aussi dans notre modèle maximiser le bénéfice annuel de chaque agent. Pour cela, l'on devra comparer le bénéfice marginal dérivé de l'utilisation de la ressource, non plus période par période, mais indépendamment de son moment de réalisation au cours de l'année.

Remarque : l'horizon de planification de ce travail n'excédant pas l'année, on ne procède pas à l'actualisation des revenus (préférence du décideur pour le présent), et on considère que la monnaie reste fixe au cours de la période.

□ Allocation inter-sectorielle

Si l'on ne compare les bénéfices marginaux de chaque secteur que période par période, on peut allouer un volume d'eau à la production hydroélectrique au temps t car son bénéfice marginal est supérieur à ce moment à celui de l'agriculture, et ce volume d'eau est perdu pour une période $t+1$ où le bénéfice marginal en agriculture est supérieur à celui de l'électricité en t . D'où la justification de notre hypothèse de dissociation temporelle de la comparaison des bénéfices marginaux.

b] Accroissement du niveau de l'information au cours du temps

Dans un processus de prise de décision séquentielle, chaque période apporte un supplément d'information qui permet d'accroître le bénéfice. Aussi est-il encore une fois important de ne pas réaliser instantanément la comparaison des bénéfices marginaux...

La méthode de programmation stochastique discrète, que nous développerons dans le chapitre suivant, permet par sa nature séquentielle de prendre en compte cet accroissement d'information.

3. Limites

Le modèle prend en compte un horizon de planification n'excédant pas l'année.

Ce faisant, ne sont pas prises en compte les décisions s'étalant sur plusieurs années (investissement, cultures pérennes) et certains facteurs, tels que l'importance du niveau du barrage au début de l'année suivante ne pourront être pris en compte qu'au moyen de l'expression d'une contrainte de fin de cycle (niveau minimal du barrage à la fin de l'année).

IV. La réutilisation de la ressource et la coopération entre les deux secteurs permet d'augmenter le bénéfice total des deux secteurs/le bénéfice social

(Hypothèse 3)

Il serait incomplet de s'arrêter à la simple allocation à l'un ou à l'autre secteur de la ressource en fonction du bénéfice marginal en résultant. Ce serait méconnaître le caractère non consommptif de l'utilisation de l'eau pour la génération d'électricité, dont nous avons parlé plus haut. C'est cette originalité et cette spécificité qui ont motivé l'élaboration cette thèse.

L'usage que fait EDF de l'eau laisse celle-ci théoriquement disponible pour une utilisation agricole postérieure. Mais cette compatibilité technique est rarement exploitée du fait du décalage temporel existant pour l'utilisation de la ressource et des difficultés de coordination qui en résultent.

Notre travail a donc pour but de faciliter cette coordination et s'inscrit dans le cadre des nouvelles théories préconisant d'éviter le gaspillage de l'offre d'eau plutôt que d'en accroître la demande.

1. Justification de l'hypothèse

Cette dernière hypothèse, si elle se vérifie, permettra de justifier la réalisation de ce travail.

Comme nous l'avons dit précédemment, une centrale hydroélectrique se caractérise par une utilisation non consommptive de l'eau, ce qui laisse la ressource disponible en théorie pour un usage agricole postérieur. Ainsi, lorsque EDF fait un lâcher d'eau à destination des agriculteurs, cette eau peut malgré tout être convertie en énergie électrique. Simplement, cette énergie sera valorisée à un prix plus faible, en été par exemple, où la demande est faible, ou si cette production d'énergie s'intègre mal à la gestion des autres unités énergétiques.

Cependant, nous posons l'hypothèse que cette perte de valeur de l'eau pour EDF peut être compensée par le gain de valeur dérivé de l'utilisation de cette eau pour l'irrigation.

Soit en termes mathématiques :

$$\mathbf{BAA + BER > BEN + BAN}$$

Avec :

BEN Bénéfice Electrique Normal
BER Bénéfice Electrique Réduit
BAN Bénéfice Agricole Normal
BAA Bénéfice Agricole Accru

Remarque : cette hypothèse ne se vérifie pas dans tous les cas. Elle est dépendante du moment où se réalise la demande d'eau de la production agricole, des conditions météoclimatiques passées et présentes (états de la nature) et des décisions de production antérieures et à réaliser.

Aussi notre modèle a-t-il pour vocation de déterminer quels sont les moments favorables à la réalisation de cette hypothèse.

L'objectif est ici de fournir un outil qui, lors des phases de négociation, puisse permettre de réaliser des scénarios sur les différentes possibilités de coopération entre les deux secteurs, et les conséquences sur leur résultat économique. Le dialogue entre les deux acteurs est donc facilité par l'intermédiaire du modèle. On peut imaginer de nombreux scénarios de coopération et dont voici quelques exemples qui seront traités ultérieurement : garantie d'un volume minimal relâché par EDF pour l'irrigation, contrats d'options sur l'eau, contrats d'assurance risque sécheresse etc..

Remarque : il peut sembler que ce soit toujours EDF qui consent à renoncer à l'utilisation d'une partie de la ressource mais, dans l'optique d'arrivée à terme des concessions et la volonté affichée de l'Etat d'ouvrir (en partie) les sites au multi usage, cela devient une contrainte légale.

Mais cette coopération, pour bénéfique qu'elle soit pour un acteur et pour la société, se traduit aussi par un coût pour l'autre acteur.

Parmi l'ensemble des modalités de gestion envisageables, il faut identifier quelles sont les limites posées en cas de transaction monétaire : « Dans le cas de lâchures des barrages EDF à des fins non énergétiques, sur quelles références peut-on asseoir le montant des transactions ? Le préjudice subi par EDF (diminution du surplus du producteur) ou le gain retiré par les bénéficiaires des lâchures (accroissement du surplus du producteur ou de la collectivité) ou encore le coût de mobilisation des nouvelles ressources (coût de l'accroissement de l'offre) ». (Falgarone, Lesgards , 1993 in Blandine Pillet, 2001)

Or notre modèle, en permettant à la fois d'évaluer la perte de et l'accroissement de bénéfice dans chaque secteur, peut donner la base financière des transactions à partir de laquelle les acteurs pourront négocier.

2. Les différentes formes que peut prendre la coopération

Pour que cette coopération puisse aboutir, il est important de préciser selon quelles modalités elle se fera. En effet, comme le soulignent de nombreuses théories économiques (théorie des jeux, *New Institutional Economics* etc.), pour assurer une base saine à toute transaction, il est nécessaire de renforcer les droits et obligations de chaque partie au moyen de contrats clairs et précis, dont l'autorité compétente (ici l'Etat) se chargera de contrôler le respect.

Or dans la théorie des contrats, il est nécessaire de définir les droits de propriétés initiaux et leurs bénéficiaires avant de pouvoir contracter. Même si nous ne rentrons pas dans les détails de cette théorie, nous allons exposer rapidement ce qu'il en est dans le cas de notre étude :

- ❑ soit l'unité hydroélectrique est bénéficiaire d'une concession exclusive sur les eaux superficielles

Dans ce cas, le droit de propriété est clairement défini et appartient au concessionnaire (EDF). Il ne pourra être outrepassé que par l'intervention de l'Etat (réquisition préfectorale, protocole sécheresse de 1990 etc..).

- ❑ soit cette concession est arrivée à terme,

La propriété des eaux superficielles appartient alors à l'Etat qui est libre de renouveler ou non la concession ou de l'élargir à d'autres bénéficiaires, sous d'autres formes. Dans le silence de l'Etat, la ressource devient libre et peut être approprié. Cependant, il ne nous semble pas absolument impératif qu'elle devienne propriété de quelqu'un pour qu'elle soit sujette à transaction. Simplement, les utilisateurs potentiels peuvent estimer qu'ils possèdent un droit égal à son utilisation et la négociation peut alors reposer sur ce postulat, qui ne sera pas fragile s'il est garanti par l'Etat.

Chapitre III : Présentation du modèle

I. La programmation stochastique discrète

Notre choix de la méthode de programmation stochastique discrète a été motivé par le fait qu'elle répond aux capacités nécessaires de l'outil de modélisation qui sont de :

- ❑ permettre de représenter la nature séquentielle du processus de décision,
- ❑ prendre en compte le problème de multi dimension,
- ❑ permettre de représenter le comportement des agents en situation de manque d'eau et d'incertitude en respect à la disponibilité de l'eau.

1. Nature séquentielle du processus de décision

Pour permettre la prise en compte de l'analyse de l'incertitude, nous avons donc choisi de recourir à des méthodes de programmation stochastique, qui prennent en compte la nature séquentielle du processus de prise de décision. Les agents sont donc dans le cadre d'une rationalité limitée, due à une information incomplète en début de période. Mais la totalité des décisions de production ne se fait pas au seul début de campagne. L'information additionnelle sera utilisée pour prendre les décisions postérieures. Les agents sont rationnels dans le cadre d'une information limitée et qui s'accroît avec le temps.

La méthode de programmation stochastique discrète (PESD) suggérée par Cocks (1968) et développée ultérieurement par Rae (1971) s'adapte très bien à l'analyse de la production agricole, qui peut s'assimiler à un processus séquentiel de prise de décision, car les décisions de semer, irriguer et récolter sont séquentiellement dépendantes et se révisent à mesure que l'on va disposer d'informations additionnelles. C'est pour ces motifs que les modèles de programmation stochastique discrète, qui traitent conjointement du risque dans les contraintes et dans la fonction objectif, sont amplement utilisés en économie agraire.

Par concurrence à d'autres techniques dynamiques discrètes (comme la programmation dynamique stochastique), il a été opté pour la programmation stochastique discrète car elle permet de mettre en évidence le problème de multi dimension qui résulte quand on considère conjointement les multiples états de la nature et un ample éventail de cultures, technologies et intensité d'irrigation.

2. Prise en compte du risque

A. La modélisation du risque

Du fait de la nature risquée de l'activité agricole, un grand nombre de techniques de programmation mathématique ont été développées à ce jour pour analyser le risque (Hazell et Norton, 1986 ; Rae, 1994 ; Hardaker J.B, 1997).

La plus utilisée est celle de l'utilité espérée subjective (Von Neuman et Morgenstern, 1953). Cette théorie est la base d'une grande partie des modèles qui tiennent compte du risque dans la fonction objectif, comme le modèle espérance-variance (Markowitz, 1952 ; Freud, 1956) ou son approximation linéaire MOTAD (Hazell, 1971).

Postérieurement, des études complémentaires sur le comportement des décideurs dans une situation d'incertitude montrent que la perception du risque est plutôt basée sur le niveau des pertes que sur la variance des résultats. Cette perspective a donné lieu au développement des approches *safety-first*, comme les modèles Target MOTAD (Taeur, 1983), *Direct Expected Utility Maximizing Non Linear Programming* ou DEMP (Lambert et McCarl, 1985) ou *Utility Efficient Programming* (Patten, Hardaker et Pannell, 1988)

Enfin, il est couramment admis, sur la base de nombreuses études, que les agriculteurs ont un comportement averse au risque (Moscardi et de Janvry, 1977 ; Dillon et Scandizo, 1978 ; Binswanger, 1980 ; Hazell, 1982 ; Antle, 1987).

B. Le risque dans la PSD

Pourtant, comme on l'a vu précédemment, une grande partie des décisions de production dans l'agriculture est prise de façon séquentielle (Rae, 1971 ; Antle, 1983 ; Adesina et al., 1991 ; Dorward, 1991, 1996, 1999 ; Shapiro et al., 1993 ; Taylor et Young, 1995 ; Torkamani et Hardaker, 1996).

Une fois la prise de décision effectuée, les conditions économiques et naturelles peuvent changer. Avec cette nouvelle information, « les décisions antérieures deviennent sous-optimales et on peut dire que le risque affecte l'efficacité économique (hypothèse de risque-efficacité) » (Mejias, 2002).

Il n'est donc plus nécessaire de démontrer que les agriculteurs sont averse au risque pour prouver qu'ils sont concernés par l'existence du risque.

L'hypothèse de risque efficacité implique qu'il est nécessaire de modéliser la structure dynamique de la production agricole pour être capable d'évaluer les effets du risque dans la production agricole et le revenu. « On considère alors que les modèles dynamiques neutres au risque peuvent être plus utiles que les modèles statiques conventionnels averse au risque à l'heure de comprendre l'effet du risque dans la production agricole (Antle, 1983). »

De plus, elle permet de prendre en compte le risque à la fois dans la fonction objectif, dans la disponibilité des ressources et dans les coefficients techniques. C'est pourquoi différents auteurs considèrent qu'elle est la méthode la plus adaptée pour le traitement de l'incertitude dans la disponibilité des ressources.

La matrice pour chaque sub-problème diffère de celle utilisée par une programmation déterministe car tous les coefficients choisis au hasard sont remplacés par la valeur tirée de la distribution discrète appropriée dépendant de l'occurrence d'un éventuel état de la nature

3. Limites de la PSD

La principale limite des modèles stochastiques réside dans la structure de l'arbre de décision. En effet, le nombre de branches (état de la nature probable) suit une croissance de type exponentiel, et l'on doit donc se restreindre à un nombre limité de périodes et d'états de la nature afin de pouvoir en interpréter les résultats.

II. L'horizon de modélisation

Une des premières étapes de la modélisation est de déterminer la période globale que l'on souhaite étudier et qui constituera ce que l'on appelle l'horizon de modélisation, puis de fractionner celle-ci en sous-périodes d'étude auxquelles correspondront différents états de la nature et paramètres, ainsi que les décisions adéquates.

1. Durée de la période d'étude

L'analyse de l'allocation de l'eau entre les secteurs est grandement dépendante de la durée de la période d'étude envisagée. Soit on se positionne dans le cadre de l'analyse sur plusieurs années de la ressource, soit on se focalise sur son allocation durant l'année. Ces deux approches ont leurs mérites et limites (les mérites de l'une étant les limites de l'autre), que nous présentons rapidement ci-dessous, ainsi que les raisons de notre choix de l'utilisation de l'approche intra annuelle :

A. Allocation inter annuelle

C'est une approche à moyen et long terme qui permet d'appréhender la façon dont va se réaliser l'allocation de la ressource et le bénéfice qui en est dérivé, en fonction d'évènements et de décisions dont le cadre dépasse l'année. Ainsi, le choix d'une telle période d'étude permet d'évaluer :

- ❑ les projets de réalisation d'infrastructures hydrauliques ;
- ❑ la sensibilité des acteurs à l'application de politiques économiques planifiées à moyen et long terme ;
- ❑ les capacités d'adaptation des agents économiques aux évolutions des marchés ;
- ❑ le développement de nouvelles sources d'eau ;
- ❑ le progrès technologique ;
- ❑ les décisions de production à long et moyen terme (cultures pérennes, emprunts et investissements en matériel etc...).

B. Allocation intra annuelle

C'est une approche à court terme (une année civile), et qui correspond à un cycle d'activité complet dans les deux secteurs étudiés.

Alors qu'on utilise la première approche pour les aspects concernant l'infrastructure et la planification à long terme, cette approche-ci est plus orientée sur les aspects de gestion à court terme avec une attitude « ceteris paribus » (toutes choses étant égales par ailleurs).

On considère un environnement donné et dont les structures sont fixes et constantes. Les seules variables d'actions sur le résultat annuel sont alors les différents modes de gestion possibles. Cet horizon de modélisation permet donc de mettre en évidence l'influence du type de gestion étudié.

a) Le choix de la durée par rapport aux objectifs du travail

Notre principal intérêt consiste à déterminer l'effet sur le revenu d'une flexibilité accrue dans la gestion de la ressource entre les secteurs, il nous faut donc analyser les décisions à court terme. Le niveau de détail nécessaire est celui de la gestion de l'eau durant la campagne d'irrigation et de production électrique. Car il existe une plus grande flexibilité dans la gestion de la campagne que pour une gestion inter annuelle.

Remarque

- ❑ nous sommes conscients de l'influence qu'ont sur le court terme les décisions à long terme, y compris sur la flexibilité de gestion de la ressource (un barrage agricole en aval du barrage hydroélectrique peut permettre aux agriculteurs de mieux réguler l'eau relâchée par le barrage hydroélectrique, par exemple). Le choix d'un cadre d'analyse intra annuel n'a pas pour objet de nier l'intérêt de l'approche inter annuelle. Cependant, dans les limites de nos disponibilités en temps et moyens, nous ne pouvons traiter conjointement ces deux aspects et laissons à d'autres le soin de réaliser ce travail.
- ❑ dans le développement du modèle, nous soulignerons les cas où certains facteurs fixes dans notre travail sont sujets à modification si l'on était dans une analyse inter annuelle.

- ❑ dans la mesure où nous traitons de l'allocation intra-annuelle de la ressource, nous ne traiterons pas de la possibilité de développement d'infrastructures de transport ou de nouvelles sources de l'eau ; de même, nous ne changerons pas les plans d'assolements (l'arboriculture s'étale sur plusieurs années, la mise en place de nouvelles cultures nécessite une phase d'apprentissage pour les agriculteurs, etc..)

Ayant donc choisi de nous poster dans le cadre de l'analyse de l'allocation intra annuelle de la ressource d'eau, il faut encore distinguer des sous-périodes d'étude représentatives des aléas, contraintes et besoins des deux secteurs tout au long d'une année type.

2. Analyse des périodes déterminantes pour les secteurs étudiés

Nous allons récapituler succinctement quelles sont les principales caractéristiques de l'offre (précipitations et autres événements météo-climatiques) et de la demande de la ressource en eau et le moment où elles se réalisent pour chaque secteur étudié.

Puis nous expliquerons comment nous avons pu les combiner afin d'obtenir des sous-périodes d'études homogènes et qui soient significatives pour l'un comme pour l'autre acteur.

A. Hydroélectricité

On peut distinguer *grosso modo* trois périodes importantes pour l'activité hydroélectrique et qui correspondent globalement aux saisons :

- ❑ Automne – hiver

La période qui court d'octobre à février est peut être la plus importante pour la production du site hydroélectrique. En effet, elle est caractérisée à la fois par des précipitations abondantes qui se traduisent par un fort remplissage du barrage, et à la fois par une demande en énergie qui est elle aussi à son maximum (cf les caractéristiques de l'électricité en introduction). De ces deux éléments conjugués dépend en grande partie le niveau d'activité future et surtout l'eau disponible pour une utilisation postérieure. C'est pourquoi, en raison de son caractère prédominant, cette période marquera le début de notre horizon de modélisation.

- ❑ Printemps

La période qui court de mars à juin se singularise par une variabilité importante des précipitations survenues et des températures constatées, et par corollaire de la demande d'électricité pour le chauffage. Rappelons que, comme mentionné dans le chapitre introductif, par sa grande souplesse et sa rapidité de mise en œuvre, l'hydroélectricité est l'énergie la mieux adaptée pour répondre à une demande fluctuante et subite. Cette importance stratégique devra donc être reproduite au niveau de notre modèle.

- ❑ Eté

Bien que depuis une dizaine d'années la politique nationale d'EDF tende à favoriser le développement de l'utilisation de climatiseurs, afin de réduire l'écart de la consommation d'énergie entre été et hiver, il n'en reste pas moins que la demande reste peu significative et peut en général être satisfaite dans son ensemble par des sources d'énergies alternatives, telles que le nucléaire. Le phénomène de remplissage du barrage n'est lui aussi que peu significatif, les précipitations estivales étant en général peu abondantes. Cependant, l'importance stratégique de cette période pour la gestion de l'activité d'EDF n'en est pas moindre, car il faut veiller à ce que l'ouvrage hydraulique présente un niveau de remplissage lui permettant de débiter le cycle de production suivant dans de bonnes conditions. En ce qui concerne ce point, la localisation géographique du barrage et les événements météoclimatiques qui y sont associés, de même que ses dimensions sont autant d'éléments déterminants.

□ Demande précoce

La demande nationale en hydroélectricité survenant dès le mois d'octobre, il est nécessaire que l'unité dispose à cet instant précis de réserves en eau lui permettant de répondre à cette dernière. Il faut donc qu'elle soit située dans un lieu où les précipitations automnales surviennent elles aussi au mois d'octobre, ou bien que le volume d'eau conservée à la fin de l'été soit suffisamment important.

□ Rapport entre précipitations et recharge

En sus de l'importance de la précocité des précipitations de la zone étudiée, leur valeur globale au cours de l'automne - hiver est aussi déterminante. A dimensions égales, un barrage situé dans les Alpes reçoit des précipitations équivalentes à une fois et demie la capacité totale du barrage, alors que s'il est situé dans les Pyrénées, les précipitations ne représentent qu'un tiers de sa capacité de stockage (Ezerzer, 1992). On conçoit alors que le niveau d'eau contenue à la fin de l'été représente une importance différente dans l'un ou l'autre cas.

□ Dimensions de l'infrastructure

En ce qui concerne les barrages de très grandes dimensions, qui mettent plusieurs années à se remplir, les précipitations automnales ne permettent de renouveler qu'une fraction du stock possible. Il est alors important pour la pérennité de l'activité que le gestionnaire veille à ce qu'un niveau minimum du stock en fin d'été ne soit pas dépassé.

B. Agriculture

En ce qui concerne l'agriculture, il faut prendre en considération les éléments qui sont afférents à la gestion économique de l'exploitant agricole et ceux qui tiennent aux caractéristiques agronomiques des cultures :

□ Automne – hiver

Du point de vue agronomique, la période d'octobre à février est peu significative puisque très peu de cultures de plein champ sont conduites à ce moment, la plus grande partie du travail des agriculteurs consistant à préparer le sol pour les semis. Cette période est cependant assez active du point de vue de la gestion car c'est le moment où se décident les assolements à venir, se négocient les contrats avec fournisseurs et clients (cas des cultures contractuelles comme le maïs semence, par exemple). C'est aussi le moment où se reconstituent les ressources en eau des agriculteurs (lacs collinaires etc.), mais nous avons opté pour une approche où les seules disponibilités en eau sont celles provenant des lâchers du barrage EDF. Or, la première période étant déterminante pour l'activité de ce dernier, par corollaire, elle aura aussi une grande importance pour l'agriculture par l'intermédiaire de l'irrigation.

□ Printemps

De mars à juin, l'agriculteur concrétise ses choix d'assolement et sème ses cultures. Cependant, cette saison n'est pas uniforme du point de vue des caractéristiques agronomiques des cultures. On distingue en effet des phases de croissance différentes auxquelles correspondent des besoins en eau spécifiques.

Il faut donc représenter ces différents stades par des sous-périodes qui les reproduisent. Nous avons choisi d'utiliser la fonction de croissance employée par la FAO et par laquelle on peut identifier les périodes suivantes pour le maïs au printemps :

- 2 mai au 1^{er} juillet : le stade végétatif

□ Été

La période de juillet à septembre est sans doute la plus sensible du point de vue agronomique comme de la gestion. En effet, les cultures sont alors fragiles et les aléas climatiques extrêmement variables et déterminants. Ce risque important est encore accentué par un facteur d'inertie des dépenses engagées. L'irrigation est alors une variable d'action qui permet à l'exploitant agricole de réduire ce risque, d'où sa valeur. La formule de la FAO décompose la saison estivale en phases que nous allons reproduire en tant que sous-périodes dans notre modèle :

- 2 juillet au 1^{er} août : phase de floraison
- 2 août au 9 août : phase de production des fruits

Cette période est extrêmement sensible car il faut répondre en un temps très court (une semaine), à une demande en eau importante qui, si elle n'est pas satisfaite, réduira fortement le rendement final de la plante et donc le revenu de toute l'année.

- 10 août au 3 septembre : phase de maturation 1,
- 3 septembre au 1^{er} octobre : phase de maturation 2,

Le modèle permet la prise de décision à seulement six occasions dans l'année, et qui sont au début de chaque période.

III. Spécification du problème de décision stochastique séquentielle

1. Définition des états de la nature possibles

Pour les besoins de notre travail, nous assumerons que toute la variabilité dans la production agricole provient de l'apport d'eau à la plante, c'est-à-dire des conditions météo-climatiques et de l'irrigation.

Ainsi, les états de la nature pour chaque période de décision du problème peuvent être spécifiés comme plusieurs niveaux de « conditions climatiques » et d'irrigation. Toutes les autres variables de production, comme les semis, les dates de récolte, les rendements, le travail et l'utilisation de machine sont postulées dépendants de ces dernières, auxquelles l'agriculteur s'adapte « automatiquement ».

On suppose aussi que l'agriculteur peut disposer des intrants nécessaires sans être limité dans leur disponibilité. L'élaboration des scénarios météo-climatiques doit se faire en fonction des statistiques pluviométriques de la région d'étude.

A. Spécification des niveaux que peuvent prendre les états de la nature et de leurs probabilités de survenance

La distribution complète des données des variables climatiques peut être divisée en trois segments à l'intérieur d'une même période, en fonction de la sensibilité des cultures aux variations climatiques et à l'irrigation. Nous n'attribuerons pas des spécifications météorologiques strictes à ces variables, mais simplement nous les classerons en fonction de critères « bon » (H), « moyen » (M) et « mauvais » (L). La probabilité d'occurrence de chaque état de la nature sera obtenue en fonction du retraitement statistique des données météo-climatiques.

En ce qui concerne ce point, « la Division Technique Générale (DTG) d'EDF a mis en place un dispositif permettant de réaliser des prévisions de débits.(...) . Ce dispositif complète celui de Météo France auquel EDF est abonnée. » (EDF, 2000). On peut donc espérer obtenir des prévisions correctes en ce qui concerne ces données.

Notre étude étant encore une fois théorique, nous prendrons dans un souci de réalisme des valeurs qui, si elles ne correspondent à aucune région en particulier, sont une moyenne obtenue à partir des précipitations observées sur plusieurs sites :

Tableau 1 : Volume des précipitations en m³ par hectares

Etats de la nature	Périodes					
	S1	S2	S3	S4	S5	S6
L	1250	200	50	31	100	100
M	2350	750	300	120	555	655
H	3350	1400	870	380	1405	1405

B. Définition de la structure d'information appropriée

La structure d'information qui est considérée comme la plus adéquate pour analyser les décisions d'investissement est une structure avec une connaissance parfaite du passé. Le producteur, au début de la période t a une connaissance parfaite des résultats de la période $t-1$, mais il n'a qu'une connaissance probabiliste des résultats de la période $t+1$.

C'est-à-dire que l'agriculteur prend les décisions d'irrigation et d'allocation des superficies entre les différentes cultures avant de disposer d'une information certaine sur la disponibilité de l'eau. Dans la seconde période, une fois connue la disponibilité d'eau, l'agriculteur pourra procéder à quelques ajustements (techniques de production, changement de cultures...).

IV. Construction d'une fonction objectif

La construction de la fonction objectif est une des étapes primordiales de la réalisation d'un modèle. Elle exprime non seulement l'importance que l'on attribue à chaque activité, mais reflète aussi l'approche économique, voire même morale, choisie. Cependant, le terme « objectif » reste une source de confusion, car il est souvent utilisé pour exprimer différentes idées. Nous allons donc différencier buts, objectifs et variables de décision dans un premier point, ainsi que leur expression au travers de la fonction objectif. Dans le second point, nous précisons l'approche économique que nous avons choisie pour la définition des objectifs et qui est celle de l'efficacité économique. Puis nous décrivons la façon mathématique dont nous avons construit la fonction objectif.

1. Terminologie et concepts fondamentaux

A. Les buts

Le but est la raison principale qui sous-tend les activités économiques entreprises par la société. Au niveau macroéconomique, ils peuvent être définis en termes de croissance du bien-être national, de développement économique régional, de satisfaction des besoins de l'industrie en énergie etc ... Cependant, lorsqu'il s'agit de les transposer dans un modèle micro ou méso-économique (dans notre travail, 2 secteurs d'activité dans une zone géographique limitée), il est nécessaire de les intégrer sous forme de variables de décision opérationnelles pouvant s'exprimer mathématiquement : les objectifs.

B. Les objectifs

Les objectifs sont les aspects des buts qui peuvent être identifiés, spécifiés et quantifiés en termes de variables de décision.

Les objectifs peuvent être l'équité dans la distribution des revenus (positifs ou négatifs), la qualité de l'environnement, l'aménagement du territoire, l'efficacité économique etc. C'est ce dernier objectif que nous retiendrons dans l'élaboration de notre modèle.

a] Les variables de décision

Elles permettent de décomposer chaque objectif en éléments secondaires dont la valeur est libre à l'intérieur de limites préétablies. Elles sont liées entre elles par des relations mathématiques et ont vocation à représenter le fonctionnement aussi bien économique que physique des activités que l'on veut modéliser.

Leur valeur est calculée lors du processus d'optimisation afin de permettre d'atteindre l'objectif voulu. Par exemple, l'objectif d'efficacité de la production hydroélectrique est déterminé par les variables de décision sur l'écêtement, les volumes relâchés pour la production électrique etc..

b] La fonction objectif

La fonction objectif est une équation composée de termes qui décrivent la performance économique de variables quantifiables mesurées en termes soit monétaires soit physiques. Cette équation est souvent complétée par un ensemble d'inégalités, qui représentent les buts, les contraintes légales ou autres que le gestionnaire doit satisfaire. Quand chaque objectif (*purpose*) est exprimé comme une fonction de variable de décision, la fonction objectif devient une relation des objectifs majeurs en terme de variables de décision majeures.

c] Décision

La décision est le choix d'une solution au milieu de toutes les solutions Pareto optimales alternatives. Son choix est difficile en ce qu'on ne peut pas atteindre les valeurs idéales pour tous les objectifs simultanément, aussi est-il nécessaire de procéder à un arbitrage.

d] Arbitrage ou substitution

Le fait de renoncer à un bénéfice ou avantage en vue d'en gagner un autre supposé plus intéressant s'exprime sous la forme d'un taux marginal de substitution. La substitution entre deux objectifs mesure la quantité ΔF_1 d'un objectif F_1 qui sera sacrifiée pour obtenir une amélioration unitaire en un autre objectif F_2 , supposé meilleur à un niveau donné.

Soit deux alternatives faisables X° et X^ψ . Le niveau des objectifs correspondants sont respectivement :

$$F(X^\circ) = [f_1(X^\circ) ; \dots ; f_n(X^\circ)]$$

$$F(X^\psi) = [f_1(X^\psi) ; \dots ; f_n(X^\psi)]$$

Le taux marginal de substitution entre f_k et f_j est :

$$T_{kj} = \frac{f_k(X^\circ) - f_k(X^\psi)}{f_j(X^\circ) - f_j(X^\psi)}$$

Ainsi, le taux de substitution mesure le sacrifice nécessaire au niveau d'un objectif pour améliorer un autre objectif. La différence par rapport à la théorie de l'utilité ou de production est que la substitution n'est pas mesurée en termes de biens ou facteurs de production mais plutôt en termes de réalisation des objectifs.

D'autre part, on parle d'arbitrage parce que les objectifs sont mesurés assez souvent en des unités différentes et que dans certains problèmes multicritères, derrière les objectifs, on trouve différents acteurs sociaux.

e] Niveau d'aspiration

Un niveau d'aspiration, ou « *target* » en anglais, est une valeur spécifique associée à un niveau désiré ou acceptable de réalisation d'un attribut. Le niveau d'aspiration est utilisé pour mesurer la réalisation d'un attribut et sert généralement à adapter l'attribut à la réalité.

f] Déviation par rapport au but

La différence entre ce qu'on réalise et ce que l'on aspire à atteindre est la déviation par rapport au but et elle existe dans tous les problèmes. Il faut noter qu'une déviation peut être un dépassement ou une sous-réalisation d'un but.

Mathématiquement, un but s'exprime de la manière suivante :

$$F_i(x) + n_i - p_i = T_i$$

Avec :

$F_i(x)$ ième attribut

n_i variable de décision négative par rapport au niveau d'aspiration

p_i variable de décision positive par rapport au niveau d'aspiration

T_i niveau d'aspiration que le décideur cherche à atteindre

g] Matrice de gain ou matrice de pay-off

« La première étape de la résolution d'un modèle multi objectifs est constituée par la détermination de la matrice de gain. Pratiquement, elle est obtenue en optimisant chacun des objectifs séparément, tout en considérant les autres objectifs dans l'ensemble des contraintes, sous forme d'équations comptables. Le but d'une telle opération est de déterminer les optimums absolus de chacun des objectifs et qui sont désignés dans la terminologie multicritère par les valeurs idéales. Les pires valeurs obtenues par chacun des objectifs dans ce processus constituent les anti idéaux ou nadirs. Ainsi, la matrice de gain permet de mettre en relief :

- ❑ l'intervalle de variation pour chacun des objectifs,
- ❑ le degré de conflit qui existe entre les divers objectifs,
- ❑ s'il existe ou non des objectifs convergents, c'est-à-dire qui changent dans les mêmes sens et proportions approximativement,
- ❑ les coordonnées du point idéal. C'est le point où tous les objectifs atteignent leur optimum absolu en même temps. C'est un point utopique qui ne fait pas partie de la région admissible. » (Slim Zekri, 2001)

2. L'efficience comme objectif

Comme nous l'avons expliqué dans le chapitre précédent, notre objectif est l'optimisation de l'efficience économique au sens Parétien du terme.

Il existe deux courants de pensée pour la définition des objectifs et la construction d'une fonction objectif, que nous nommerons école réductionniste et par opposition école non-réductionniste.

- L'école réductionniste

Elle considère que le profit est l'objectif principal. Pour cette école, tous les autres objectifs, que nous appellerons « secondaires » peuvent être mesurés en termes financiers et transformés en contrainte à l'intérieur de la fonction objectif principale qui devient alors suffisante.

- L'école non-réductionniste

A l'inverse, cette école considère que les objectifs non économiques ne sont pas réductibles ou assimilables à la notion de profit. Chaque objectif doit être jugé « à sa propre aune », selon les critères qui lui sont propres. Pour traiter ses différents objectifs simultanément, on a donc recours à des méthodologies de décision multi-objectif.

Remarque : Il faut cependant garder à l'esprit que c'est la position des preneurs de décision qui est finalement le facteur important lorsqu'il s'agit de sélectionner l'une ou l'autre approche.

Il importe ici de définir quels sont les buts poursuivis par chacun des agents et leur hiérarchisation. En effet, ces derniers ne consistent pas en une simple maximisation du profit, mais englobent certainement d'autres dimensions. En fonction de ces objectifs, la valeur que prendra une unité d'eau utilisée peut varier en ce qu'elle concourt plus ou moins à leur réalisation. Bien que la définition de ces buts doive se faire au moyen d'entretiens avec les acteurs concernés, on peut néanmoins les imaginer à priori.

Dans la gestion d'un réservoir, l'irrigation peut être considérée comme une priorité, à satisfaire quelque soit les pertes de production électrique en résultant, soit comme une activité économique en compétition avec l'utilisation hydroélectrique.

Dans le premier cas, l'objectif est de maximiser le bénéfice de la production électrique sous contrainte de l'irrigation. Cette contrainte peut s'exprimer de plusieurs façons : un volume minimal d'eau à relâcher chaque année, quelques mois pour chaque année, uniquement lors des années difficiles etc.

Dans le second cas, l'objectif est de maximiser simultanément l'efficacité économique de l'utilisation de l'eau en agriculture et en électricité. La question principale est de déterminer « l'efficacité économique ».

A. Expression mathématique de l'efficacité économique comme objectif principal

L'objectif principal de notre travail est l'allocation de la ressource en fonction du critère de l'efficacité économique. Pour Pareto : « le bénéfice marginal dérivé de l'utilisation de la ressource doit être le même en toutes les utilisations pour maximiser le bien-être social » et parvenir à l'efficacité économique (Blanco Fonseca, 1999). Nos objectifs secondaires vont donc être : calculer le bénéfice marginal dérivé de l'utilisation de la ressource pour l'activité hydroélectrique et pour l'activité agricole. L'allocation se fera alors à l'activité qui dégagera le plus grand bénéfice marginal par unité de ressource.

Dans sa forme la plus générale, la fonction objectif de l'efficacité économique est définie par :

$$E = F(Y_1, Y_2, \dots, Y_k) \quad (1)$$

Avec :

Y_1, Y_2, \dots, Y_k les k variables quantifiables de but,
 Y_i dépend des variables de décision et des variables d'état sur l'horizon de temps.

Ici Y représente le bénéfice de l'activité hydroélectrique ainsi que celui de l'activité agricole.

Dans une forme linéaire simple, l'équation (1) peut s'écrire :

$$E = a_1 * Y_1 + a_2 * Y_2 + \dots + a_k * Y_k \quad (2)$$

Avec :

a_1, a_2, \dots, a_k les coefficients en Euros par (Y_i),
où (Y_i) représente la dimension de tout Y_i , pour que dans ce cas, E soit exprimé en termes monétaires.
La dimension de (Y_i) de l'activité électrique est la production d'électricité en kilo Watt heure (kWh).
La dimension de (Y_i) de l'activité agricole est le rendement en quintaux par hectare.
Les coefficients a_i sont soit positifs, dans le cas d'un effet économique positif (ex : prix), soit négatifs dans le cas d'une perte (ex : coûts), de dommages ou autres impacts négatifs.

Y_i s'exprime en termes de variables de décision et de variables d'état
 U_i^t est la variable de décision i au temps t
 X_i^t est la variable d'état i au temps t

$$Y_i = f_i(U_i^t, X_i^t) \quad (3)$$

Différentes formes de la fonction f_i sont utilisées dans les problèmes de gestion du réservoir. Les plus communes sont la forme additive, la forme multiplicative, la forme minimale (Yevjevich V, 1983)

Pour chaque période t , nous définissons la fonction de retour g_i , qui dépend dans le cas le plus simple, des variables de décision et d'état à l'instant t .

La forme additive

$$Y_i = \sum_{t=1}^T g_i(U_t, X_t)$$

C'est le cas, par exemple, de la variable de décision de la génération d'hydroélectricité, où $g_i(U_t, X_t)$ est l'énergie produite avec le lâcher U_t quand le niveau du réservoir est X_t .

La forme multiplicative

$$Y_i = Y_i^m * \prod_{t=1}^T g_i(U_t, X_t)$$

C'est le cas, par exemple, de la variable de décision d'irrigation, où $g_i(U_t)$ est le niveau croissance quand l'humidité du sol est X_t et Y_i^m le rendement maximum possible.

Une fois la fonction objectif choisie, il est alors possible de se concentrer sur la **technique de modélisation** la plus adaptée pour résoudre le problème d'optimisation (qui s'écrit $\max u(E)$), ou pour simuler le comportement du système en ne faisant que mesurer E .

V. La Programmation Multi Objectif (PMO)

Afin de décrire les mécanismes de la PMO, nous avons choisi de reprendre les explications données par Slim Zekri dans son cours donné à l'Institut Agronomique Méditerranéen de Montpellier en avril 2001 : « La programmation linéaire, bien qu'abondamment utilisée depuis les années 60, part de l'hypothèse que l'agent économique ne cherche à maximiser qu'un seul objectif (généralement le profit). Elle ne permet donc pas l'optimisation de plusieurs objectifs simultanément. Or, particulièrement lorsqu'on a affaire à la gestion de ressources rares, les agents économiques ont des critères multiples qui ne sauraient souffrir d'être traités comme de simples « externalités », pour reprendre le terme utilisé par Zeleny (1982).

De plus, dans le cadre de la programmation linéaire, les contraintes sont rigides et ne peuvent être dépassées, ne serait ce que d'une seule unité.

Aussi, « les techniques de Programmation Multi Objectif (PMO) et la Programmation Par Buts (PPB) ont été présentées dans la littérature comme alternatives à la programmation linéaire conventionnelle,

particulièrement dans les situations où le processus de décision est basé sur plusieurs objectifs simultanés » (Fandel et Spronke 1985, Chankong et Haimes 1982, in Zekri 2001).

1. L'approche multi objectif dans notre modèle

L'eau relâchée par les réservoirs peut avoir différents objectifs comme la fourniture d'eau à usage urbain et industriel, la génération d'hydroélectricité, les usages récréatifs et paysagers etc. Les décisions à propos des lâchers d'eau périodiques sont souvent difficiles à déterminer du fait de la grande échelle, la nature multi objectif et le caractère non déterministe des recharges d'eau dans le système. Certaines de ces variables de décision sont habituellement en conflit et il n'existe pas une seule solution qui puisse tous les satisfaire. Ainsi, une solution de compromis, qui dépend fortement du jugement du gestionnaire du réservoir, est fréquemment adoptée.

Cependant, comme le gestionnaire du réservoir veut prendre des décisions en connaissant les différentes conséquences d'atteindre les différentes variables de décision, et ne tolère pas une décision prise pour eux par une combinaison arbitraire des poids de chaque activité, des développements récents ont été dirigés vers l'approche multi-objectif (Changchit et al 1989, Tauxe et al 1979, Yeh et al 1982).

Il s'agit d'optimiser plus d'une fonction objectif, sujette à un ensemble de contraintes. Le problème s'exprime de la manière suivante :

$$\text{EFF } F(x) = [F1(x), F2(x), \dots, Fq(x)]$$

Sujet à

$$\begin{array}{ll} a_{ij} X_j \leq b_i & \text{quelque soit } i \\ X_j \geq 0 & \text{quelque soit } j \end{array}$$

Avec :

EFF signifie chercher les solutions efficaces

Fq q-ème objectif

A_{ij} représente le besoin en facteur (i) d'une activité (j)

X_j représente les différentes activités ou variables de décision

Il existe essentiellement deux approches principales qui forment la base des techniques de programmation multiobjectif permettant d'engendrer, ou au moins d'obtenir une approximation, de l'ensemble des solutions efficaces. Ces deux techniques sont la méthode des coefficients de pondération et la méthode des contraintes.

A. La méthode des contraintes

La méthode consiste principalement à optimiser l'un des objectifs considérés dans le modèle, tout en incluant le reste des objectifs dans l'ensemble des contraintes. Par la suite en faisant une variation paramétrique des valeurs assignées aux termes de droite des objectifs transformés en contraintes, on génère des solutions Pareto optimales. (...)

Dans les problèmes multiobjectifs avec plus de deux variables de décision, les limites de variation de chacun des objectifs sont parfaitement obtenues à partir de la matrice de gain, (Slim Zekri, 2001). Par cette méthode, il est possible de générer un grand nombre de solutions non inférieures, et parfois plus que ce que le preneur de décision pourra examiner et évaluer. Dans ce cas-là, plus d'informations sur les préférences du preneur de décision sont requises pour sélectionner un sous-ensemble de solutions.

B. La pondération (weighting method)

« L'idée principale est de multiplier chaque objectif par un coefficient de pondération, puis d'additionner les objectifs pondérés pour obtenir une seule fonction objectif qui sera optimisée (Ignizio 1982 et Hartley

1985). La finalité de cette méthode n'est pas de permettre une classification des alternatives par ordre de préférence mais plutôt de générer un ensemble de solutions pareto optimales qui sera présenté au décideur afin d'exercer son choix.

La méthode de pondération permet donc de transformer un problème multi-objectif en un modèle à une fonction unique agrégée. (...) La valeur que prend la fonction objectif agrégée ne présente aucun intérêt pour le décideur, puisqu'il ne s'agit pas d'une fonction d'utilité. Ce sont uniquement les valeurs que prendra chacun des objectifs, considérés comme équations comptables dans le modèle, qui seront utiles pour le choix d'une solution alternative parmi les solutions efficientes. (...)

Le problème s'écrit :

Maximiser $w_1F_1(X) + w_2F_2(X) + \dots + w_qF_q(X)$

Sujet à

$$A_{ij} X_j \leq b_i$$

$$X_j \geq 0$$

$$W_k \geq 0$$

Avec w_k le coefficient de pondération attribué à l'objectif k pour $k = 1, \dots, q$

La fonction objectif est soumise à l'ensemble des contraintes mentionnées ci-dessus. L'ensemble des solutions efficientes est engendré en faisant une variation paramétrique des coefficients de pondération. La méthode des coefficients de pondération n'est pas une méthode interactive, c'est-à-dire qu'il n'y a pas d'interaction entre le décideur et l'analyste durant la phase d'analyse. Par conséquent, il suffit de faire varier paramétriquement les poids assignés aux objectifs afin d'obtenir une approximation de l'ensemble des solutions optimales. Par la suite, ces solutions sont présentées au décideur qui choisira l'une d'entre elles.

Notons bien qu'il est erroné de considérer, si le coefficient de pondération assigné à un objectif est plus grand que celui affecté à un second objectif, que le premier objectif est plus important que le second et vice versa, sauf si l'on admet l'hypothèse de linéarité et d'additivité de la fonction d'utilité du décideur. La méthode des coefficients de pondération permet de générer uniquement les solutions extrêmes efficientes. » (Slim Zekri, 2001)

2. Optimalité Parétienne

« Ce concept constitue la pierre angulaire de la programmation multi-objectif. En effet, contrairement à la PL conventionnelle qui donne une solution unique à un problème déterminé, la PMO génère un ensemble de solutions. Le problème fondamental consiste à s'assurer que de telles solutions sont optimales. Etant donné qu'il n'y a plus un seul objectif à maximiser mais plutôt un ensemble d'objectifs conflictuels, il devient impossible de classer les solutions suivant un ordre déterminé unique. Cette impossibilité est le résultat du fait qu'une classification suivant un critère donné diffère complètement d'une autre classification suivant un deuxième critère ou objectif. Par conséquent, il n'existe pas une solution qui sera la meilleure sur tous les critères ou optimales dans le sens classique du terme.

Vilfredo Pareto (1896) a introduit le concept d'efficience à l'économie du bien-être et qui par la suite a reçu son nom : Optimalité Parétienne. Suivant Pareto, « une allocation est efficiente pour un ensemble donné des goûts des consommateurs, des ressources et de la technologie, s'il est impossible de trouver une autre allocation qui améliorerait le sort de quelqu'un et ne dégraderait le sort de personne » (Begg et al. 1989). Ce concept a été étendu à la théorie de la décision multicritère afin de différencier les solutions optimales dans le sens de Pareto de celles non optimales.

Ainsi, on peut donner la définition suivante : une solution optimale, dans le sens de Pareto, est toute solution faisable de telle manière qu'il n'existe aucune autre solution qui permette d'atteindre des valeurs égales ou meilleures pour tous les critères considérés et une valeur strictement meilleure au moins pour un critère.

Les solutions Pareto optimales sont aussi appelées solutions efficaces ou non dominées » (...) « A la différence de la théorie de l'utilité, qui permet de classer par ordre toutes les solutions à un problème, la théorie multicritère permet uniquement de séparer les solutions efficaces de celles qui ne le sont pas. Aucune classification n'est possible dans l'ensemble des solutions Pareto-optimales. » Slim Zekri

3. Méthode choisie

Pour l'élaboration du modèle de base des simulations, nous avons opté pour la méthode des coefficients de pondération. Nous avons simplement assumé que le coefficient de pondération associé à chaque activité est égal à 1. Dans notre modèle, la fonction objectif se présente donc sous la forme d'une fonction unique agrégée.

En raison du concept d'optimalité Parétienne et de la notion de solution non dominée, la valeur que prendra l'objectif doit être manipulée avec précaution. C'est pourquoi les valeurs que prendront les variables de décision dans le cadre de l'optimisation de l'objectif agrégé doivent rester ouvertes à la négociation entre les acteurs.

Cependant la valeur que prendra cette fonction est néanmoins significative du fait de la neutralité (apparente) des coefficients de pondération appliqués.

Remarque :

- Dans le cadre des simulations, nous ferons varier le poids relatif de chaque objectif ;
- A titre de référence, nous procéderons dans les simulations à une programmation multi objectif selon la méthode des contraintes.

Chapitre IV : Le modèle

Comme l'explique Béatrice Ezerzer (1991), la complexité d'un réservoir multi-objectif requiert généralement que les décisions de lâchers d'eau soient déterminées par un modèle de simulation ou d'optimisation, pour la planification aussi bien que pour les opérations en temps réel.

Les qualités requises pour un modèle sont la fiabilité et la rapidité. Un compromis entre la complexité du système et le besoin de simplification doit être trouvé. Cependant, les nouvelles techniques mathématiques ainsi que l'accroissement des performances des ordinateurs ont permis un progrès certain dans la modélisation des réservoirs (...).

Ainsi, la fonction objectif est devenu non-linéaire et les états de la nature, déterministes, sont devenus stochastiques.

La gestion d'un réservoir est définie par des variables d'état, des variables de contrôle ou de décision et des objectifs de gestion. D'un cas à l'autre, les variables d'état (habituellement le niveau du réservoir), et les variables de décision (le niveau des lâchers d'eau), peuvent être différentes, mais la différence la plus significative vient de la définition des objectifs de gestion.

Pour chaque état de la nature, les principales variables de décision sont les activités de production et les activités d'irrigation. Chaque activité définit une culture déterminée, avec les techniques de production et d'irrigation associées, pour un type déterminé de sol.

Afin de pouvoir procéder à la modélisation, nous avons dû adopter les postulats suivants :

- Seule l'incertitude sur la disponibilité d'eau a été prise en compte. Les prix et la disponibilité des autres facteurs de production ainsi que les prix des produits sont considérés comme connus ;
- Les états de la nature sont spécifiés comme des niveaux différents de dotation en eau et on suppose que la probabilité d'occurrence d'un état de la nature dans une période déterminée est indépendant de l'état qu'il y avait dans la ou les périodes antérieures.
- L'exploitant n'est pas limité par la disponibilité des facteurs et il est donc capable de mettre en œuvre les moyens nécessaires en fonction des différents niveaux de précipitation et d'irrigation.

I. Modélisation de l'hydroélectricité

Il s'agit de modéliser ici les caractéristiques physiques (modélisation du réservoir), techniques (calcul du rendement énergétique) et économiques (calcul du revenu et objectif) du barrage hydroélectrique.

1. Modélisation du réservoir

Nous allons le considérer comme un réservoir ayant :

A. Un volume fini

Afin de simplifier le modèle, notamment en ce qui concerne le calcul de la hauteur de chute, nous allons considérer que le réservoir à la forme d'un cube de 100 mètres d'arrête. La capacité de stockage du barrage est donc de 1 million de mètres cubes.

On a l'équation :

$$\text{VMB} = \text{SR} * \text{HR}$$

Avec :

VMB le Volume Maximum de stockage du Barrage en mètre cubes
SR la Surface du Réservoir en mètres carrés
HR la Hauteur du Réservoir en mètres

Il est cependant important de noter que la forme du barrage choisie n'est pas sans incidence sur les résultats du modèle, car elle influe fortement sur le rapport entre le volume d'eau contenue et la hauteur de chute qui y est associée, laquelle permet de déterminer l'électricité générée par un mètre cube d'eau relâché. Aussi nous évaluerons l'importance de la forme du barrage dans nos simulations.

B. Niveau d'eau initial

Lorsqu'un barrage hydraulique est achevé, il n'est pas mis en service immédiatement. En effet, il est nécessaire d'attendre qu'il se remplisse jusqu'à un niveau estimé minimum pour lui permettre de débiter son activité dans des conditions satisfaisantes.

Soit :

XI niveau initial d'eau du barrage

Par exemple, dans le cas d'un barrage à vocation hydroélectrique, la production d'électricité ne débute pas dès que cela est techniquement possible car dans ce cas-là, la hauteur de chute, facteur de la production d'énergie, est faible et la productivité par mètre cube d'eau est faible. Il faut donc attendre que le volume contenu dans le barrage ait atteint un niveau acceptable, ce qui peut prendre, en fonction des dimensions de l'ouvrage et des conditions météorologiques, jusqu'à plusieurs années. Dans le cadre de notre travail, nous allons considérer un réservoir ayant atteint sa « maturité » et fonctionnant depuis plusieurs années. Aussi, le niveau initial auquel nous faisons référence est celui d'un barrage en activité.

Pour le déterminer, plusieurs techniques sont possibles (liste non exhaustive) :

- ❑ L'évaluation par les acteurs

Du stock d'eau minimal qu'ils estiment souhaitable en début de cycle de production pour permettre une reprise normale de l'activité. Le gestionnaire de l'ouvrage fait cette évaluation en fonction de son expérience, de la demande à laquelle il devra faire face et des contraintes qu'il doit respecter.

- ❑ Simulation sur plusieurs années

L'on peut aussi choisir arbitrairement un niveau initial plausible, puis faire tourner le modèle sur un grand nombre d'années consécutives. Le dernier niveau XI obtenu pouvant être considéré comme le plus réaliste. Le temps de calcul de notre ordinateur ne nous permet malheureusement pas d'opter pour cette solution.

- ❑ Statistiques météoclimatiques et remplissage du réservoir

Le cycle de production débutant en novembre, il est possible en se basant sur une étude statistique de la recharge en eau (précipitation à venir) et de la demande d'électricité, donc d'eau, d'estimer un niveau minimal moyen nécessaire pour la reprise de l'activité. Par exemple, si les statistiques indiquent qu'entre le début de l'année et le début de la demande d'électricité les précipitations sont suffisantes pour remplir entièrement le barrage, le niveau minimal de début de cycle est égal à 0 mètre cube. C'est cette dernière solution que nous avons choisie, et afin de tester la pertinence du niveau d'eau initial choisi, nous allons procéder à des simulations dans lesquelles ce niveau est supérieur puis inférieur.

Remarque :

- notre modèle ayant un horizon de temps égal à l'année, il est important de reprendre ce stock d'eau initial en tant que contrainte de volume minimum à conserver dans le barrage à la fin du cycle de production. Ceci afin d'éviter que l'activité des années postérieures ne soit compromise par l'utilisation de la totalité de l'eau stockée (cf contraintes de stock minimal).

C. Recharge périodique

La recharge périodique est la quantité d'eau qui entre dans le stock d'eau du barrage par période de temps et elle est composée de deux éléments qui sont les précipitations et la fonte des neiges.

a] Les précipitations

Il ne s'agit pas uniquement des précipitations reçues sur la surface du réservoir mais aussi de celles reçues sur l'ensemble du bassin versant et qui s'écoulent jusqu'à lui. L'estimation de celles-ci se fait à partir des statistiques pluviométriques disponibles et des données recueillies sur l'ouvrage au cours des années passées. A partir de ces deux données, des corrélations peuvent être mises en évidence et c'est sur leur base que l'on peut déterminer à quelle recharge en eau correspondront chaque niveau de précipitations.

Soit :

$$Q = PP(e,s) * RED(s)$$

Avec :

PP(e,s) précipitations en mètres cubes par période et état de la nature
Q recharge en eau du barrage en mètres cubes par période et état de la nature
RED(s) facteur/quotient de ruissellement des précipitations vers le barrage

Remarque :

- on estimera dans notre travail que RED est déterminé par la superficie du bassin versant du barrage et le ruissellement ;
- RED(s) est indexé sur les périodes car durant l'hiver, une partie des précipitations tombées en altitude y reste sous forme de neige et ne parvient au barrage qu'au moment de la fonte des neiges

b] La fonte des neiges

La fonte des neiges, par l'intermédiaire du ruissellement est, elle aussi, un facteur important de la recharge en eau du barrage.

La quantité d'eau dans le réservoir provenant chaque année de la fonte des neiges est une variable directement liée à la géographie du site, ainsi qu'aux aléas climatiques. Dans le cadre de notre étude, cette dernière revêt une importance spéciale. En effet, elle a pour particularité de survenir au printemps, c'est-à-dire à un moment où la demande en eau pour la production d'électricité est relativement peu importante, tandis que la demande d'eau pour l'agriculture se réalise.

On estime qu'elle est indexée sur les précipitations de la période précédente, mais que cette corrélation est variable et difficile à identifier. Aussi ne l'intégrons-nous que comme un paramètre qui varie en fonction des périodes.

FN(s) eau de Fonte des neiges parvenant au barrage par période, en m³

Remarque : FN n'existe pas pour toutes les périodes puisqu'il n'y a pas, par exemple, de fonte des neiges en décembre, ou très peu.

c) Les lâchers d'eau

Ils se composent des lâchers à but énergétique P(« électricité »,s) et des lâchers à but non énergétique ECR. Pour connaître le montant de la production d'électricité, il est en effet important de savoir quelle part du volume d'eau relâchée a été effectivement employée pour la production d'électricité et quelle part l'a été afin de prévoir des phénomènes de crues (écrêtement) qui, s'ils ne sont pas anticipés, peuvent se traduire par des dégâts physiques et matériels en amont comme en aval de l'ouvrage, entraînant un coût financier très largement supérieur à la perte occasionnée par la non valorisation électrique de P(« électricité »,s).

Remarque

Les lâchers à but énergétique et non énergétique sont les deux variables de décision du concessionnaire hydroélectrique. C'est uniquement par leur biais qu'il peut influencer sur les résultats de son activité (les autres facteurs restant fixes). Il lui appartiendra de faire correspondre au plus près ces variables aux états de la nature.

- **à but énergétique**

L'objectif d'un barrage hydroélectrique est la production d'électricité. Schématiquement, celle-ci se fait en relâchant une certaine quantité d'eau qui dans sa chute entraîne les **turbines** qui génèrent ainsi de l'électricité. Cependant, il existe des contraintes de nature technique et physique qui limitent ces lâchers d'eau :

- Contrainte de débit minimal

Pour que les turbines puissent fonctionner, il est nécessaire de leur assurer un débit minimal d'eau en mètre cube par seconde.

- Contrainte de débit maximal

A l'inverse, chaque turbine ne peut traiter plus qu'un certain débit d'eau.

Nous avons opté pour un débit fixe de 5 m³ par seconde.

- **à but non énergétique**

Il s'agit ici d'une variable d'ajustement, mais qui peut être de deux natures :

- dépassement de la contrainte de débit maximal des turbines ;

Si le barrage est plein et que la recharge entrant est supérieure à la capacité de traitement des turbines, alors l'eau est perdue pour la production d'électricité et doit être relâchée sans gain.

- Soutien d'étayage et écrêtement ;

Le gestionnaire du barrage peut, lorsqu'il anticipe des précipitations importantes pouvant entraîner la situation précédente, procéder à un soutien d'étayage. C'est une opération qui consiste à relâcher un volume d'eau sans l'utiliser pour la production d'énergie.

L'objet de cette opération est double :

- éviter que l'ouvrage hydraulique ne subisse des dégâts dus à une crue de ses affluents ;
- protéger les habitations et installations en aval de l'ouvrage, en jouant un rôle tampon par la rétention d'une partie des eaux.

Remarque

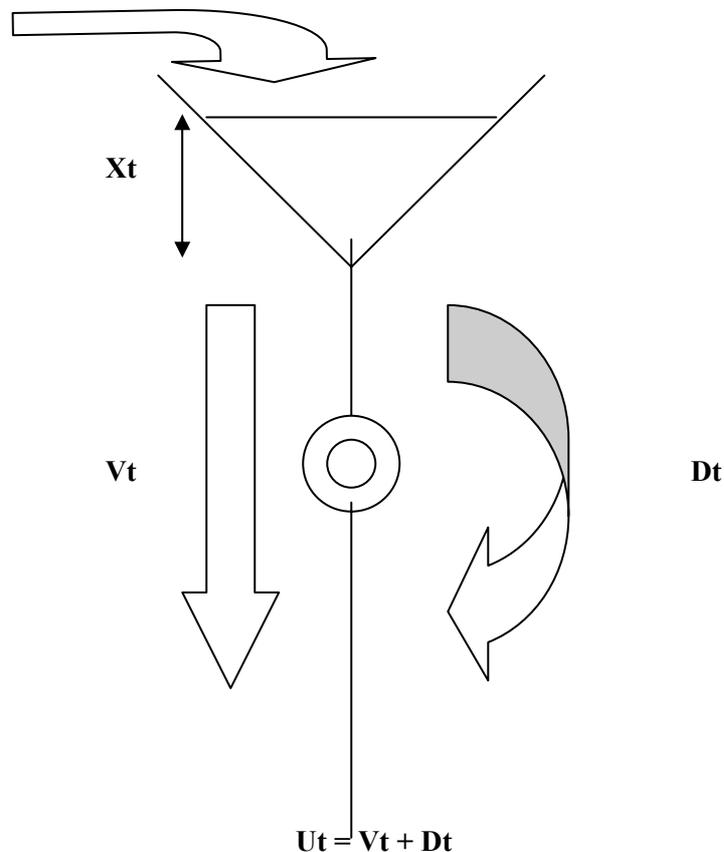
Du fait de la taille de nos périodes d'étude, on considère que le gestionnaire est capable de faire l'écrêtement voulu en temps et heure.

$ECR_{n+1}(e_1, \dots, e_{n+1}, S)$ lâchers d'eau à but non énergétique (écrêtement)

Nous avons réalisé une représentation graphique du réservoir et de ses variables techniques et physiques :
Soit

Q_t la recharge d'eau au temps t
 X_t le volume d'eau stockée dans le réservoir
 V_t les lâchers à but énergétique
 D_t les lâchers à but non énergétique (soutien d'étayage)
 U_t les lâchers totaux ($U_t = V_t + D_t$)
 C_t le coût marginal de production de l'électricité (variable économique exogène)
 $R(S_t, U_t)$ fonction de génération de l'unité hydroélectrique

Q_t



2. Calcul du bénéfice marginal

Comme précisé dans la fonction objectif, nous devons calculer le bénéfice marginal dérivé de l'utilisation d'une unité d'eau pour la production électrique, en chaque période.

Le bénéfice marginal étant le dérivé du bénéfice total, nous allons d'abord écrire l'équation du bénéfice total de l'activité hydroélectrique.

Le bénéfice marginal sera calculé par le programme **GAMS**.

Le bénéfice peut dans sa forme la plus simple s'écrire :

$$B = \text{Revenu} - \text{Coûts de production}$$

$$YE = \text{rendement} * \text{prix} - \text{coûts fixes} - \text{coûts variables}$$

A. Le revenu de l'hydroélectricité

Par revenu, on entend le chiffre d'affaires généré par la production énergétique de l'unité hydroélectrique. Cependant, dans le cas d'un barrage, il faut prendre en compte les volumes d'eau stockés non utilisés à la fin du cycle de production qui, s'ils ne participent pas au revenu de l'année en cours, seront valorisés l'année suivante.

Schématiquement, on peut écrire l'équation de revenu suivante :

$$YE = VS + \sum_{t1}^{t2} CA_t$$

Avec :

$$CA_t = NRJ_t * P_t$$

Soit :

YE revenu total du cycle de production

VS Valorisation des Stocks en fin de cycle

CA_t Chiffre d'Affaires par période t

NRJ_t l'électricité générée (le rendement) en kWh par période t

PMP(s) le prix auquel est valorisée cette énergie par période t

Nous allons dans les sous-parties suivantes décomposer les termes introduits ici et préciser leurs spécificités ainsi que la forme sous laquelle nous allons les modéliser.

a] Rendement

Le rendement se caractérise par des variables de décision (volume d'eau employé à l'instant t), et par une fonction technique qui est la fonction de génération d'électricité de la centrale.

On peut l'écrire :

$$NRJ = P(\ll \text{elec} \gg, s) * r(St, Ut)$$

Avec

P(« elec »,s)

les lâchers d'eau à but énergétique

r(St, Ut)

la fonction de génération d'électricité de la centrale

- Fonction de génération d'électricité

$r(St, Ut)$ dépend des caractéristiques techniques de la centrale, et plus précisément des turbines.

Afin de comprendre le lien entre le volume d'eau du barrage et la production d'électricité, nous allons présenter les relations physiques qui permettent de calculer l'énergie dégagée par la chute d'un corps.

Pour chaque période, la fonction de génération est composée d'une intensité électrique (exprimée en Joules ou en kW) ainsi que d'une quantité d'énergie qui, elle, s'exprime en kWh. C'est cette quantité d'énergie que l'on valorise par un prix.

Les variables qui déterminent l'intensité sont la hauteur de chute et le débit, tandis que la variable qui détermine la quantité d'énergie est le volume d'eau relâché.

□ Calcul de l'énergie cinétique

L'énergie cinétique dégagée par la chute d'un mètre cube d'eau est égale à :

$$EC = 0.5 * M * V^2$$

Avec :

EC : Energie cinétique exprimée en Watts

HC : Hauteur de Chute en mètres

V : vitesse, en mètres par seconde, atteinte par un corps lâché à vitesse nulle après HC mètres de chute

M : masse du corps en kilogrammes

La vitesse est calculée par l'équation :

$$V^2 = 2 * G * HC$$

Avec :

G : l'accélération de la pesanteur en mètre par seconde carré, l'accélération de la pesanteur terrestre étant de 9.81 m/s^2

Or la hauteur de chute est liée à la forme du réservoir ainsi qu'au volume d'eau contenu par la fonction (pour un réservoir cubique d'arrête 100m) :

$$HC = X / S$$

Avec :

X : volume contenu dans le barrage

S : Surface du réservoir (ici $100 * 100\text{m}$, soit $S = 10000 \text{ m}^2$)

L'énergie cinétique dégagée par un mètre cube d'eau est donc une fonction **croissante** de sa hauteur de chute.

Cependant, il ne s'agit pas de la seule variable à prendre en compte pour calculer la production d'électricité

□ Le débit des lâchers d'eau

Les équations précédentes nous ont permis de calculer l'énergie cinétique de la chute d'un mètre cube d'eau. Mais cette puissance est aussi fonction du débit d'eau traité par les turbines. Ce débit s'exprime dans l'équation de calcul de l'énergie cinétique par la masse du corps en chute. Ainsi, un débit de $1 \text{ m}^3/\text{s}$ d'eau pendant une seconde correspond à une masse de 1000 kg.

En raison de contraintes techniques, il existe un débit minimal en dessous duquel les turbines ne peuvent fonctionner, ainsi qu'un débit maximal au delà duquel elles ne peuvent transformer l'énergie cinétique en électricité.

De plus, les turbines ne peuvent transformer la totalité de l'énergie cinétique en électricité. Elles ont un coefficient de rendement qui varie selon leurs caractéristiques, mais que nous estimerons égal à 81%.

Afin de simplifier le modèle, nous considérons que la puissance dégagée peut être calculée par l'équation ci-dessous, qui est valable pour les applications de petite dimension.

$$P \text{ (kW)} = 8 \times HC \text{ (m)} \times \text{Débit (m}^3/\text{s)}$$

En effet, si l'on considère la hauteur de chute maximale de notre réservoir, soit 100 m, la formule complète donne une puissance de 794 kW contre 800 kW pour la formule simplifiée. La différence étant minime, nous considérons cette formule comme représentative.

Toujours dans un but de simplification de notre modèle, nous considérerons que ce débit est égal à 5 m³/s, ce qui donne un volume total traitable de 432 000 m³ par jour, le volume maximal du barrage étant de 1 millions de m³.

Cette contrainte de débit s'exprime au niveau du prélèvement d'eau pour la génération d'électricité. En effet, on considère que le débit est de 1 m³/s, et ce pendant une demi-heure par jour.

Le volume maximum qu'on peut prélever pendant un jour est donc égal à :

$$5 \text{ m}^3/\text{s} \times 1800 \text{ secondes} = 9000 \text{ m}^3$$

Le volume maximum qu'on peut prélever pendant une période est donc égal à :

$$9000 \text{ m}^3 \times \text{nombre de jours de la période}$$

Si, grâce aux équations précédentes, l'on peut calculer l'intensité dégagée par la chute d'un mètre cube d'eau et qui peut s'exprimer en Watts, il nous faut maintenant calculer la quantité d'énergie qui, elle, s'exprime en kWh.

□ Les lâchers d'eau totaux

La quantité d'énergie produite est le produit de l'intensité, que nous avons calculé précédemment, par le temps pendant lequel elle s'exerce. Ce temps est donné par le rapport du volume utilisé (en m³) sur le débit (en m³/s). La quantité d'énergie, elle, s'exprime en Kilos Watt Heures (kWh).

Ainsi, pour générer 1 kWh, il faut maintenir une intensité de 1 kW pendant une heure, c'est-à-dire 3600 secondes ce qui correspond, pour un débit de 5 m³/s, à un prélèvement d'eau de :

$$P = 3600 \times \text{débit}$$

$$P = 18000 \text{ m}^3$$

Remarque : Les notions de puissance (ou intensité) et de quantité d'énergie (ou travail) sont différentes en électricité. Ainsi, une puissance de 10 kW pendant une heure ne correspond pas à une puissance de 5 kW pendant 2 heures.

□ Le coefficient de transformation de l'énergie par les turbines

Pour des raisons d'efficacité technique, la totalité de l'énergie cinétique ne peut être transformée en électricité. Le coefficient de transformation de cette énergie en électricité est en fonction des turbines, de 70 à 90 %, aussi choisirons-nous pour notre modèle une valeur moyenne de 81%.

L'équation qui permet de calculer l'intensité de l'électricité généré est :

$$P \text{ (kW)} = 8 \times HC \text{ (m)} \times \text{Débit (m}^3/\text{s)}$$

L'équation qui permet de calculer la quantité d'électricité générée est :

$$P \text{ (kW/h)} = [P(\text{'elec',s}) * (8 \times \text{HC (m)} \times \text{Débit (m}^3\text{/s)})] / 3600$$

Avec :

$P(\text{'elec',s})$ correspond au volume d'eau utilisé
3600 le nombre de secondes dans une heure

b) Le prix de l'électricité

Dans la théorie classique, demande, offre et prix sont reliés et s'équilibrent donc automatiquement. Cependant, dans le domaine particulier de l'électricité en France, on peut douter de la véracité de cette assertion.

D'abord, parce qu'il s'agit d'une politique de prix administrés. Ensuite, parce que le consommateur n'a pas connaissance des origines de cette électricité (pas de traçabilité), et n'a donc pas la possibilité de choisir entre elles sur un marché. De plus, l'unité hydroélectrique modélisée étant de petites dimensions, elle ne saurait influencer significativement sur le prix (postulat d'atomicité de l'offre).

Ce choix est donc réalisé par EDF, en fonction de divers types de préoccupations d'ordre stratégique, concurrentiel, technique ou économique (liste non exhaustive) qui prennent en compte la totalité du parc énergétique. En conséquence, il s'agira donc d'une donnée exogène au site étudié.

- Le coût alternatif

Pour estimer la valeur pour EDF de l'électricité produite, nous allons utiliser une variable PMP(s), le prix moyen périodique de l'électricité, qui correspond au coût marginal de la production d'électricité, c'est-à-dire ce que la production d'un kWh au temps t coûterait en France, étant donné la disponibilité des unités de production d'électricité et de la demande nationale. C'est ce que l'on appelle la méthode de valorisation au coût alternatif (décrite par Anne Burill, 1997).

Le choix de cette méthode de valorisation pour l'hydroélectricité s'explique par la gestion que fait EDF des unités hydroélectriques. En effet, comme nous l'avons vu plus haut, l'énergie de l'eau est utilisée quand les autres moyens de production sont insuffisants (pics de demande ou augmentation subite de la demande). Elle permet de faire des économies sur ce que cela coûterait de satisfaire cette demande par des moyens autres (construction d'unités nucléaires supplémentaires qui ne fonctionneraient pas à plein régime (faible coût de fonctionnement mais fort coût d'investissement), accroissement de l'utilisation des combustibles fossiles (faible coût d'investissement mais fort coût de fonctionnement) etc...).

C'est une variable exogène à notre modèle, en ce qu'elle doit être calculée pour l'ensemble de la demande et de la production nationale d'électricité (pas seulement hydroélectrique mais de l'ensemble des unités de production), par le modèle de gestion d'EDF. Dans ce dernier, cette variable est aléatoire et dépendante des événements climatiques (températures, précipitations), de la législation (les normes d'émission de gaz à effets de serre sont des contraintes limitant l'utilisation des unités travaillant avec des combustibles fossiles) et d'autres facteurs qui dépassent largement le cadre de notre étude. C'est pourquoi nous ne l'incorporerons que comme un paramètre indexé sur la période.

Nous avons opté pour un coût alternatif de 50 centimes de francs du kilo Watt heure (qui correspond au coût du charbon en 1995), en période pleine (durant l'hiver), à 35 centimes de francs (qui correspond au coût du gaz en 1995) en périodes creuses (été).

L'information sur le coût des sources d'énergies alternatives émane du rapport n°1359, de l'Office parlementaire des choix scientifiques et technologiques, sur l'aval du cycle nucléaire (C. Bataille et R. Galley, 2000, assemblee-nationale.fr).

Remarque :

- Dans le cadre de l'ouverture du marché de l'énergie français à la concurrence européenne, le coût alternatif pourrait être égal au coût d'achat de l'énergie aux autres producteurs européens.

- *Contrainte de demande*

La contrainte de demande résulte de la conjonction de plusieurs facteurs :

- **Immédiateté** de la production hydroélectrique

Certains moyens de production d'électricité, comme le nucléaire par exemple, nécessitent un délai plus ou moins long entre leur mise en marche et le moment où se réalise la production. *A contrario*, la production d'électricité par les unités hydroélectriques est quasi instantanée. C'est pourquoi elle n'est utilisée que pour répondre aux pics de consommation, qui sont limités en temps et en quantité. La production d'énergie de l'ensemble des barrages d'EDF doit donc être au minimum égale à cette demande, en temps et en intensité.

On appellera cette demande minimum que la production du barrage devra satisfaire DS (Demande à Satisfaire). Nous considérons arbitrairement que cette DS est égale à une demi-heure de production tous les deux jours en période s1 et s2, et à une demi-heure de production tous les trois jours pour les autres périodes. Cependant, nous considérons qu'EDF, par souci de flexibilité, tolère une déviation de moins 20 % par rapport à ce niveau attendu, ce qui est rendu dans le modèle par la contrainte suivante :

$$NRJMIN = NRJREEL \geq DS * 0,8$$

L'on pourrait de la même façon poser une contrainte de production maximale, mais deux raisons s'y opposent. D'abord, du moment que l'unité hydroélectrique respecte la contrainte de production minimale ainsi que les diverses autres contraintes (contrainte de niveau minimal en fin de période, etc.), le fait de dépasser cette production n'est pas dommageable pour l'ensemble du réseau EDF. Ensuite, comme nous l'avons indiqué précédemment, du fait de l'ouverture du marché européen de l'énergie, EDF est maintenant capable d'écouler ce surplus d'énergie à l'étranger. Certes, l'accès à ce nouveau marché est sujet à des contraintes de demande et d'offre, mais les dimensions du site que nous avons choisi de modéliser étant restreintes, il est raisonnable de penser que l'hypothèse d'atomicité de l'offre est respectée, et que cette production pourra être vendue à un prix fixe et sans difficulté.

- Stockage d'énergie

Le facteur précédent est encore conforté par le fait que les retenues d'eau constituent, à ce jour, le seul moyen de stockage d'énergie en grande quantité et n'est donc utilisé qu'en cas d'urgence.

c] Valorisation des stocks en fin de période

La nécessité de procéder à cette valorisation vient du fait que notre modèle, n'étant pas pluriannuel, ne prend pas en compte le profit potentiel des périodes futures. L'objectif de maximisation du bénéfice du cycle actuel implique dès lors l'utilisation de la totalité des ressources, c'est-à-dire de l'eau contenue dans le barrage et ce sans considération des pertes occasionnées à l'activité des périodes futures. Aussi, afin d'éviter cela, allons-nous considérer que le stock d'eau à la fin du cycle correspond à une valeur qui rentre dans le calcul du bénéfice de l'année en cours.

Remarque

On peut aussi créer une contrainte de volume minimal de fin de cycle.

- Paramètres déterminants

Soit :

VS valeur de l'eau stockée dans le barrage à la fin du cycle d'étude.

Pour calculer cette valeur, il faut prendre en compte plusieurs éléments :

- Timing de remplissage du barrage avant la demande d'énergie

Un même volume d'eau peut cependant avoir une valeur différente selon les ouvrages. En effet, le timing de remplissage du barrage est très important. Si celui-ci est situé dans une zone de précipitations automnales importantes, alors cette valeur sera faible car le barrage se remplira avant l'arrivée des périodes de pics de demande (hiver) et même une partie de ce stock devra être relâché sans gain (ou faible) pour la production d'électricité (écrêtement) afin d'éviter des inondations. Si au contraire le réservoir est principalement rempli par la fonte des neiges, cette valeur devient forte car le stock d'eau contenue à la fin de la période représentera une grande partie du volume d'eau disponible pour la génération d'électricité lors des pics de demande (hiver) de l'année suivante.

- Actualisation

Comme c'est l'année suivante, il faudrait peut-être procéder à une actualisation (préférence pour le présent) des bénéfices escomptés, d'autant qu'il existe un risque puisque le remplissage de l'automne année 2 est une variable aléatoire.

- Fonction de calcul

Nous allons calculer la différence entre le stock d'eau initial dans le barrage, et le stock d'eau contenu à la fin de la dernière période :

$$X6(e1,e2,e3,e4,e5,e6) - XI$$

La différence représente la perte ou le gain du stock d'eau de l'année, que nous valorisons par la marge que dégage 1m^3 d'eau dans des situations moyennes par un prix moyen de valorisation PMV. Ce prix de valorisation est assez faible afin de représenter l'actualisation des bénéfices espérés ainsi que leur caractère aléatoire :

$$PMV = 0.01 \text{ f/m}^3 \text{ d'eau.}$$

Donc la valorisation du stock de fin de cycle VS est calculée par l'équation :

$$VS = (X6(e1,e2,e3,e4,e5,e6) - XI) * PMV$$

d] Calcul des coûts

- Coûts fixes

C'est un total fixe que l'on répartit sur le nombre de kWh produits. Plus la production est importante et moins leur part par kWh est grande (économies d'échelle). Dans le cas des ouvrages hydrauliques, ils sont composés de coûts fixes « classiques » qui sont communs à toute entreprise (frais d'entretien, impôts etc.), ainsi que de coûts consécutifs à l'investissement initial nécessaire à la réalisation du barrage, et qui s'expriment dans le bilan sous la forme d'amortissements. Certes, la plupart des activités économiques

nécessitent un investissement initial, mais ceux attendant à l'hydroélectricité possèdent deux caractéristiques qui les en différencient :

- **Dimensions de l'investissement initial**

En effet, la construction de ce type d'ouvrage coûte de plusieurs centaines de millions à plusieurs milliards d'Euros et avec un délai de retour sur investissement au minimum de 20 ans, voire de plusieurs générations. C'est pourquoi ils sont en général entrepris grâce à des fonds étatiques et par des investisseurs institutionnels.

Aussi la part des coûts d'amortissements est-elle très importante dans le calcul du profit annuel et la marge escomptée en est réduite d'autant durant ces premières années, rendant l'exploitation du barrage peu lucrative.

- **La pérennité de l'ouvrage**

Cependant, et sauf événement exceptionnel (séisme etc...), une construction de ce type a une durée de vie de l'ordre de la centaine d'année, voire plus (contre 40 ans pour un réacteur nucléaire). Aussi le délai de retour sur investissement ne représente qu'une période relativement courte de la période d'exploitation possible de l'ouvrage, et de fait la plupart des grands barrages français sont actuellement amortis. Ils bénéficient donc maintenant d'une rente sur les infrastructures qui leur permet de produire de l'énergie à un coût très faible (à peu près 0,01 Euros du kWh) et donc de dégager un bénéfice important : alors que leur coût de production d'électricité est le plus faible de tous les autres moyens de production, *a contrario* cette énergie est valorisée au coût de production le plus élevé de ces mêmes moyens de production.

La question qui se pose dans notre travail est donc de savoir si l'on va considérer un ouvrage qui n'a pas encore effectué son retour sur investissement, et qui subit donc toujours des coûts d'amortissement, ou au contraire un ouvrage assez ancien pour bénéficier de la rente.

La politique de construction de grands barrages hydroélectriques ayant débuté en France en 1915 et atteint son point culminant après la seconde guerre mondiale jusqu'aux années 60, la plupart de ces infrastructures ont déjà été amorties. Aussi choisissons-nous de considérer dans notre travail que le gestionnaire de l'unité aura à faire face à des coûts fixes « classiques » (frais d'entretien, impôts etc...) et bénéficiera de la rente. L'intégration dans le modèle des coûts fixes se fait à l'intérieur de la fonction objectif comme un scalaire annuel qui vient en déduction de la somme des bénéfices périodiques.

CF Coûts Fixes

- Coûts variables

Ils comportent notamment les coûts de main-d'œuvre, d'usure du matériel (turbines), d'achat des biens de consommation intermédiaire (cuivre etc...). Ils sont variables en fonction de l'intensité du courant produit, de la quantité d'énergie, du temps et heure d'activité (par exemple, les pics de consommation ayant lieu notamment en soirée, après la fin de la journée de travail, les agents d'EDF travaillant dans ces heures « non ouvrables » auront par conséquent droit à des compensations salariales).

Cependant, par souci de simplification de notre modèle, nous ne considérerons pas en détail la composition de ces différentes charges variables et nous ne prendrons en compte qu'une catégorie globale appelé CV et regroupant l'ensemble de ces éléments de coûts.

De même, ces CV ne seront fonction que du flux d'eau relâchée. Or, comme nous l'avons déjà précisé (cf point ..), cette variable est composée à la fois des lâchers d'eau à but énergétiques ($P(\ll \text{elec} \gg, s)$) et à but non énergétiques ($D(t)$).

Dans le cas des $D(t)$, cela ne consiste schématiquement qu'à ouvrir les vannes à un débit et pendant une durée déterminée. S'il est faux de considérer que les écrêtements et autres lâchers à but non énergétiques n'entraînent aucun coût de fonctionnement, nous n'allons cependant pas les prendre en compte du fait de leur faible valeur, de leur peu de pertinence dans le cas de notre étude, ainsi que d'un manque d'informations à ce sujet.

C'est pour $P(\ll \text{elec} \gg, s)$ que les coûts variables sont les plus grands puisque la production d'électricité suppose une utilisation du matériel et de la main-d'œuvre plus grande. Ces coûts sont intégrés au niveau du calcul du bénéfice périodique et sont indirectement indexés sur les décisions des périodes actuelles et passées et donc les états de la nature qui permettent de les prendre.

Les données de coût dont nous disposons sont données par kWh et non par unité d'eau. Ces coûts sont de 0.1f/kWh produit par une unité hydroélectrique. Ils ne varient pas en fonction de la période de l'année.

3. Détermination de la fonction objectif de l'activité hydroélectrique

Pour reprendre une dénomination que nous avons utilisée précédemment, l'unité hydroélectrique possède un but, des objectifs et des variables de décision. Le but d'un barrage hydroélectrique sous concession d'EDF est de satisfaire à la demande en électricité nationale. En effet, il faut rappeler le statut particulier d'EDF qui est une entreprise publique ayant une mission d'intérêt général. Elle possède donc des droits mais aussi des devoirs qui la différencient des entreprises de droit privé et qui influent directement sur la gestion de l'activité d'une unité particulière au travers de ses objectifs.

A. Objectifs

Nous allons d'abord distinguer les objectifs de l'unité hydroélectrique qui sont directement liés à la mission de service public d'EDF. Puis, nous identifierons les objectifs qui sont ceux de n'importe quelle entreprise privée qui poursuit ses intérêts individuels. Enfin, nous présenterons l'écriture algébrique de la fonction objectif

B. Objectifs de type public

L'un des principes du droit public est la continuité de la mission de service public. L'objet de ce principe est qu'EDF doit subvenir à la demande d'électricité en permanence, et ce sans considération de bénéfice ou de marge, là où une entreprise privée pourrait suspendre sa production en attente d'un bénéfice marginal plus substantiel.

Dans le cadre de notre étude, cela se traduit par le fait que l'unité hydroélectrique que nous avons modélisé fait partie d'un réseau de production et distribution dont la gestion est nationale. En tant que telle, elle doit caler sa production sur la demande émanant du centre de gestion nationale, tant au point de vue de la quantité à produire qu'au moment où celle-ci doit se réaliser. Si nous avons déjà intégré cet objectif plus haut sous la forme d'une contrainte de demande minimale à satisfaire (DS), elle peut néanmoins être considérée comme un objectif principal par le gestionnaire électrique, ce que nous simulerons dans le chapitre suivant.

Remarque : on pourrait dès lors considérer que la marge de manœuvre du gestionnaire du barrage est nulle, et donc que notre travail est sans intérêt. Mais, de par son réseau, EDF possède un grand nombre d'unités du même type dont la production est substituable. On le voit, des possibilités d'ajustement existent. Aussi nous semble-t-il correct d'admettre que le gestionnaire de l'ouvrage peut gérer librement sa production à condition de répondre à une demande minimale.

Cet objectif, s'il n'est pas mesuré en termes financier, est inscrit dans notre modèle sous la forme :
Si on écrit l'objectif sous sa forme périodique :

Minimiser $DN(s)$

$$DN(s) = DS(s) - PkWh(s)$$

Sous contrainte :

$$DS(s) \leq PkWh(s)$$

Avec :

DN(s) la déviation négative
 DS(s) la demande d'électricité à satisfaire

Si on écrit l'objectif sous sa forme annuelle :

$$\text{Minimiser } \sum_{s1}^{sn} DN(s)$$

Remarque : il existe d'autres devoirs d'EDF qui découlent de son statut de service public, tels que l'obligation de non discrimination entre les usagers etc..., mais ils n'influencent que peu sur l'objet de notre travail, aussi nous ne les prendrons pas en compte.

- Objectif de type privé

Bien qu'étant une entreprise publique, EDF n'en poursuit pas moins un objectif de type privé qui est la maximisation de son profit à court, moyen et long terme. Dans notre modèle, le court terme correspond à une période, tandis que le moyen terme représente l'ensemble du cycle de modélisation, c'est-à-dire l'année. Comme nous ne considérons que l'allocation inter annuelle de la ressource en eau, le long terme n'est pris en compte qu'à travers les contraintes de fin de cycle. L'arbitrage entre ces trois horizons de planification se fait habituellement par l'intermédiaire du taux d'actualisation, qui permet de refléter en termes financiers la préférence des décideurs pour le présent. Du fait du caractère particulier de l'entreprise publique EDF, de la rente d'infrastructure dont elle jouit, de sa mission de service public, nous considérons que le calcul du taux d'actualisation n'est pas représentatif de la réalité de son activité. Aussi allons-nous détailler ci-dessous la façon dont nous arbitrons entre les profits du court, moyen et long terme :

1. profit à court terme

La gestion d'une entreprise privée classique consiste, dès lors qu'on est sûr d'avoir le meilleur prix, à vendre au plus vite la totalité de sa production pour diminuer les risques (d'une chute des prix par exemple) et disposer d'avoirs monétaires, entre autres. C'est ce que l'on appelle la préférence pour le présent. Dans le cas d'EDF, le risque est justement d'utiliser trop tôt ses ressources et de ne plus pouvoir satisfaire, par la suite, à la demande et à sa mission de service public. C'est pourquoi on peut dire qu'à l'intérieur de chaque période, les profits ont la même pondération, indépendamment du moment où ils se réalisent, ce qui constitue notre seconde hypothèse.

Soit $YE(e_n, s)$ le bénéfice dégagé par l'activité hydroélectrique par période

$$\text{Objectif électrique court terme} = \text{maximiser } YE(e_n, s_n) \quad (1)$$

2. profit à moyen terme

De la même façon, on considère qu'il n'existe pas de préférence entre les périodes d'un même cycle de production, on n'en actualise pas les profits. Cette particularité conforte notre deuxième hypothèse sur la dissociation dans le temps de la comparaison des bénéfices marginaux.

$$\text{Objectif électrique moyen terme} = \text{Maximiser } \sum_{n1}^{n6} YE(e_n, s) \quad (2)$$

3. profit à long terme

Comme toute entreprise classique, EDF cherche à assurer la pérennité de son activité. Ceci pour plusieurs raisons :

- les profits futurs

En dépit de la préférence pour le présent, l'appareil industriel doit être préservé pour assurer la génération de profits futurs.

- la rente immobilière

Les grands projets de type hydroélectriques, s'ils permettent d'offrir une électricité à un coût de production très faible, nécessitent en contrepartie des investissements initiaux colossaux (jusqu'à plusieurs milliards d'Euros).

Le retour sur investissement est donc très long (20 à 40 ans) et décourage la plupart des investisseurs privés. Ils sont donc souvent entrepris par des entreprises de type institutionnel. Cependant, une fois l'investissement récupéré, le gestionnaire du barrage bénéficie alors (comparativement à ces concurrents) d'une rente du fait de la présence d'infrastructures déjà amorties. D'où l'intérêt qu'a le gestionnaire du barrage à la pérennisation de son activité.

- la continuité de la mission de service public

Nous avons déjà décrit plus haut cette mission et les obligations qui en découlent et ne développerons pas plus ce point. Au vu de tous ces éléments, on comprend qu'on ne puisse pas négliger l'activité des périodes futures. Aussi l'intégrerons-nous à l'objectif par l'addition au profit du cycle de production sous la forme d'une valorisation des stocks (VS) dont nous avons déjà parlé plus haut.

C. La fonction objectif

En tenant compte de tous les éléments exprimés ci-dessus, on peut écrire la fonction objectif sous la forme algébrique :

$$\text{Objectif électrique} = \text{Maximiser } \sum_{n=1}^{n_6} YE(e_n, s) + VS \quad (3)$$

II. Modélisation de l'irrigation

L'objectif de la modélisation de l'irrigation est d'estimer le volume d'eau requis en fonction des conditions climatiques, des surfaces irriguées, du type de cultures etc... et donc d'évaluer le surplus que l'exploitant agricole peut dériver de l'irrigation.

Dans l'optique d'une gestion sous contrainte, cela permet d'avoir une idée du montant des compensations financières acceptables lors de la négociation avec les agriculteurs ; pour une gestion *dual critèria*, qui est la forme de management pour laquelle nous avons opté, cela permet de relâcher l'eau uniquement quand son utilité marginale est optimale pour EDF ou pour le secteur agricole.

Cependant, il existe différentes approches pour estimer l'apport d'eau nécessaire et son utilité pour les cultures. Principalement, on distingue l'approche statistique, qui a l'avantage d'agréger et donc de simplifier la diversité des facteurs agricoles, de l'approche agronomique qui permet la prise en compte détaillée des événements climatiques (nos états de la nature) et est donc adaptée à l'estimation de l'efficacité de l'irrigation. Nous allons brièvement décrire ces deux approches avec leurs intérêts et limites.

Nom	Description	Unité	Intervalle de variation		nature	Indexation sur états de la nature			notes
			période	année		OUI		NON	
						directe	indirecte		
XI	Niveau d'eau initial du barrage	Mètre cube		X	scalaire*			X	Estimation par le décideur
EFD	Coefficient d'efficience de transport	%		X	scalaire			X	Regroupe les pertes de transport, d'application etc..
CTT	Coefficient de transformation des turbines			X	scalaire			X	Dépend de l'efficience des turbines
SR	Surface du réservoir	Mètre carrés		X	scalaire			X	Permet de calculer la hauteur de chute
VMB	Volume maximum du barrage	Mètre cube		X	scalaire*			X	
CVE	Coûts variables sur l'électricité	€/kWh		X	scalaire			X	
CFE	Coûts fixes sur l'électricité	€		X	scalaire			X	
PMV	Prix moyen de valorisation du stock	€		X	scalaire			X	
PMP(s)	Prix moyen périodique de l'électricité	€/kWh	s		paramètre			X	Donnée exogène
Q(e,s)	Recharge du barrage	M3	X		paramètre	X			C'est l'expression des états de la nature
YE(e _n ,s)	Bénéfice de l'activité hydroélectrique	€			variable		X		La maximisation de la somme des YE est un objectif
X _{n+1} (e ₁ ,...,e _{n+1})	Niveau d'eau dans le barrage	M3	X		variable		X		
HC _n (e ₁ ,...,e _{n+1})	Hauteur de chute	mètres	X		variable		X		Influe directement sur l'énergie générée par la chute d'une unité d'eau

Nom	Description	Unité	Intervalle de variation		nature	Indexation sur états de la nature			Notes
			période	année		OUI		NON	
						directe	indirecte		
ECR(e,s)	Ecrêtement	M3	X		variable		X		Permet de maintenir X en dessous de VMB
P(u,s)	Prélèvement d'eau du barrage	M3	X		variable		X		C'est la variable de décision dans la gestion du barrage
PVS(e ₁ ,...,e _{n+1})	Prélèvement de valorisation du stock d'eau	M3		X	variable		X		Elle ne s'effectue que pour la dernière période
VS(e ₁ ,...,e _{n+1})	Valorisation du stock d'eau	M3		X	variable			X	Elle ne s'effectue que pour la dernière période

Approche statistique

Comme son nom l'indique, cela consiste à estimer la consommation d'eau et l'utilité de l'irrigation dans une région déterminée, au moyen des données statistiques sur l'agriculture et les consommations d'eau la concernant.

Intérêt

On peut donc déduire des données régionales, et ce d'une manière assez simple, la consommation d'eau optimale par hectare pour une année donnée. Pour cela, il est nécessaire d'admettre quelques postulats :

- ❑ les agriculteurs se comportent en agents rationnels, au sens économique ;
- ❑ les agriculteurs font un usage optimum des ressources en eau sur leurs parcelles irriguées ;
- ❑ Il existe une relation proportionnelle entre le volume d'eau consommée et la surface irriguée.

Avec cette approche, cependant, la diversité des cultures, des techniques d'irrigation, des sols, et des exploitations agricoles n'est pas prise en compte. Il est néanmoins possible d'affiner les résultats statistiques en distinguant à l'intérieur de la région les exploitations ayant des caractéristiques comparables et en agrégeant ces dernières en fonction d'une typologie. Afin de calculer le revenu, il faut ensuite comparer dans la même aire le revenu net annuel d'exploitations agricoles similaires, avec et sans irrigation. La comparaison doit être réalisée sur plusieurs années afin de permettre de corrélérer les différences de revenu avec les événements climatiques et le type d'exploitation.

Limites

Cependant, bien que cette méthode soit très simple, elle est en pratique difficilement réalisable car :

- ❑ Les statistiques sur la consommation d'eau sont difficiles à obtenir ;
- ❑ La collecte d'informations suffisantes est problématique ;

En effet, les agriculteurs sont peu enclins à communiquer des chiffres quant à leur revenu.

- ❑ Les exploitations ne pratiquant pas du tout l'irrigation sont rares ;
- ❑ Une typologie d'exploitation est difficile à mettre en place, particulièrement lorsque l'on veut y intégrer des données pédologiques et géographiques.

Si deux exploitations d'une même aire géographique sont a priori similaires au niveau de la superficie et de l'assolement par type de cultures, et que l'une pratique l'irrigation et l'autre pas, cela résulte souvent du fait qu'elles possèdent des caractéristiques pédologiques ou géographiques différentes (par exemple si l'une est située à proximité du cours d'un fleuve ou d'une nappe phréatique importante) et qui permettent justement un mode de conduite différent. Ces deux exploitations ne sont alors plus comparables.

- ❑ De plus, elle ne permet que très mal de corrélérer consommation en eau, rendement des cultures et conditions climatiques.

Approche agronomique

Dans l'approche agronomique, le calcul du surplus dérivé de l'irrigation est réalisé pour chaque type de culture, de sol, de technique d'irrigation et pour une aire géographique donnée.

Le sol est considéré comme un réservoir duquel la plante tire l'eau dont elle a besoin pour croître et par voie de conséquence, évaporer et transpirer. C'est la méthode dite de « *soil water balance* » de la FAO. Un équilibre entre ce que prend la plante, ce qui entre dans le réservoir formé par le sol (les précipitations et l'irrigation) et les variations du stock en eau du sol est établie pour une période déterminée. De cet équilibre vient le rendement de la culture en termes de biomasse commercialisable.

Le rendement en fonction de l'apport d'eau à la plante peut néanmoins être calculé de deux façons :

- le cycle végétatif global

Il consiste à considérer de manière uniforme l'ensemble du cycle de production de la plante et la totalité de l'apport d'eau à la plante de ce même cycle. Elle n'identifie pas des stades de croissance de la plante auxquels correspondent des besoins en eau spécifiques et les situations de stress hydrique pouvant survenir ponctuellement ne sont donc pas prises en compte.

C'est la formule qui était utilisée par l'INRA (Ezerzer, 1991) :

$$Y_a/Y_m = a \cdot \frac{\sum ETR}{\sum ETM} + b$$

avec :

a et b deux coefficients de rendement qui dépendent du type de culture et de la région.

- En distinguant des périodes à l'intérieur du cycle végétatif

A contrario, cette forme considère que le moment où se réalise l'apport d'eau est tout aussi important que son volume total. A cette fin, elle prend en compte cinq périodes déterminantes du cycle de croissance de la plante auquel correspond un besoin en eau spécifique.

Ce sont le stade végétatif, la floraison, la période de production des fruits (divisée en deux sous-périodes) et la phase de maturation. C'est la formule adoptée par la FAO et que nous utilisons à notre tour et dont nous développons la composition ultérieurement.

Remarque

Il ne s'agit pas là que d'une différence d'école car pour un même volume d'eau qui, pour la formule de l'INRA, donnerait un rendement maximal, cette eau ne serait pas répartie uniformément au cours de l'année et elle serait absente au cours d'un stade de croissance et le rendement calculé par la formule de la FAO ne serait plus que de 50 %.

Limites

Cette approche nécessite un grand nombre de données, relativement facile à collecter, mais qui peut faire devenir l'estimation de la demande en eau fastidieuse et complexifier l'écriture du modèle ainsi que sa résolution.

Avantages

- Néanmoins, elle permet d'estimer la demande en eau quelque soient les scénarios agronomiques ou climatiques, ce qui n'est pas possible avec l'approche statistique ;
- Elle permet de suivre la croissance des cultures, ce qui se révèle particulièrement utile lorsque l'on veut connaître l'utilité de l'irrigation.

Conclusion

La demande en eau varie grandement avec les conditions climatiques et une courbe de demande moyenne (approche statistique) n'est pas suffisamment représentative pour mesurer l'impact d'une année sèche ou d'une année pluvieuse sur les gains ou pertes électriques ou les variations de la demande d'eau

d'irrigation. C'est pourquoi nous avons opté pour la méthode de modélisation de la réserve utile (approche agronomique) et plus précisément la formule de calcul de la FAO.

1. Modélisation de la réserve utile (et autres caractéristiques agronomiques)

En choisissant l'approche agronomique, nous considérons le sol comme un réservoir pouvant contenir une certaine quantité d'eau qui sera utilisable par la plante. Cependant, à la différence de l'hydroélectricité pour laquelle l'utilisation de l'eau pour la production d'énergie est une variable de décision et donc résulte d'un choix, l'utilisation de l'eau par la plante échappe à la volonté de l'agriculteur. La seule variable de décision est la quantité d'eau que l'on choisit d'apporter dans le réservoir-sol par le biais de l'irrigation.

Comme pour l'hydroélectricité, la modélisation de l'agriculture est définie par :

- ❑ un volume de stockage fini,
- ❑ un niveau initial,
- ❑ une recharge périodique,
- ❑ des sorties d'eau du réservoir.

A. La réserve utile : une capacité de stockage finie

Ce que l'on appelle la réserve utile est la partie de la capacité de rétention du sol en eau qui peut être utilisée par la plante. On voit donc qu'elle est dépendante de deux facteurs qui sont la nature du sol et les caractéristiques de la plante, notamment son système racinaire.

- ❑ Nature du sol

Le sol est composé d'un ensemble de couches de différentes profondeurs qui possèdent chacune un potentiel de rétention d'eau différent. L'ensemble de ces couches constitue une texture qui détermine à la fois le volume d'eau maximum stockable, la quantité d'eau qui s'échappe par infiltration, la facilité avec laquelle la plante peut parvenir à retirer l'eau stockée etc. Ces caractéristiques pédologiques ne sont pas homogènes et peuvent varier grandement entre deux parcelles voisines.

Cependant, par souci de simplification, nous allons considérer que :

- la totalité des superficies étudiées présentent une même texture du sol ;
- la facilité avec laquelle la plante peut parvenir à retirer l'eau stockée dépend uniquement des caractéristiques de la plante (profondeur et dispersion des racines) et non du sol ;
- l'infiltration est un facteur nul et donc que la réserve utile est un réservoir complètement étanche.

- ❑ Système racinaire

La dispersion des racines en profondeur et en superficie détermine l'étendue de l'espace dans lequel la plante peut prélever de l'eau et donc par conséquent la réserve utile du sol pour la plante. Bien entendu les caractéristiques du système racinaire dépendent du type de plante, mais aussi de la phase de croissance de la plante. Donc, on peut dire que la capacité maximale du réservoir RU est variable dans le temps, car elle dépend de la profondeur des racines, qui elle-même dépend du niveau de croissance de la plante. Ainsi, la taille de la réserve utile sera un paramètre indexé sur la période : RU(s)

Il faut cependant distinguer, à l'intérieur de la réserve utile, la fraction qui est facilement consommable par la plante (RFU Réserve Utile Facile) de celle qui ne l'est qu'au prix d'un stress hydrique qui va affecter les rendements (RS Réserve Stress).

La réserve utile de la plante est donc composée de la réserve stress (qui représente environ un tiers de la réserve utile totale) et de la réserve utile facile (qui, elle, correspond aux deux tiers de la réserve utile). Cette égalité s'écrit ainsi :

$$RU = RUF + RS$$

Remarque

Les dimensions de la réserve utile variant avec le temps, les volumes maximaux de RS et RUF sont eux aussi indexés sur les périodes de croissance de la plante, mais restent fixes en proportions. Afin de modéliser les interactions entre ces deux composantes, nous considérons la RUF et la RS comme deux réservoirs étanches de volume maximal dont la relation est établie par un flux d'eau de l'un à l'autre. RS est le premier réservoir à se remplir, en cas d'apport d'eau (précipitations ou irrigation) et la RUF le premier réservoir à se vider par évapotranspiration.

a] Réserve utile facile

Comme nous l'avons dit, la réserve utile facile permet à la plante de prélever de l'eau sans que cela ne lui occasionne un stress hydrique. Si, tout au long de son cycle de croissance, le volume contenu dans la RUF est égal ou supérieur à la quantité évapotranspirée, alors le rendement de la plante sera optimal.

b] Réserve utile stress

Elle constitue en quelque sorte un réservoir de « secours », dans lequel la plante pourra prélever de l'eau en cas de déficience de la RUF, au prix de difficultés se traduisant par un rendement moindre. S'il advient que cette RS se vide totalement à son tour, alors la plante ne pourra plus transpirer et mourra.

B. Niveau d'eau initial

Comme pour l'activité hydroélectrique, là encore se pose le problème de l'attribution d'une quantité d'eau initiale de la réserve utile. Cependant, à l'inverse d'un barrage qui nécessite plusieurs d'années avant d'être rempli, les précipitations automnales et hivernales sont, dans la plupart des régions françaises, suffisantes pour remplir cette RU avant le début de la mise en culture. Il nous faut pourtant nuancer cette information dans le cas d'une :

- Rotation des cultures.

En effet, si l'agriculteur cultive durant la même année différentes cultures (voire les mêmes dans le cas des productions maraîchères) sur la même parcelle, alors le niveau de la réserve utile disponible pour la seconde plante sera diminuée de l'eau prélevée par la première.

- Cultures démarrant à une période avancée de l'année

L'ensemencement de certaines cultures ne débute qu'à la fin du printemps, voire durant la saison estivale. Or, bien que la RU ait été complètement rechargée par les précipitations automnales et hivernales et qu'aucune culture n'ait puisé dans ce stock, une partie de l'eau s'est pourtant évaporée. Aussi la plante ne bénéficie-t-elle pas d'un niveau initial de la RU maximal.

Remarque

Les deux variétés de maïs que nous modélisons ne correspondent à aucun de ces cas particuliers, aussi on peut considérer que le niveau initial de la réserve utile est sans influence sur les résultats obtenus, d'où l'inutilité de procéder à une simulation spécifique.

a) Recharge périodique de la RU

La recharge périodique est la quantité d'eau qui entre dans la réserve utile du sol par période de temps. Elle est composée d'éléments exogènes qui sont les états de la nature (précipitations et la fonte des neiges) et d'un élément endogène qui est l'irrigation. Nous n'allons les présenter que sommairement ci-dessous. Les relations qui les lient entre elles seront explicitées plus en détail dans le chapitre sur la prise en compte des états de la nature.

Remarque : Les agriculteurs peuvent prélever l'eau d'irrigation de sources autres que l'eau du barrage (puits, barrages collinaires etc.). Mais l'objet de notre travail étant d'étudier le bénéfice dérivé précisément de l'utilisation de cette eau, nous considérerons qu'il n'existe pas d'alternative pour l'irrigation que l'utilisation de l'eau relâchée par l'ouvrage hydroélectrique.

- Précipitations

Comme nous l'avons dit, le niveau des précipitations est un élément exogène sur lequel les décideurs n'ont aucun contrôle et qui est exprimé dans notre modèle sous la forme d'états de la nature. Si l'on explique plus loin la façon dont les précipitations sont prises en compte en tant qu'état de la nature, il nous faut cependant expliquer ici comment nous intégrons à notre modèle le phénomène de ruissellement des eaux de pluie :

- Ruissellement en tant qu'apport d'eau à la parcelle

Contrairement à l'intégration des précipitations pour la recharge du barrage, on considère que la parcelle ne bénéficie pas d'un phénomène de ruissellement. Le volume d'eau reçue sur une parcelle est donc égal aux précipitations (exprimées en millimètres) sur sa superficie. On obtient donc une valeur exprimée en mm^3 . Il nous faut ensuite transformer l'unité volumétrique des mm^3 en m^3 .

Exemple :

- 14 mm de précipitations sur 1 m^2 correspond à $0,014 \text{ m}^3$ d'eau,
- 14 mm de précipitations sur 1 ha correspond à $0,014 \text{ m}^3$ d'eau * 10000 soit 140 m^3 d'eau.

- Ruissellement en tant que perte d'eau pour la parcelle

Toujours contrairement à la réalité, on considère que si la parcelle étudiée ne bénéficie pas du ruissellement des autres parcelles, elle n'y est pas non plus sujette, du moins tant que la RU n'est pas pleine, auquel cas ce ruissellement sera appelé « *run-off* ». La totalité de l'eau reçue sur la superficie s'imprègne directement dans le sol et la RU se remplit d'autant.

Remarque

Si, au micro niveau de la parcelle, ces postulats sont faux, au macro niveau auquel nous nous situons, elles sont plus acceptables. En effet, rappelons que nous considérons plusieurs centaines d'hectares sur une zone géographique restreinte et supposée homogène. Chaque arpent de terre bénéficiant d'un flux d'eau entrant d'écoulement gravitaire provenant de l'arpent voisin, mais étant parallèlement sujet à un flux de sortie d'eau en direction de l'arpent voisin, nous pouvons assumer que les phénomènes de ruissellement entre les parcelles s'égalisent au macro niveau et donc que cette simplification est possible.

- Fonte des neiges

Contrairement à l'hydroélectricité, nous considérons que la fonte des neiges ne bénéficie pas directement à l'agriculture. Pour cela, nous nous basons sur deux considérations :

- ❑ Eloignement des zones de culture

La zone étudiée se situant en plaine et dans le sud de la France, les phénomènes d'enneigement y sont donc marginal et leur intégration dans le modèle complexifierait les relations que l'on cherche à mettre en évidence entre états de la nature (niveau des précipitations) et variables de décision (lâchers d'eau du barrage pour l'irrigation). Nous ne les prendrons donc pas en compte.

- ❑ Captation par les cours d'eau

L'eau de la fonte des neiges, avant de parvenir à la région d'étude, est captée par les ruisseaux, torrents, rivières et autres cours d'eau avant de parvenir à proximité des exploitations. Or, nous avons déjà expliqué dans les points précédents que les agriculteurs, dans notre modèle, ne peuvent prélever l'eau d'irrigation de sources autres que l'ouvrage hydroélectrique.

- Irrigation

L'irrigation, dans notre modèle, est la variable de décision qui lie l'activité hydroélectrique à l'activité agricole. En effet, elle est permise par un prélèvement sur le stock d'eau contenu dans le barrage et se matérialise par un lâcher d'eau de ce dernier. Si elle correspond à un apport d'eau pour les cultures, elle représente aussi une perte d'eau pour la production d'énergie, tout au moins dans l'optique d'EDF. L'on cherche à montrer dans la suite de notre travail (cf simulations) que cela peut n'être pas forcément le cas.

Remarque

Seule une fraction du volume d'eau relâché au niveau du barrage parvient effectivement aux racines de la plante. Nous allons dans les deux points ci-dessous détailler la composition de ces pertes et voir à qui en incombe la charge, tout au moins dans notre modèle.

- Composition des pertes de transport

Les prélèvements d'eau du barrage pour l'irrigation sont sujets aux :

- ❑ **Perte de l'infrastructure** (réseau)

L'infrastructure hydraulique, quelle soit naturelle ou non, qui permet d'acheminer l'eau relâchée par le barrage jusqu'aux champs, n'est pas efficiente à 100%. En effet, une partie de l'eau retourne au milieu naturel soit par évaporation (notamment si les canalisations de transport sont à ciel ouvert) soit par infiltration dans le sol (si le matériau utilisé n'est pas étanche ou présente des fuites). La part de ces pertes varie entre 10 à 50 %, en fonction de l'état du réseau et de son entretien (drainage etc..).

- ❑ **Mode d'irrigation**

Une fois prises en compte les pertes dues au transport, il faut aussi considérer que seule une fraction du volume d'eau en tête de champ parviendra effectivement aux racines de la plante.

En effet, les différents modes d'irrigation présentent des coefficients d'efficience grandement variables. On estime en effet que pour un système d'irrigation par écoulement gravitaire, il n'est que de 50 à 60 %, pour un système par aspersion 80% et un système par goutte à goutte présente un coefficient d'efficience de 95 % (Blanco, 1999).

□ **Timing** d'utilisation par les agriculteurs

Le problème du timing d'utilisation de la ressource en eau par les agriculteurs survient à deux niveaux. D'abord, il faut considérer qu'il n'y a pas un seul agriculteur, mais plutôt une communauté d'agriculteurs qui vont utiliser cette eau. Ce qui génère inévitablement des pertes tenant à la difficulté de coordonner la répartition de l'eau entre les acteurs.

Ensuite, au moment où l'eau parvient effectivement à une parcelle précise, encore faut-il que l'agriculteur soit disponible à ce moment-là pour activer l'irrigation de cette dernière. Or, il peut être déjà occupé à irriguer une parcelle éloignée, il peut dormir ou il peut simplement ne pas être prévenu (c'est un problème d'information qui est fréquent).

Les effets de ce dernier problème peuvent être limités par l'automatisation de l'irrigation ou si ce sont les agriculteurs qui décident le moment où cette eau est lâchée ou en sont informés suffisamment à l'avance, auquel cas ils seront présents au moment où l'eau arrive à la parcelle. Nous traiterons plus précisément de ces possibilités dans les simulations sur l'hypothèse 3 (coopération entre les deux secteurs permettant d'augmenter le bénéfice social).

Il nous serait difficile, dans le cadre de notre étude, d'essayer d'évaluer précisément quelles pertes attribuer à quel facteur et en quelles proportions. En effet, les parcelles ne sont pas égales devant l'irrigation. Ainsi, une parcelle située en tête de réseau subira moins de pertes dues à l'infrastructure (le chemin parcouru par l'eau dans celui-ci étant réduit), et ne sera que peu sensible aux pertes occasionnées par les problèmes consécutifs au timing d'utilisation.

Fidèles à notre volonté d'homogénéisation et de simplification, nous allons agréger les pertes dues à ces trois facteurs afin d'utiliser un coefficient d'efficacité de transport unique de 80 %, correspondant à un réseau de transport en bon état, avec irrigation par goutte à goutte et coordination correcte des exploitants agricoles dans la répartition de la ressource en eau.

$EFD = 0.8$

- Charge des pertes de transport

Se pose ici une question d'ordre méthodologique : doit-on faire supporter la charge de ces pertes au secteur agricole ou au secteur énergétique ? A cette question de responsabilité (EDF entretient-il bien les cours d'eau en aval du barrage, ou les débits relâchés sont-ils trop faibles pour minimiser les pertes par évaporation ou infiltration ; les agriculteurs sont-ils bien coordonnés, entretiennent-ils bien leur infrastructure de transport etc.), nous proposons une réponse méthodologique.

A notre sens, la question des responsabilités dans la perte d'efficacité importe peu puisque l'on cherche à déterminer le bénéfice marginal dérivé de l'utilisation d'une unité d'eau contenue dans le barrage, toute chose étant égale par ailleurs. Ce n'est donc pas le bénéfice marginal de l'unité d'eau pour EDF ou pour les agriculteurs que l'on cherche à déterminer, mais le bénéfice marginal pour la société. La question de la charge des pertes n'est donc pas pertinente.

C. Sortie d'eau de la RU

- Evapotranspiration (ETP)

Comme nous le savons, une plante a besoin de consommer une certaine quantité d'eau pour sa croissance. Sans rentrer dans le détail du processus biologique de l'utilisation de l'eau par la plante, on peut dire que la plante retire du sol ce qu'elle évapotranspire.

On appelle ETM l'EvapoTranspiration Maximale et ETR l'EvapoTranspiration Réelle.

Si l'humidité du sol est suffisante ($RFU > 0$), alors la plante va évaporer le volume maximal requis pour un bon développement ($ETR = ETM$). Dans le cas contraire ($RFU = 0$ et niveau d'eau inférieur à RS), la plante va fermer ces ouvertures stomatales et réduire ainsi sa transpiration (donc $ETR < ETM$), ce qui se traduira par un stress hydrique et donc par une perte de rendement sur la biomasse commercialisable.

ETM dépend des données climatiques, du type de plante et de son stade de développement. On l'obtient par la formule :

$$ETM = ETP * Kc$$

La dépendance climatique apparaît au niveau de l'**EvapoTranspiration Potentielle** (ETP)

L'ETP est définie comme « l'évaporation d'une surface uniforme d'un champ vert court croissant activement, recouvrant complètement le sol, de taille uniforme et sans stress hydrique ». Beaucoup de méthodes ont été proposées pour estimer l'ETP, comme la méthode Penman, basée sur une combinaison de concepts aérodynamiques et énergétiques ou la méthode Turk, basée seulement sur la température. Kc est donnée dans les tables agronomiques. Le facteur culturel Kc prend en compte la spécificité de la plante et les stades de développement.

Equation d'équilibre de l'eau

Soit :

- P les précipitations
- I le niveau de l'irrigation (en m^3 ?)
- X le niveau d'eau stockée par le sol
- R le *run off*, l'eau qui ne s'infiltré pas (perte)

L'équation s'écrit :

$$\Delta X = P + I - ETR - R$$

L'irrigation s'écrit sous la forme...

- *Run off*

Nous utilisons ici le terme anglais de « *run off* » afin de le différencier du ruissellement dont nous avons parlé précédemment (cf..).

Le phénomène de *run off* correspond au moment où la capacité de stockage de la RU a atteint ses limites. Tout nouvel apport d'eau ne peut donc plus être stocké et est donc considéré comme perdu.

Il ne s'agit donc pas d'une perte d'eau de la RU, mais d'une perte d'eau pour la RU (dans le futur). Il a son pendant dans l'activité hydroélectrique avec l'écrêtement, quand le barrage est à son maximum.

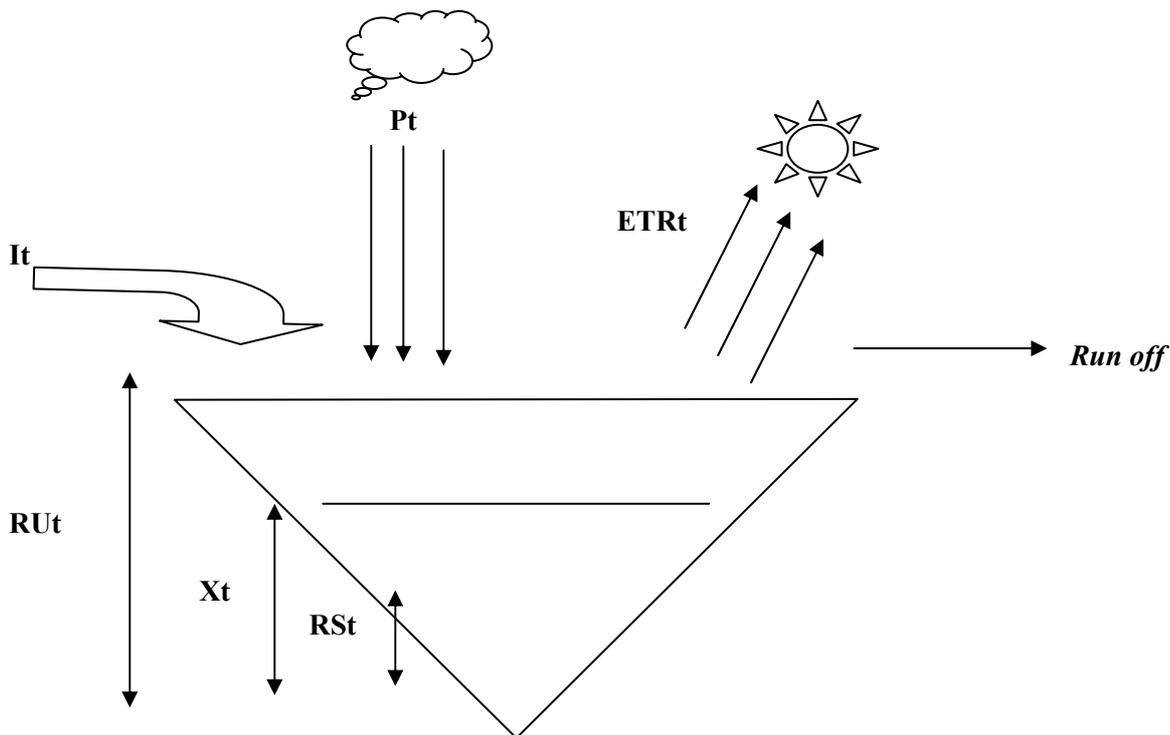
- *Infiltrations*

Comme nous l'avons dit, les pertes d'eau pouvant survenir par infiltration ne sont pas prises en compte dans le modèle.

Remarque

Le cultivateur, s'il en a les moyens, va approvisionner la plante avec le volume d'eau requis pour qu'elle croisse dans les meilleures conditions, c'est-à-dire qui maintient $X > RS$, et en essayant de minimiser le *run off*. Schématiquement, on peut dire que l'irrigation ne permet que de maintenir la réserve d'eau du sol au dessus d'un niveau minimum RS .

Modélisation de la Réserve utile



2. Calcul du bénéfice marginal

A. Revenu

L'approche agronomique consiste à estimer le gain marginal pour un hectare dû à son irrigation, sans que celle-ci soit forcément optimale. Ce gain est une fonction du rendement des cultures, de leur prix sur le marché et des coûts de production unitaires :

$$\text{Bénéfice par hectare} = \text{rendement (Qx/ha)} * \text{prix (f/ha)} - \text{coûts de production (f/ha)}$$

Le bénéfice marginal par hectare est donc la différence entre le bénéfice obtenu avec et sans irrigation.

a] Rendement

On considère que les intrants sont employés de façon optimale et donc que l'apport d'eau à la plante est le seul élément qui permet de faire varier les rendements. Nous nous baserons sur la méthode dite « *soil water balance* » de la FAO (FAO 1980, INRA 1979).

Le sol est considéré comme un réservoir duquel la plante tire l'eau dont elle a besoin pour croître et par voie de conséquence, évaporer et transpirer.

Un équilibre entre ce que prend la plante, ce qui entre dans le réservoir formé par le sol (les précipitations et l'irrigation) et les variations du stock en eau du sol est établi pour une période déterminée.

□ La Réserve Utile (RU) :

C'est la capacité de stockage du sol en eau. Elle est dépendante de :

- ✓ la nature du sol (texture, profondeur),
- ✓ de la dispersion des racines en profondeur.

Seule une fraction de l'eau stockée dans le sol est aisément utilisable par la plante (RUF Réserve Utile Facile). Quand cette réserve est épuisée, la plante peut toujours trouver de l'eau dans RS (Réserve Stress) (tant que $RU > 0$) mais avec plus de difficultés, et elle sera par conséquent stressée.

$$RU - RUF = RS$$

□ Evapotranspiration

La plante retire du sol ce qu'elle évapotranspire. On appelle ETM l'EvapoTranspiration Maximale et ETR l'EvapoTranspiration Réelle.

- ✓ Si l'humidité du sol est suffisante ($RFU > 0$), alors la plante va évaporer le volume maximal requis pour un bon développement ($ETR = ETM$).
- ✓ Dans le cas contraire ($RFU = 0$ et niveau d'eau inférieur à RS), la plante va fermer ces ouvertures stomatales et réduire ainsi sa transpiration (donc $ETR < ETM$).

ETM dépend des données climatiques, du type de plante et de son stade de développement. On l'obtient par la formule :

$$ETM = ETP \cdot Kc$$

- ✓ La dépendance climatique apparaît au niveau de l'EvapoTranspiration Potentielle (ETP),

L'ETP est définie comme « l'évaporation d'une surface uniforme d'un champ vert court croissant activement, recouvrant complètement le sol, de taille uniforme et sans stress hydrique ».

- ✓ le facteur culturel Kc prend en compte la spécificité de la plante et les stades de développement.

Kc est donné dans les tables agronomiques.

Le rendement des cultures dépend principalement de la nature du sol, des intrants employés, des conditions climatiques et, pour le cas nous intéressant, de la disponibilité en eau.

On assume généralement que le rendement est une fonction de l'évapotranspiration réelle.

La FAO propose la formule :

$$\left[1 - \frac{Y_a}{Y_m} \right] = K_y \left[1 - \frac{ETR}{ETM} \right]$$

Avec :

- ✓ Y_a le rendement actuel, effectif, réel ;

C'est l'inconnue que l'on veut calculer.

- ✓ Y_m le rendement maximum ;

Ym dépend du type de culture, des données régionales en assumant que les autres conditions sont optimales.

✓ ETM l'évapotranspiration maximale ;

ETM dépend des évènements climatiques, du type de culture et de la période de croissance de la plante.

✓ Ky le facteur de réponse des rendements ;

Ky dépend du type de culture et de la période de croissance de la plante.

✓ ETR l'évapotranspiration réelle ;

ETR est évaluée avec la méthode *water balance approach* et se calcule ainsi :

$$ETR = (X/RS) ETM$$

Plus exactement, la formule s'écrit :

$$\left[1 - \frac{Y_a}{Y_m \text{ période de croissance}} \right] = K_y \left[1 - \frac{\sum \text{période de croissance ETR}}{\sum \text{période de croissance ETM}} \right]$$

La FAO distingue 4 à 5 périodes de croissance pour un cycle végétatif complet. Par exemple, les différents coefficients de rendement du maïs (Ky) sont :

- 0.4 pour le stade végétatif
- 1.5 pour la floraison
- 0.5 pour la période de production des fruits
- 0.2 pour la phase de maturation

Alors que le coefficient global pour l'ensemble du cycle végétatif est de 1.25.

Dans notre modèle, voici la formule de calcul multiplicative que nous allons utiliser :

$$Y_a/Y_m = (ETRs_1 / ETMs_1)^{as_1} * (ETRs_2 / ETMs_2)^{as_2} * (ETRs_3 / ETMs_3)^{as_3} *$$

Avec as = Kc / nombre de jours de la période

L'INRA utilise le même type de formule mais en considérant l'ensemble de la saison.

La formule s'écrit

$$\frac{Y_a}{Y_m \text{ période de croissance}} = a \cdot \frac{\sum \text{période de croissance ETR}}{\sum \text{période de croissance ETM}} + b$$

Avec a et b deux coefficients culturels qui dépendent du type de culture et de la localisation géographique. Dans la région de Toulouse, pour le maïs, a et b sont respectivement égal à 1,75 et à -0,71.

Afin de disposer de deux variétés de maïs différentes quant à leur besoins respectifs en eau, nous modifions la fonction de croissance du maïs semence afin qu'il ait besoin de 20 % d'eau en plus sur chaque période.

b) Prix

On considère le prix comme une donnée exogène (atomicité de l'offre) fixe et connue de façon certaine dès le début de la période. Si, dans le contexte actuel de l'offre de produits agricoles, l'hypothèse d'atomicité de l'offre (et donc de détermination du prix de façon exogène au modèle) est représentative, celle concernant sa connaissance certaine en début d'année est plus éloignée de la réalité.

Cependant, l'incertitude quant à la connaissance du prix final en début de période et ses conséquences nécessiterait à elle seule une nouvelle thèse. Aussi, afin de ne pas brouiller l'interprétation des résultats concernant les aléas climatiques, nous considérerons le prix comme une donnée fixe, dont les agriculteurs ont connaissance en début de période de prise de décision. Les prix du maïs grain et semence que nous utilisons sont tirés de « mémento technico-économique des principales productions en Languedoc Roussillon 1993-1994 ».

c) Contrainte de demande de produits agricoles

Bien que l'on ait admis, dans la partie précédente sur le prix, l'hypothèse d'atomicité de l'offre, il convient de la modérer par une contrainte de demande maximale.

Afin de ne pas tomber dans le travers de la monoculture (par exemple conseiller à toute une région de produire uniquement des tomates car c'est la culture qui dégage la plus grande marge), il convient de prendre en compte les débouchés existant sur le marché.

En effet, même si l'offre globale de la région concernée n'est pas suffisante pour influencer significativement le prix sur le marché, elle peut néanmoins être sujette à des problèmes de débouchés. Aussi faut-il estimer la demande de produits agricoles sur ce marché et en tenir compte dans notre modèle.

Cela peut se faire en limitant la superficie cultivable par culture sur chaque exploitation, ou en imposant un volume par produit agricole. Ce poids n'est pas uniquement dépendant de la superficie cultivée, mais aussi des rendements qui sont eux fonction (en ce qui concerne notre étude) de l'eau apportée à la plante soit par les précipitations/phénomènes climatiques naturels, soit par l'irrigation.

Quelque soit la forme choisie, elle s'inscrira en tant que contrainte dans notre modèle. Sachant que lorsque un agriculteur choisit les superficies allouées à chaque culture, il compte pouvoir obtenir un résultat proche du rendement maximum (surtout dans l'agriculture irriguée), nous allons poser une contrainte de superficie maximale accordée à chaque variété de maïs.

Superficie maïs Grain	≤ 500 ha
Superficie maïs Semence	≤ 100 ha

d) Calcul des coûts

- Coûts fixes (charges de structure)

Parallèlement à l'investissement initial de construction du barrage, il y a pour l'exploitant agricole l'investissement initial d'achat des terres. Cependant, dans la plupart des cas en France, les terres sont héritées. Certes les exploitants agricoles peuvent en acquérir de nouvelles, mais ayant choisi de considérer un ouvrage hydroélectrique ayant achevé son retour sur investissement, nous ne prendrons pas en compte ces coûts consécutifs à l'achat de ces terres afin de ne pas pénaliser le secteur agricole par rapport au secteur énergétique.

Les variations de coûts dues à l'introduction de l'irrigation ne sont pas, non plus, prises en compte car on considère des exploitations ayant déjà un système d'irrigation en fonctionnement, car nous situons notre

analyse dans le moyen terme (l'année) et le but de notre étude n'est pas d'étudier les changements structurels consécutifs à la mise en place d'un système d'irrigation ou à une coopération entre les secteurs agricole et hydroélectrique.

Les coûts fixes s'expriment sur l'ensemble de l'année et viennent en déduction du chiffre d'affaires total des deux cultures. Ils ne sont donc pas affectés à une culture spécifique, ils lui sont indifférents.

- Coûts variables (charges opérationnelles)

Ce sont les coûts consécutifs à l'utilisation d'intrants, de main-d'œuvre, consommations intermédiaires etc.. Ils sont spécifiques à chaque culture et peuvent être fonction soit du rendement, soit de la superficie ensemencée. Les engrais étant supposés employés de manière optimale, et notre document de référence (« mémento technico-économique des principales productions en Languedoc-Roussillon 1993-1994 ») nous poussent à considérer que ces coûts sont fonction de la superficie assolée plutôt que du niveau de rendement.

3. Fonction objectif

Contrairement à l'activité hydroélectrique qui, du fait de sa mission de service public, doit respecter un objectif de production minimale d'énergie, le secteur agricole est caractérisé par la poursuite des intérêts privés qui s'apprécient en termes de profits.

Il serait cependant prématuré de considérer que le seul objectif poursuivi par les agriculteurs est la maximisation de leur bénéfice total. D'autres aspects rentrent en jeu tenant notamment à l'attitude envers le risque. Si des études récentes ont montré que les agriculteurs ne sont pas notablement plus sensibles au risque que d'autres agents économiques, l'incertitude liée au caractère aléatoire des événements climatiques de la zone d'exploitation, ainsi que d'autres zones de production (qui influencent l'offre globale et donc le prix) ne doit pas pour autant être omise. C'est pourquoi nous avons choisi la méthode de programmation stochastique qui permet d'intégrer le risque dans le modèle.

Les cultures pérennes

Si la modélisation de la production de cultures saisonnières s'inscrit parfaitement dans la réalisation dans un modèle intra annuel, il n'en va pas de même pour les cultures pérennes qui nécessitent généralement l'élaboration d'un modèle inter annuel.

Cela reste néanmoins possible. Pour cela, il faudrait d'abord distinguer les cultures pérennes arrivées à maturité de celles qui ne produisent pas encore.

Par exemple, pour :

- les arbres qui produisent déjà des fruits

Le bénéfice marginal dérivé de l'utilisation d'une unité d'eau peut être obtenu en fonction de l'augmentation du rendement qu'il induit. Ceci en admettant que l'emploi ou non de l'irrigation n'influe pas sur le potentiel productif de ce même arbre pour le futur, auquel cas il faudrait répercuter cette baisse de productivité future sur les coûts de l'année étudiée, à l'intérieur de la fonction objectif.

Remarque : en France, le niveau minimal de précipitations annuelles est en général suffisant pour permettre aux arbres fruitiers de résister à une, voire même plusieurs années de sécheresse sans perte notable de son potentiel productif.

- les arbres non encore productifs

Pour ceux-là, le bénéfice marginal dérivé de l'utilisation d'une unité d'eau doit être estimé sur les bénéfices futurs de la production de fruits. Le rendement espéré est fonction de la **croissance** de l'arbre qui elle-même s'étale sur plusieurs années. De plus, dans la fonction objectif, doit-on intégrer cela comme une perte possible (un coût) ou comme un bénéfice futur ?

Remarque

La prise en compte des cultures pérennes entraîne donc de nombreuses difficultés et complexifie grandement le travail (notamment lorsqu'on parle des cultures pérennes non encore productives).

Dans notre travail, nous voulons mettre en avant les états de la nature. Or, chaque année étant soumise à des états de la nature différents, il ne nous paraît pas cohérent de considérer l'année étudiée de manière stochastique, en fonction des états de la nature, puis d'apprécier les coûts ou profits des périodes futures de manière déterministe. Aussi, nous avons pris le parti de considérer les choses de manière figée, toutes choses étant égales par ailleurs (*ceteris paribus*). Or, l'introduction de ces cultures pérennes qui ne sont pas productives puis le deviennent, qui nécessitent des investissements initiaux et entraînent un amortissement, ne correspond pas à ce parti pris.

Donc, nous ne prendrons pas en compte les cultures pérennes, bien qu'elles soient intégrables au modèle mais au prix d'un grand travail.

Remarque

Contrairement à l'hydroélectricité, dans la fonction objectif ne s'exprime que le bénéfice total de chaque culture pour l'ensemble des périodes de l'année. Cela tient à la forme de calcul de croissance de la plante que nous avons choisie (forme multiplicative). Dans ces conditions, considérer la croissance par période n'aurait aucun sens.

III. Modélisation des événements (états de la nature)

Une fois l'irrigation et l'hydroélectricité modélisé, il nous faut à présent intégrer à notre modèle les événements météoclimatiques qui influent sur la gestion de l'activité de ces deux secteurs. Ce sont les états de la nature et ils sont liés par une loi de probabilité, que nous allons identifier dans un premier point. Ces événements sont principalement les précipitations, la fonte des neiges et les températures.

Ayant opté pour une méthode de modélisation stochastique et afin de ne pas alourdir le modèle, nous ne prendrons en compte de manière stochastique que les données sur les précipitations.

1. Définition de la loi de probabilité entre les différents états de la nature

On peut distinguer principalement quatre lois de probabilités qui correspondent chacune au type de gestion et de connaissance du futur :

- gestion en futur certain

Il s'agit d'une expression déterministe des événements qui considère que la probabilité de survenance d'un événement est de 100 % et que sa valeur est connue dès le début par le gestionnaire. Ce type de modèle permet d'optimiser une prise de décision qui tient compte des coûts et de bénéfices futurs, en faisant un arbitrage inter-temporel. (M.Blanco et G.Flichman, 2002).

Nom	Description	Unité	Intervalle de variation		de nature	Indexation sur états de la nature			notes
			période	année		OUI		NON	
						directe	indirecte		
SA	Superficie agricole	ha		X	scalaire			X	
Les noms suivants existent pour le Maïs Grain (MG) et Maïs Semence (MS)									
RU(s)	Réserve utile	m ³ /ha	X		paramètre			X	Varie en fonction du développement du système racinaire
RUF(s)	Réserve utile facile	M ³ /ha	X		paramètre			X	Varie en fonction du développement du système racinaire
RS(s)	Réserve stress	M ³ /ha	X		paramètre			X	Varie en fonction du développement du système racinaire
Ym	Rendement maximal	Quintaux / ha		X	scalaire			X	Donné par les tables agronomiques
PA	Prix agricole	€ /quintaux		X	scalaire			X	Le prix anticipé est postulé exact
NRSI	Niveau initial de la RS	M ³ /ha		X	scalaire			X	Uniquement en début de cycle
NRUFI	Niveau initial de la RUF	M ³ /ha		X	scalaire			X	Uniquement en début de cycle
CV	Coûts variables de la culture	F/ha		X	scalaire			X	
CF	Coûts fixes de l'agriculture			X	scalaire			X	
ETM(s)	Evapotranspiration maximale	M ³ /ha	X		paramètre			X	Varie en fonction du stade de croissance de la plante
PRUF	Prélèvement d'eau à destination de la RUF	M ³	X		variable		X		Variable de décision d'irrigation de l'agriculteur

Nom	Description	Unité	Intervalle de		nature	Indexation sur états de la nature			notes
			période	année		OUI		NON	
						directe	indirecte		
PRS	Prélèvement d'eau à destination de la RUF	M3	X		variable		X		Variable de décision d'irrigation de l'agriculteur
ETR _{n+1} (e _n ,...,e _{n+1} ,s)	Evapotranspiration réelle	M3 /ha	X		variable		X		L'influence de la température n'est pas prise en compte
ETRRUF _{n+1} (e _n ,...,e _{n+1} ,s)	Perte d'évapotranspiration sur la RUF	M3 /ha	X		variable		X		La perte d'eau due à l'ETR est partagée entre ETRRUF et ETRRS
ETRRS _{n+1} (e _n ,...,e _{n+1} ,s)	Perte d'évapotranspiration sur la RS	M3 /ha	X		variable		X		
FLU _{n+1} (e _n ,...,e _{n+1} ,s)	Flux d'eau entre RS et RUF	M3 /ha	X		variable		X		C'est la variable qui fait le lien entre la RS et la RUF
RUNOFF _{n+1} (e _n ,...,e _{n+1} ,s)	Run off ou perte d'eau par ruissellement	M3 /ha	X		variable		X		Lien entre RUF et le milieu ambiant
NRS _{n+1} (e _n ,...,e _{n+1} ,s)	Niveau d'eau de la RS	M3 /ha	X		variable		X		
NUF _{n+1} (e _n ,...,e _{n+1} ,s)	Niveau d'eau de la RUF	M3 /ha	X		variable		X		
VALETR _{n+1} (e _n ,...,e _{n+1} ,s)	Valeur de croissance de la plante		X		variable		X		Approximation logarithmique de la fonction de croissance de la plante
Ya(e _n ,...,e _{n+1})	Rendement réel	Qx/ha		X	variable		X		Calculé en fin de cycle de production
S	Superficie assolée par culture	ha		X	variable			X	

Si cette approche permet de modéliser plus simplement l'activité et d'obtenir une valeur optimale, elle ne correspond certainement pas à la réalité des aléas climatiques aussi bien qu'hydroélectriques avec lesquels les exploitants agricoles doivent composer.

- ❑ gestion en fonction des conditions moyennes

Il s'agit là d'une modélisation statistique des états de la nature. On considère un seul niveau par état de la nature qui correspond à la moyenne statistique des niveaux observés auparavant. Si ce type de modélisation offre de bons résultats quand la variance ou l'écart type est faible, et que l'année est moyenne, elle peut aussi conduire à de graves difficultés de gestion quand l'année s'éloigne de cette moyenne.

- ❑ gestion en situation d'incertitude sans connaissance probabiliste des états de la nature futurs ;

Dans ce type de gestion, on n'a aucune connaissance des valeurs que peuvent prendre les états de la nature futurs. Le gestionnaire doit donc se soumettre au principe de prudence et maximiser le revenu des périodes en cours. Sa marge de manœuvre est donc limitée.

- ❑ gestion en situation d'incertitude mais avec connaissance probabiliste des états de la nature futurs

Il s'agit d'une situation dans laquelle l'avenir n'est pas inconnu mais incertain. Les différentes valeurs que peuvent prendre les états de la nature sont connues, on ne sait cependant pas qu'elle va être leur distribution. S'il existe une corrélation sur leurs probabilités d'occurrence inter périodiques, cela réduit encore l'incertitude. Nous allons choisir cette dernière loi de probabilité, avec non corrélation entre les périodes. Nous justifions ce choix car dans l'état des connaissances en météorologie, il n'a pas pu être mis en évidence une corrélation des conditions météorologiques. La plupart des travaux actuels dans le domaine cherchent à mettre en évidence l'effet tempérant des océans, alors que d'autres s'attachent à la théorie de l'effet papillon. En tout cas, si une telle corrélation existe, nous sommes dans l'impossibilité de déterminer laquelle et cela dépasse largement le cadre de notre étude, aussi nous considérerons que les précipitations sont non corrélées entre les saisons. (Ezerzer, 1999)

Chapitre V : Simulations

Afin de faire le distinguo entre modélisation et simulation, nous allons nous appuyer sur la définition qu'en donne Béatrice Ezerzer à la page 24 de sa thèse (Ezerzer, 1992) : la simulation est une technique de modélisation qui est utilisée pour approcher le comportement d'un système sur un ordinateur, en représentant toutes les caractéristiques de ce système par une description mathématique ou algébrique. Cela est différent d'une technique de programmation mathématique qui trouve une décision optimum pour un système d'opération en respectant toutes les contraintes tout en maximisant ou minimisant un ou plusieurs objectifs.

D'autre part, les modèles de simulation déterminent la réponse du système à certains intrants, de façon à permettre au preneur de décision d'examiner les conséquences de scénarios variés d'un système existant ou d'un nouveau système sans avoir à le construire réellement. Un modèle de programmation mathématique requiert habituellement des postulats sur la structure et les contraintes du modèle pour leur intégration pratique, alors qu'un modèle de simulation est plus flexible en simulant la réponse du système.

I. Simulations sur les données initiales

Dans cette section, nous allons tout d'abord présenter les résultats du modèle qui nous a servi de base pour l'élaboration des simulations. Par la suite, ce modèle de base servira de référence pour analyser les résultats des différentes simulations. Nous procéderons ensuite à différentes simulations ayant pour but de déterminer la sensibilité des résultats au choix des données initiales.

1. Présentation du modèle de base

Afin de mettre en évidence l'importance de l'irrigation pour l'agriculture, il existe deux versions du modèle de base, une avec possibilité d'irrigation des cultures à partir de l'eau du barrage et une autre sans irrigation.

En ce qui concerne la version sans possibilité d'irrigation, nous considérons que la seule eau parvenant aux champs est l'eau de pluie. Bien que ce postulat ne corresponde pas à la réalité, nous l'admettrons néanmoins pour faciliter la détermination de la valeur en irrigation de l'eau du barrage.

A. Modèle de base avec possibilité d'irrigation des cultures

Dans la mesure où les résultats de cette simulation seront fréquemment repris, à titre d'élément de comparaison, pour l'analyse des simulations postérieures, nous nous contenterons, dans ce paragraphe, de ne les présenter que succinctement et de façon descriptive.

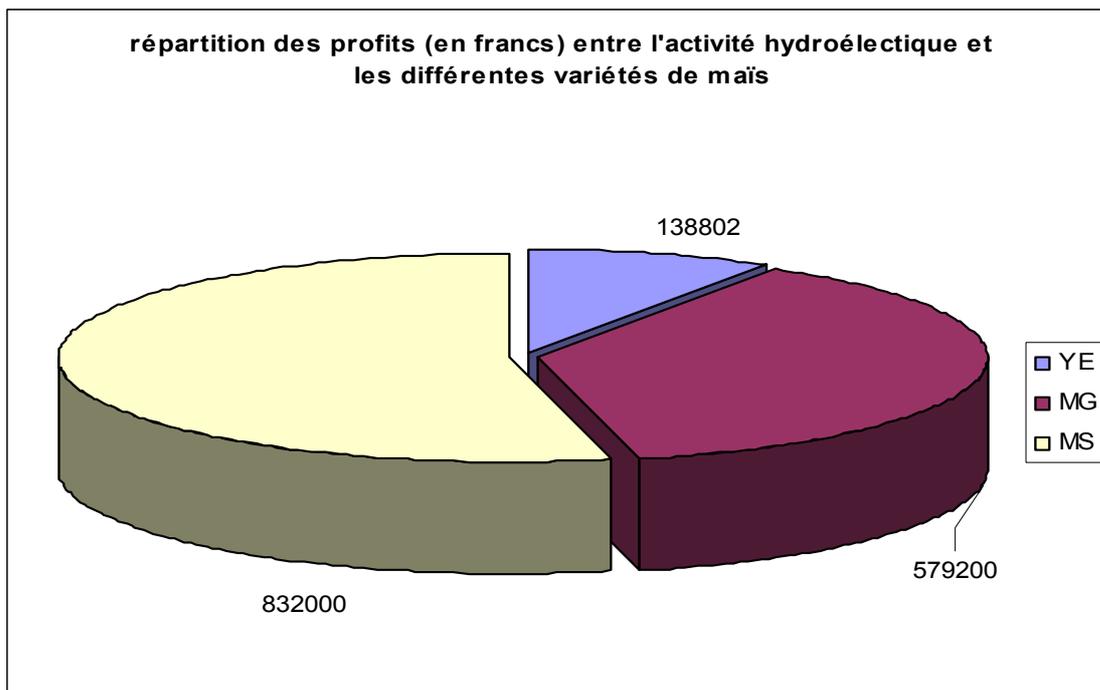


Figure 1 : Simulation de base ; revenu

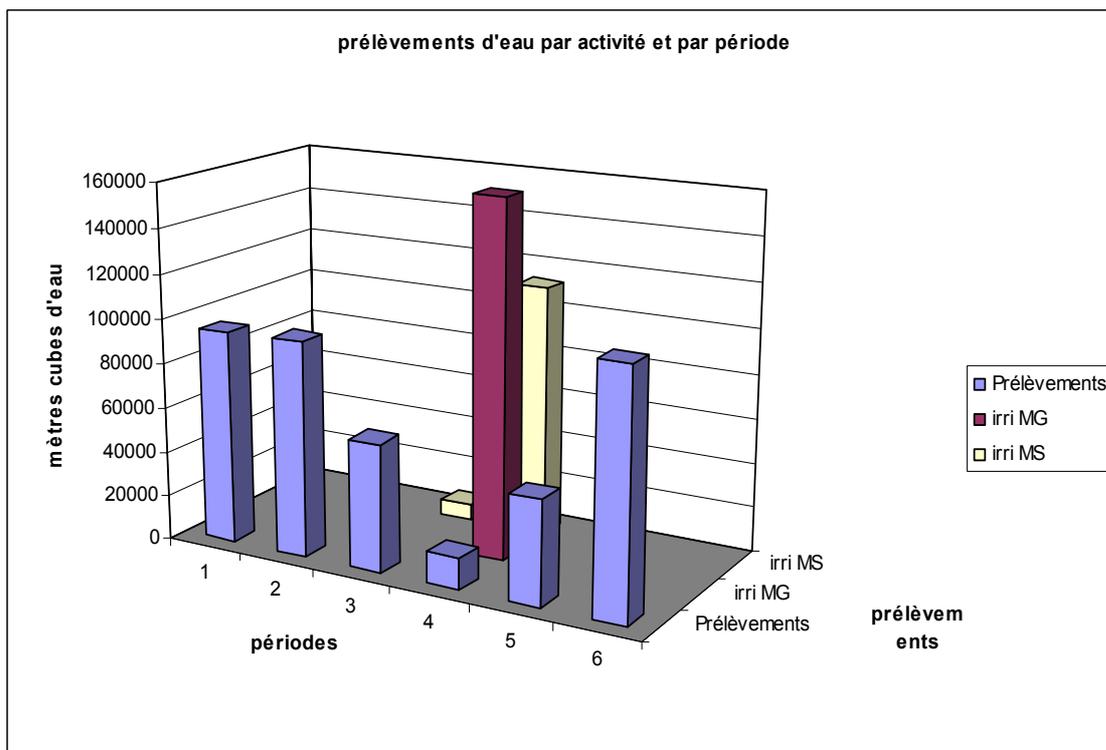


Figure 2: Simulation de base; prélèvements d'eau

Analyse des résultats

Dans le graphique représentant la répartition du revenu annuel des activités modélisées, on constate que le revenu total de l'agriculture est bien supérieur à celui de l'électricité. Ceci s'explique notamment par le fait que ce revenu annuel correspond au profit lié, non seulement à l'utilisation de l'eau du barrage, mais aussi aux précipitations du cycle de production en ce qui concerne l'agriculture. Il faut donc être prudent et ne pas confondre ce profit avec celui dû à l'utilisation de l'eau du barrage qui sera représenté dans les graphiques concernant la simulation sans irrigation.

A l'intérieur de l'agriculture, c'est la culture du maïs semence qui dégage le plus de profit pour une superficie de seulement 100 ha, contre 400 ha pour le maïs grain, même si c'est cette seconde production qui a le plus gros chiffre d'affaires. Rappelons néanmoins que le maïs semence est une culture dont la production est encadrée contractuellement (la rencontre entre l'offre et la demande ne se fait pas sur un marché) et légalement (existence d'îlots en dehors desquels sa culture n'est pas autorisée). De plus, la qualité des semences obtenues est un facteur important dans le prix auquel elles se négocient, dû notamment à la fragilité de cette culture, or cette qualité n'est pas représentée dans notre modélisation.

Dans le second graphique, on peut observer que si, sur une période donnée, les prélèvements à destination de l'agriculture sont supérieurs à ceux de l'hydroélectricité, pour l'ensemble du cycle de production, l'activité hydroélectrique a recours à des prélèvements plus conséquents et plus réguliers. Il existe à cela plusieurs explications possibles :

- ❑ en période s3 et surtout s4, le bénéfice marginal dérivé de l'utilisation de l'eau est plus grand pour l'agriculture que pour l'activité hydroélectrique ;
- ❑ pour le reste des périodes, c'est l'inverse qui est vrai, soit que ce bénéfice soit moins important pour l'agriculture durant les autres périodes, soit qu'au contraire ce soit celui de l'électricité qui est plus important ;
- ❑ l'unité hydroélectrique doit répondre à une contrainte de production minimale, qui nécessite un prélèvement d'eau minimal dans chaque période.

Le but des graphiques 3 et 4 est d'étudier la corrélation entre le volume d'eau utilisé par l'unité hydroélectrique et le profit qui en dérive. Comme on le voit, cette corrélation est variable par périodes, ce qui peut s'expliquer par plusieurs facteurs :

- ❑ le taux de remplissage du barrage, qui détermine la hauteur de chute et donc sur l'énergie dégagée par un m³ d'eau (cf modélisation de l'électricité, chap IV, section 1) ;
- ❑ le prix du kWh varie selon le moment de l'année et est plus important pour les périodes froides (s1 à s3 ; s6) que d'été (s4 à s5) ;

Nous remarquons que ces deux facteurs se conjuguent lors de la fin de l'été, c'est-à-dire pour les périodes s4 à s5, puisque le niveau d'eau du barrage est au plus bas (l'eau étant utilisée pendant l'hiver, et les précipitations permettant la recharge du barrage n'étant pas encore survenues) et que le prix moyen de l'électricité est faible.

Or c'est généralement à ce moment-là que la plante a besoin de l'irrigation et donc que l'eau a la plus grande valeur pour l'agriculture, ce qui confirme les observations faites sur le graphique concernant la répartition des prélèvements d'eau par activité et par période.

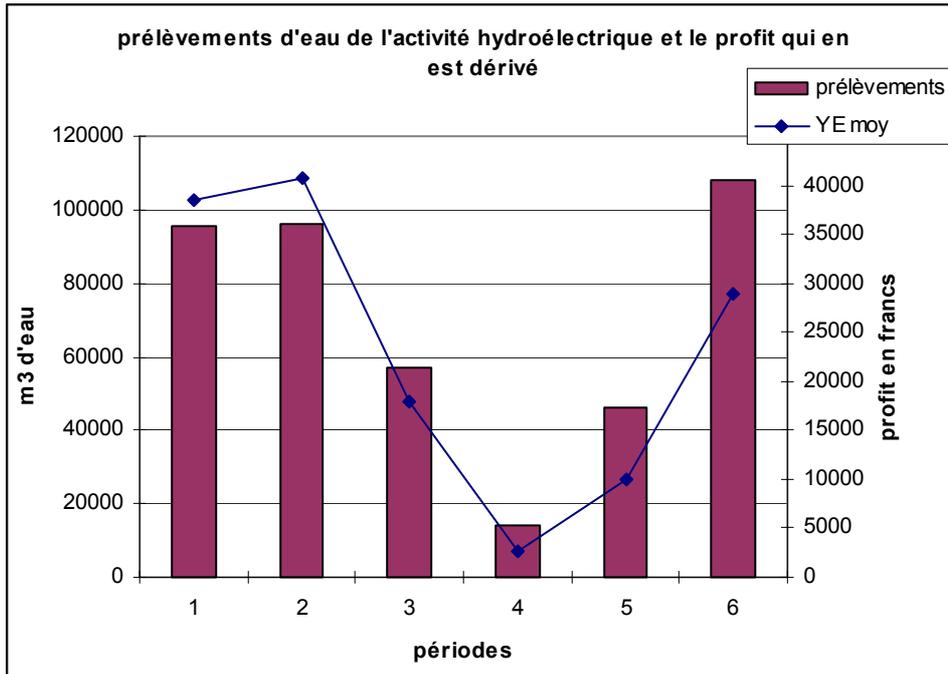


Figure 3: Simulation 1 : prélèvements et profits de l'activité hydroélectrique

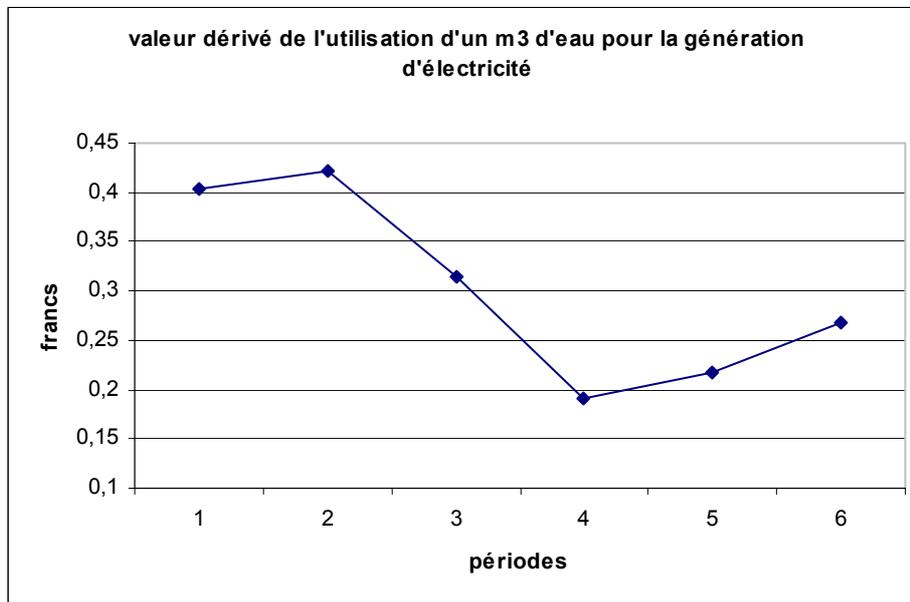


Figure 4 : Simulation 1 : valeur de l'eau en électricité

Remarques concernant la prépondérance de l'activité agricole

N'oublions pas que notre approche de modélisation est une approche théorique qui a pour objectif d'étudier l'allocation de la ressource en eau et sa réutilisation en fonction de trois hypothèses (cf chapitre III, parties II, III et V). Afin de tester la validité de ces dernières, il a été nécessaire de procéder à des simplifications et d'admettre des postulats contraignants qui ont tendance à accroître la valeur de l'eau pour l'agriculture et à la diminuer pour la production énergétique.

□ Dimensions de l'ouvrage hydraulique

Le barrage que nous avons choisi de modéliser est une unité de petites dimensions (1 million de mètres cubes pour une hauteur de chute maximale de 100 mètres). Or, comme nous le verrons dans les simulations, la hauteur de chute est une variable déterminante de l'énergie dégagée par un même volume d'eau. Un ouvrage de petite dimension est donc moins rentable.

□ L'unique source d'eau pour l'irrigation est le barrage

Dans la réalité, les agriculteurs disposent d'alternatives à l'utilisation de l'eau du barrage (puits, lacs collinaires, cours d'eau naturels, barrages à vocation agricole etc.), et celle-ci n'est bien souvent considérée que comme une source marginale ou d'appoint en cas de situations extrêmes. Nous avons pourtant choisi d'émettre ce postulat car il permet néanmoins d'associer directement l'activité énergétique avec l'agriculture et de mettre en évidence une corrélation qui autrement serait masquée par la possibilité d'utilisation des autres sources d'eau.

□ Cultures intensives en eau

Les deux variétés de maïs que nous avons choisi de modéliser nécessitent un apport en eau important et ce sur de vastes superficies. La compétition entre l'activité agricole et l'activité hydroélectrique pour l'utilisation des ressources en eau s'en trouve donc accrue.

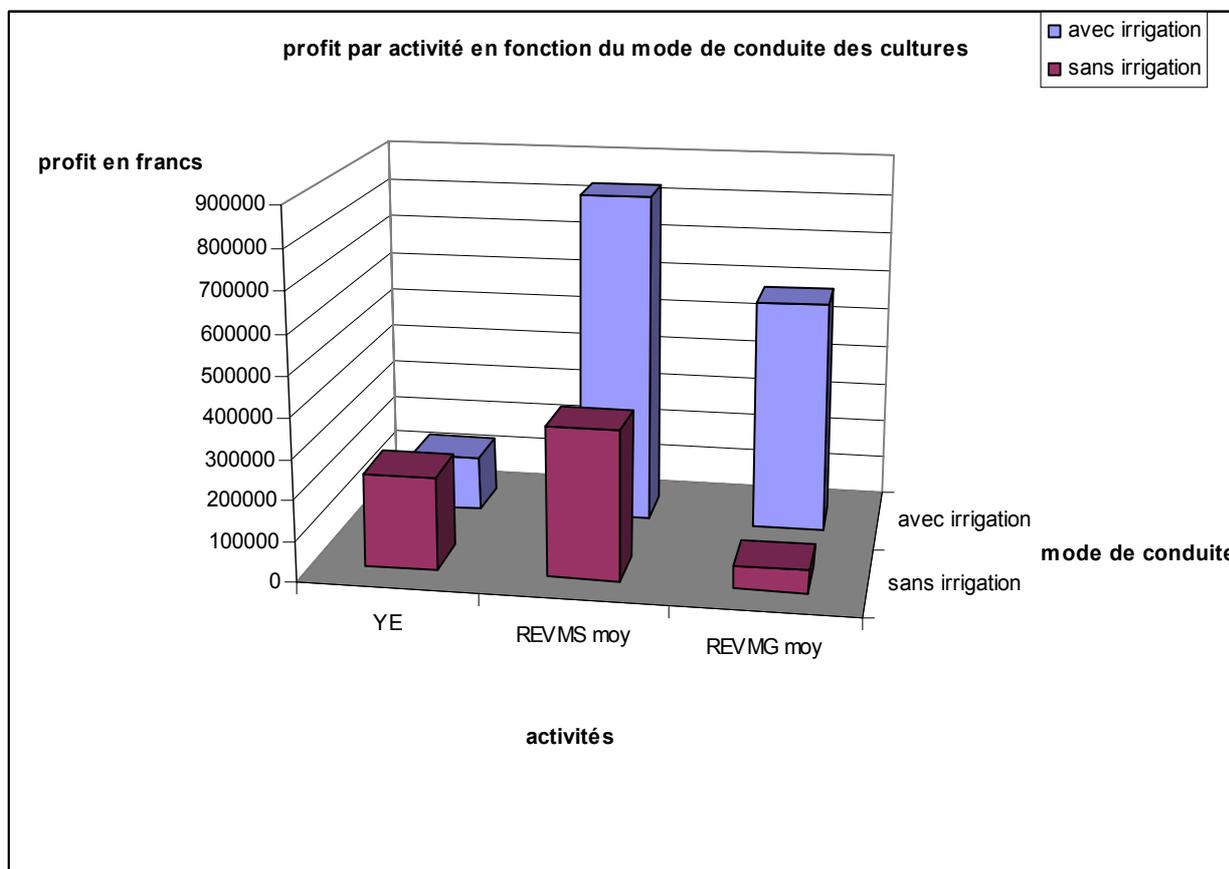
□ Intensité des précipitations

Dans l'optique où nous désirons étudier l'intérêt de l'irrigation pour l'agriculture, nous avons choisi, afin de disposer de résultats intéressants, de modéliser des précipitations inférieures aux besoins en eau des cultures ce qui rend l'irrigation nécessaire dans la plupart des cas et lui confère une valeur importante. Les précipitations modélisées sont cependant suffisantes pour dégager une faible marge pour les agriculteurs, même sans irrigation.

B. Modèle de base sans possibilité d'irrigation

Dans cette simulation, nous avons considéré que l'agriculteur n'avait pas la possibilité d'irriguer ses champs, le seul apport d'eau aux cultures provenant des précipitations. Nous avons mis en parallèle les résultats avec ceux obtenus dans la simulation précédente.

Figure 5 : Profit par activité en fonction du mode de conduite des cultures



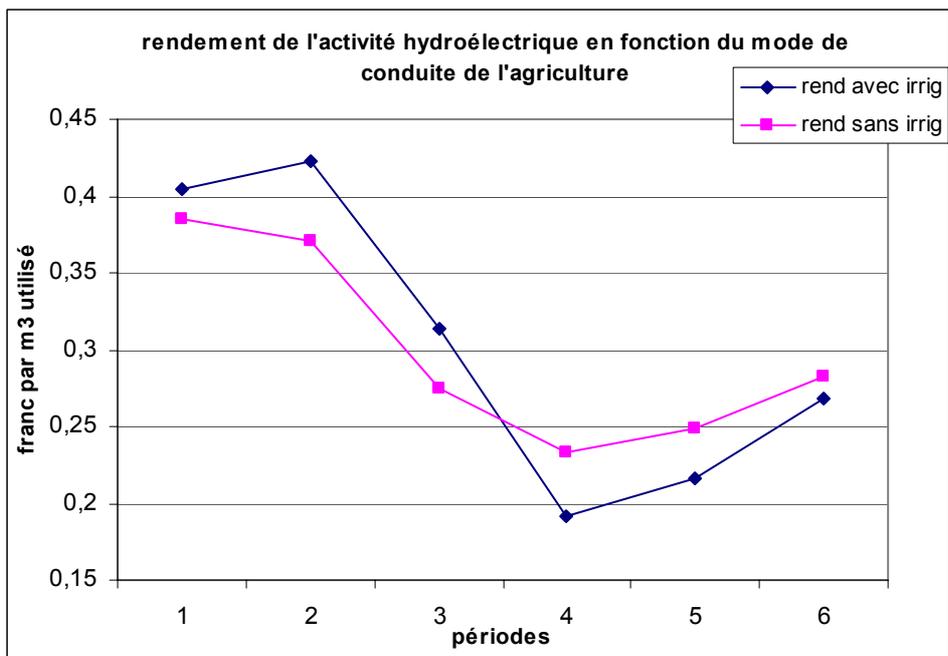


Figure 6 : Rendement de l'activité hydroélectrique en fonction du mode de conduite de l'agriculture

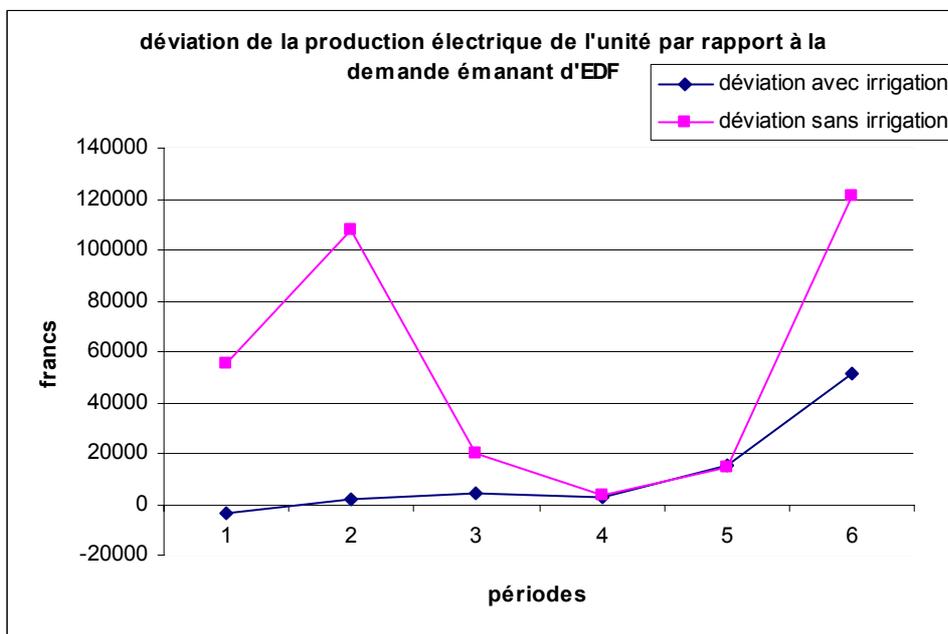


Figure 7 : Déviatiion de la production électrique de l'unité par rapport à la demande d'EDF

Analyse des résultats

Analyse des résultats de la figure 5 : profit en fonction du mode de conduite de l'agriculture

Ainsi que l'on pouvait s'y attendre, le fait de permettre à l'agriculture d'utiliser l'eau contenue dans le barrage pour irriguer les cultures se traduit, au niveau sectoriel, par un accroissement des profits de l'activité agricole et par une perte des profits pour l'activité énergétique. Cependant, si l'on se place au niveau de la société, force est de constater que la somme des profits est plus importante (augmentation de 236% soit 892 916 francs) dans le cas où l'agriculture peut procéder à l'irrigation. Cela s'explique par le fait que, dans les conditions de modélisation choisies, les plantes sont en situation de manque d'eau chronique et donc que l'utilisation de l'irrigation permet d'accroître fortement le revenu. Ainsi, l'accroissement de production agricole due à l'irrigation permet d'estimer la valeur moyenne d'un m³ d'eau à 3,27 F pour le maïs grain, à 3,86 F pour le maïs semence quand elle n'est que de 0,33 F pour la production électrique.

On peut aussi observer à partir de ce graphique que des deux variétés de maïs, c'est pour le maïs grain que l'eau a la plus forte valeur puisque l'accroissement du profit est de 1000% alors qu'elle n'est que de 225% pour le maïs semence.

Analyse des résultats de la figure 6 : rendement de l'activité hydroélectrique en fonction du mode de conduite de l'agriculture

Comparaison entre les modes de conduite puis avec les variations du rendement dans le temps :

- ❑ période 1 à 3, on observe un meilleur rendement par m³ d'eau dans le cas d'un mode de conduite avec irrigation ;

En absence de concurrence pour l'utilisation de l'eau, l'agent économique doit, pour maximiser son profit, utiliser ses ressources tant que la valeur marginale dégagée est supérieure au coût marginal. Or la valeur marginale de l'eau pour l'activité hydroélectrique est une fonction décroissante du volume d'eau total employé, ce que reflètent ici les résultats obtenus.

- ❑ période 4 à 6, c'est au contraire le mode de conduite sans irrigation qui offre un meilleur rendement ;

La demande d'irrigation se réalise durant la période s4, et diminue d'autant le volume d'eau total contenu dans le barrage et donc la hauteur de chute, ce qui explique le basculement du rendement en faveur de la simulation sans irrigation. Cependant, il faut noter que cette tendance ne s'aggrave pas dans les saisons s5 et s6, durant lesquelles on peut même observer une tendance au rapprochement des deux courbes de rendement. Ainsi, au début du cycle de production suivant et grâce aux recharges abondantes des précipitations automnales, ce rendement devrait être sensiblement le même avant que ne se réalise la plus grande demande en énergie, qu'il y ait eu ou non irrigation. Ce qui nous conduit à penser que la pérennité de l'activité hydroélectrique n'en serait pas pénalisée.

Analyse des résultats de la figure 7

Ce graphique a pour objet de représenter l'écart existant (la déviation) entre la production d'énergie de l'unité souhaitée par la planification nationale d'EDF (cf chapitre IV, section sur la demande), et la production d'énergie moyenne réelle dans chaque simulation. On observe alors que pour la simulation sans irrigation, l'unité, pour maximiser son profit, produit beaucoup plus d'énergie que ce qui est demandé par EDF. Si l'on se situe dans un marché ouvert, dans lequel toute la production supplémentaire est absorbée sans baisse des prix (cf postulat d'atomicité de l'offre), alors cette surproduction se traduira par un gain.

Si au contraire, on considère que l'on est dans le cas d'un marché national ou le gestionnaire préfère avoir une production égale à la demande (ce qui était encore le cas avant l'ouverture partielle du marché européen de l'énergie en 1998), alors la simulation avec irrigation dont la déviation par rapport à la demande est moindre, paraît plus adaptée.

2. Simulations visant à vérifier la sensibilité du modèle par rapport aux données initiales

Pour posséder une bonne connaissance du comportement du modèle, il est nécessaire de procéder à des simulations visant à déterminer l'influence du choix des données initiales sur les résultats du modèle.

A. Niveau d'eau initial du barrage

Pour déterminer la sensibilité du modèle au volume d'eau initialement contenu dans le barrage (XI), nous avons procédé à deux simulations correspondant à un niveau initial bas ($XI = 400000 \text{ m}^3$), et à un niveau haut ($XI = 600000 \text{ m}^3$). Afin de faciliter leur comparaison, les résultats obtenus dans chaque simulation sont agrégés dans les graphiques ci-dessous.

Analyse des résultats de la figure 9 : revenu par activité en fonction du niveau initial du barrage XI.

On peut constater que, si un niveau initial plus important permet à l'activité agricole de dégager une marge supérieure, cela n'est pas le cas de l'activité hydroélectrique. L'augmentation du revenu de l'agriculture s'explique aisément par une disponibilité d'eau accrue et donc par des apports d'eau à la plante plus conséquents. Les graphiques représentant les prélèvements d'eau par secteur (figure 11 et 12) le confirment, l'irrigation prélevant $414\,474 \text{ m}^3$ d'eau dans le cas d'un niveau initial haut, contre seulement $124\,077 \text{ m}^3$ d'eau dans le cas d'un niveau initial bas.

En ce qui concerne l'infériorité du revenu hydroélectrique, nous avons étudié la valeur moyenne d'un m^3 d'eau pour l'activité hydroélectrique (figure 10), afin d'obtenir des éléments de réponse.

On peut principalement observer à partir de ce graphique que :

- ❑ un niveau d'eau initial plus élevé se traduit par un meilleur rendement énergétique par m^3 utilisé dans les premières périodes ;
- ❑ dans un second temps, le rendement énergétique de la simulation avec un niveau initial élevé devient inférieur à celui d'une simulation avec faible niveau initial.

Rappelons que le prix de l'électricité en période s1 et s2 est à son niveau maximum. Il en suit que, en raison de l'incertitude sur les précipitations futures, la méthode de programmation stochastique discrète conduit le modèle à adopter une stratégie donnant la préférence aux profits réalisés dans les premières périodes.

Cependant, l'unité hydroélectrique étant soumise à une contrainte de production minimale par période (DS(s)), il lui faut utiliser en période s4 à s6 de l'eau dont le rendement est faible. D'où, sur l'ensemble de l'année, un équilibre entre les profits des deux simulations.

Remarque :

- ❑ Si un volume d'eau dans le barrage plus important en début d'année dégage en effet de plus grands bénéfices, ceux-ci ne se répartissent pas de façon équilibrée entre les différents secteurs d'activités.
- ❑ La stagnation des prélèvements destinés à l'hydroélectricité nous indique que, bien que la valeur marginale de l'eau pour la production agricole soit une fonction décroissante du volume utilisé, celle-ci reste néanmoins supérieure à celle qu'elle représente pour l'hydroélectricité.

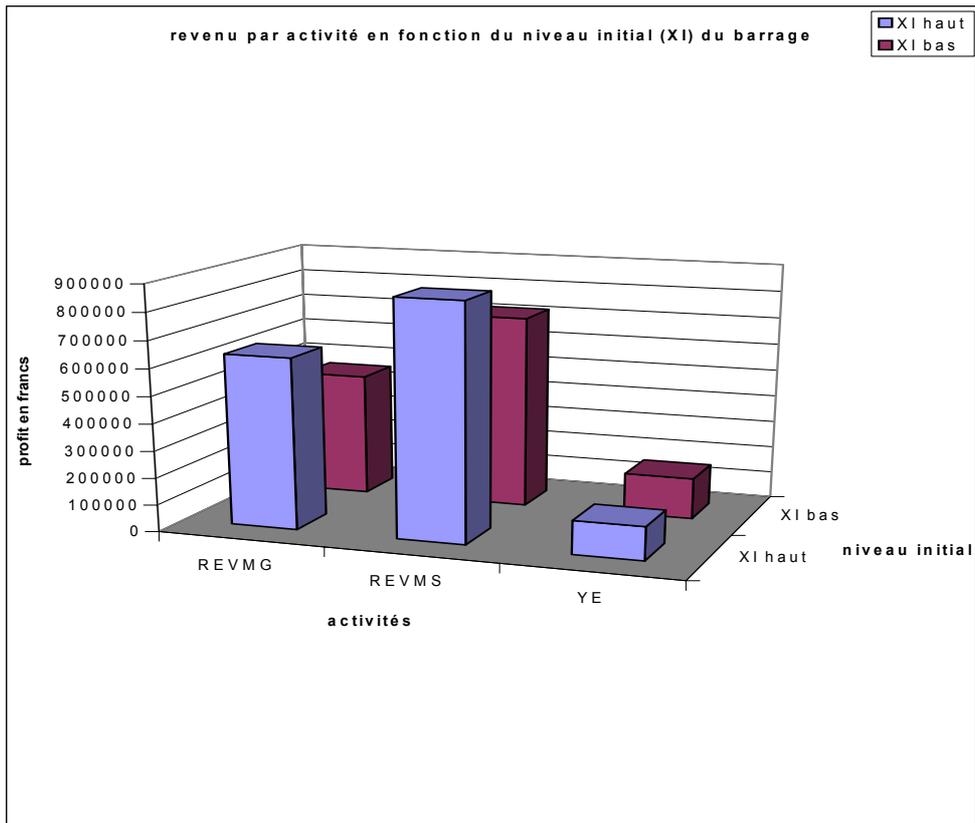


Figure 8 :revenu par activité en fonction du niveau initial 5XI) du barrafe

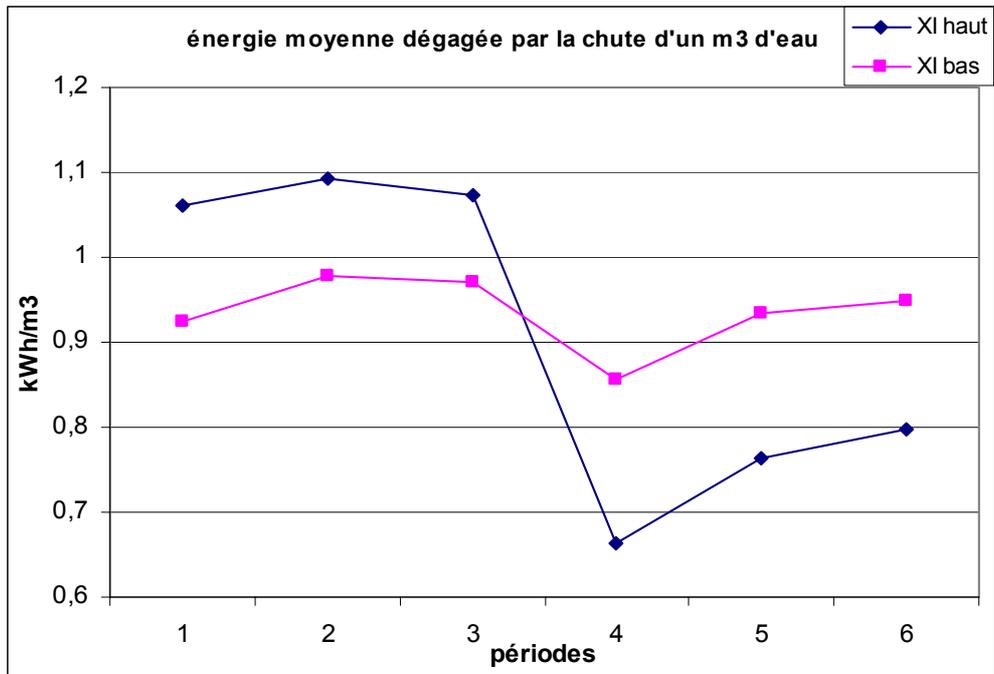


Figure 9 : Energie moyenne dégagée par la chute d'un m³ d'eau

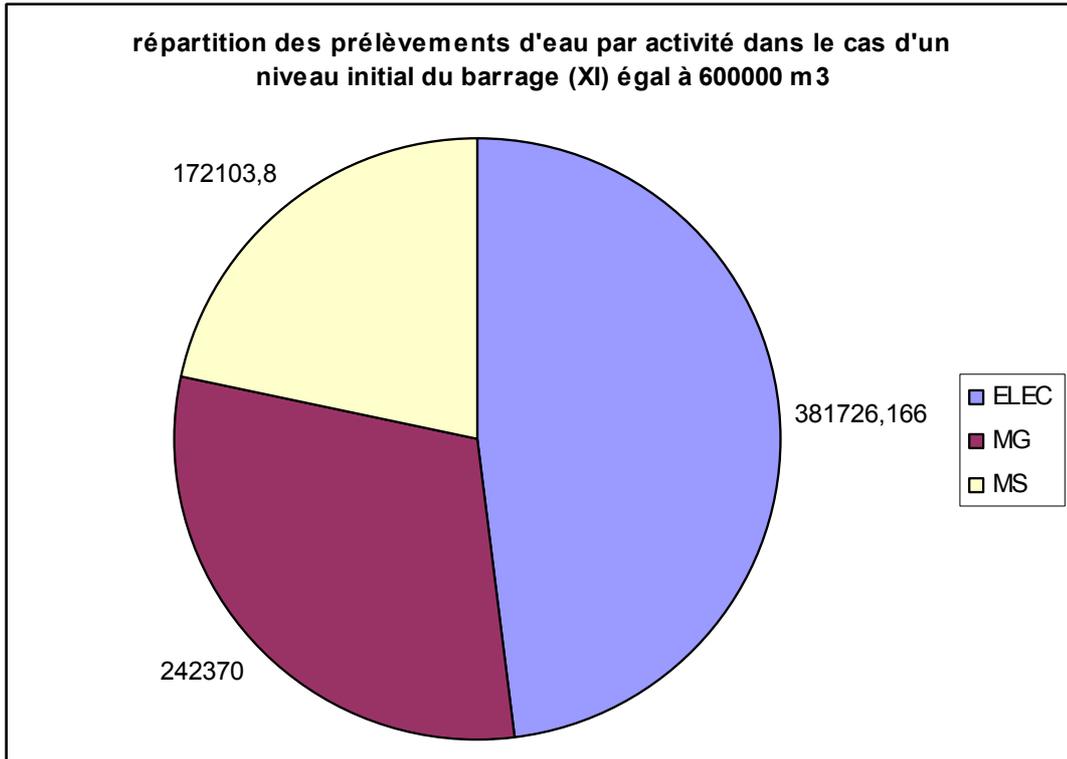


Figure 10 : Répartition des prélèvements d'eau par activité dans le cas d'un niveau initial du barrage

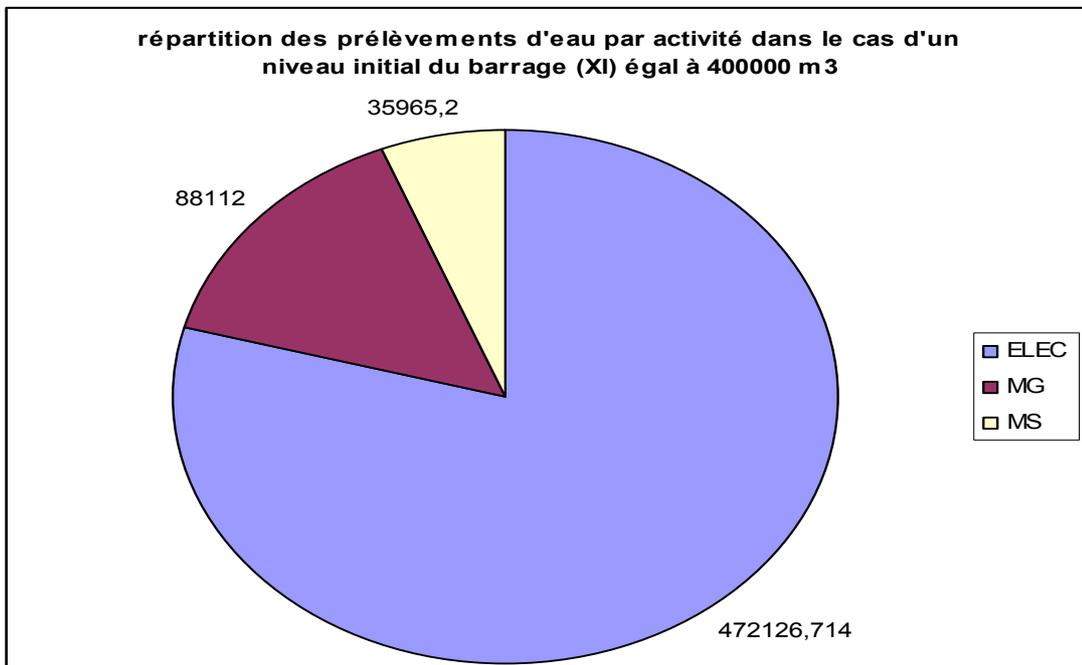


Figure 11 : Répartition des prélèvements d'eau, niveau initial égal à 400000m³

B. Dimensions du barrage

Les dimensions du barrage ne se résument pas à sa simple capacité de stockage, c'est-à-dire son volume. L'énergie cinétique dégagée par un mètre cube d'eau étant une fonction croissante de sa hauteur de chute, la hauteur ainsi que la superficie du réservoir sont des données déterminantes. En fonction de la forme du réservoir, un même niveau d'eau peut correspondre à des hauteurs de chute différentes, et donc à un rendement énergétique par unité d'eau utilisé différent.

Afin d'étudier l'influence de la forme du réservoir sur les résultats du modèle, nous avons procédé à une simulation dans laquelle le réservoir, au lieu d'être un cube de 100 m d'arrête, devient un parallélépipède rectangle de superficie 3300 m² et de hauteur égale à 300 m. Le volume du réservoir ne change donc pas entre le modèle de base et la nouvelle simulation.

Analyse des résultats de la figure 14 : Si la simulation sur les dimensions n'affecte pas le revenu dérivé de l'utilisation de l'eau pour l'agriculture, elle présente toutefois un fort accroissement de celui de l'hydroélectricité. L'observation du graphique sur la valeur dérivée de l'utilisation de l'eau permet d'expliquer cela sans ambiguïté, car cette valeur est près de 3 fois plus élevée dans certaines périodes, ce qui explique les prélèvements d'eau important pour les périodes s1 et s2 (figure 12). Les prélèvements à destination de l'irrigation ne changent pas par rapport au modèle de base, ce qui indique que la valeur de l'eau pour l'activité agricole reste supérieure à celle de l'hydroélectricité, et ce malgré les nouvelles dimensions de l'ouvrage hydraulique.

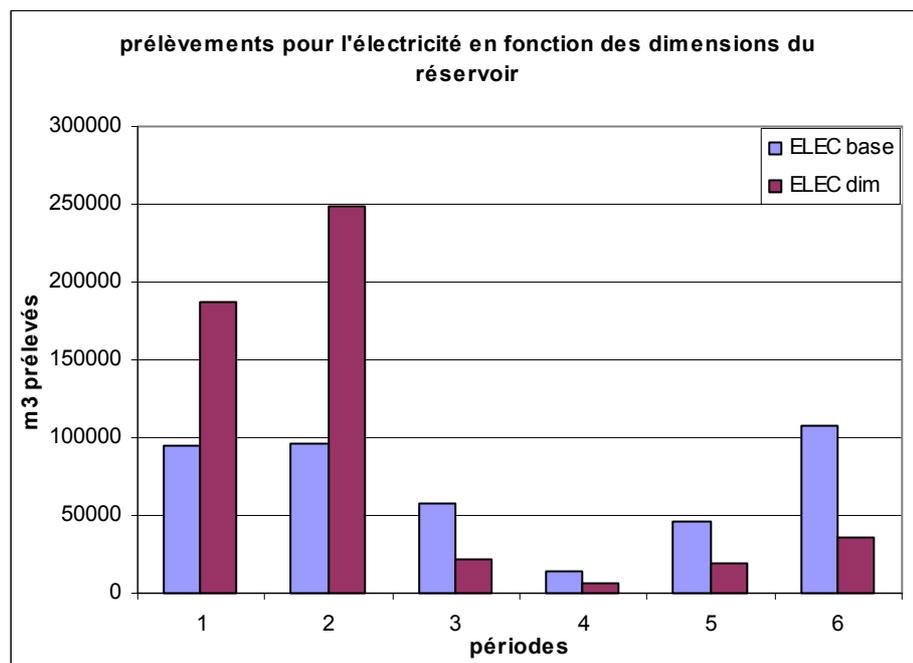


Figure 12 : Prélèvements pour l'électricité en fonction des dimensions du réservoir

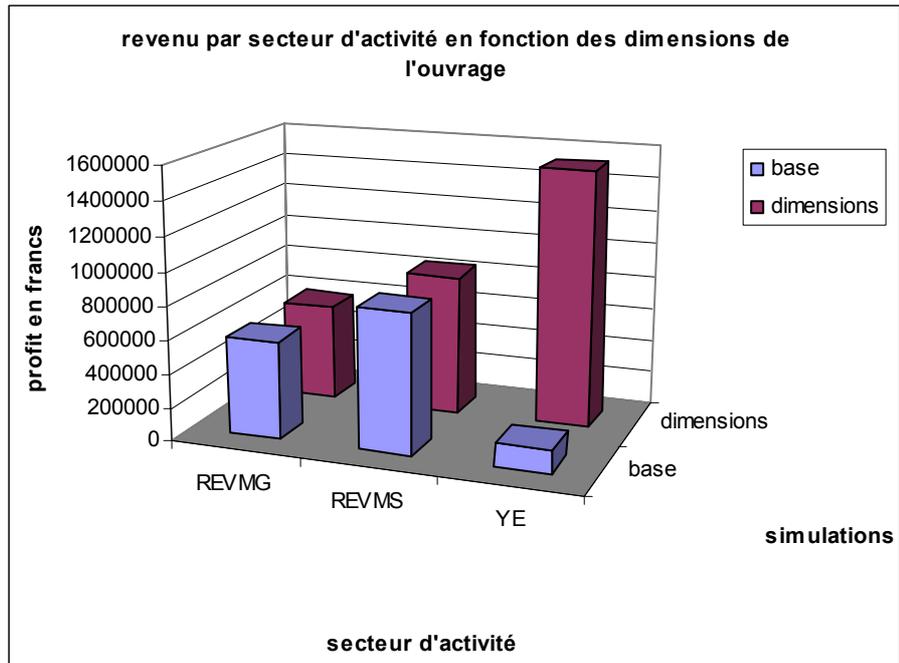


Figure 13 : Revenu par secteur d'activité en fonction des dimensions de l'ouvrage

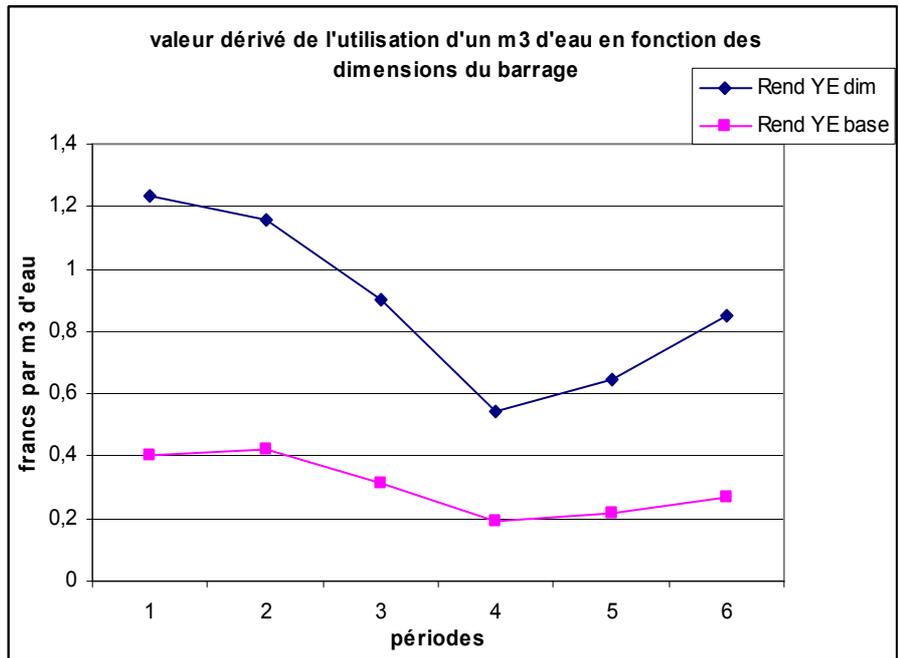


Figure 14 : Valeur dérivée de l'utilisation d'un m3 d'eau en fonction des dimensions du barrage

II. Simulations sur la fonction objectif

1. Simulations sur la fonction objectif

Comme on l'a vu précédemment, non seulement il existe des objectifs différents pour les secteurs agricoles et énergétiques, mais à l'intérieur de chaque secteur, on peut aussi identifier des sous-objectifs (ou objectifs secondaires). Afin de les représenter, nous avons procédé à une simulation de type programmation multi objectif, basée sur la méthode des contraintes. Celle-ci consiste principalement à « optimiser l'un des objectifs considérés dans le modèle, tout en incluant le reste des objectifs dans l'ensemble des contraintes. Par la suite, en faisant une variation paramétrique des valeurs assignées aux termes de droite des objectifs transformés en contraintes, on génère des solutions Pareto optimales. (...). Dans les problèmes multi objectifs avec plus de deux variables de décision, les limites de variation de chacun des objectifs sont parfaitement obtenues à partir de la matrice de gain. »(Zekri 2001)

Nous allons donc distinguer trois objectifs à maximiser, afin de générer la matrice des idéaux et des anti-idéaux, afin mettre en lumière les corrélations possibles entre ces objectifs, et leurs limites de variation.

Nous allons d'abord présenter la façon dont chaque objectif s'exprime en tant qu'objectif, puis en tant que contrainte :

- ❑ Objectif électrique tenant à la mission de service public : la conformité à la DS (Demande Souhaitée).

Comme nous l'avons déjà exprimé, dans le cadre de sa planification de la production électrique nationale, EDF souhaite obtenir de chaque unité énergétique une certaine production énergétique que nous avons appelé DS.

✓ **Contrainte**

Nous avons déjà, dans le modèle de base, intégré une contrainte de production minimale d'énergie qui correspond à la demande souhaitée par EDF (DS) auquel on applique un taux de déviation moyenne toléré (80%).

NRJ minimale produite $> DS * x_{min}$

La production effective de l'unité ne peut donc être inférieure à 80 % de la production souhaitée par le planificateur, mais nous ne lui avons pas posé de limite supérieure dans la mesure où nous postulons qu'il existe une demande extérieure capable d'absorber les surplus de production.

✓ **Objectif**

Cependant, EDF peut ne pas tolérer de déviation entre l'énergie effectivement produite et la demande souhaitée, et ce pour toutes sortes de raison (absence de débouchés pour le surplus d'électricité, coordination du réseau de production énergétique national etc..).

En ce cas, l'objectif devient donc de minimiser les déviations positives comme les déviations négatives.

Minimiser DS – NRJ produite
Avec : DS \geq NRJ produite

- ❑ Objectif électrique de type privé : rentabilité maximum

Cependant, si EDF est une société nationale, soumise à une obligation de continuité de sa mission de service public, elle n'en reste pas moins une entreprise qui doit maximiser ses profits.

✓ **Contrainte**

On pose comme contrainte que la somme des profits sur les états de la nature soit supérieure à une valeur λ que l'on fait varier paramétriquement.

$$\sum YE1 * K(e1) + \dots + \sum YE6 * K(e6) > \lambda$$

✓ **Objectif**

En tant qu'objectif, on maximise la somme des profits sur les états de la nature, tels que décrits dans la section précédente.

Maximiser $\sum YE1 * K(e1) + \dots + \sum YEn * K(en) + \sum YE6 * K(e6)$

- Objectif agricole de profit

A l'instar du concessionnaire hydroélectrique, les agriculteurs cherchent eux aussi à maximiser leur profit. Le risque, et l'aversion supposée des agriculteurs à son encontre, ne seront pas modélisés comme objectif puisque la technique de programmation stochastique discrète le prend déjà en compte (cf chapitre II).

✓ **Contrainte**

On pose comme contrainte que la somme des profits sur les états de la nature soit supérieure à une valeur μ que l'on fait varier paramétriquement.

$$\sum REVMG(e2,e3,e4,e5,e6) * K(e) + \sum REVMS(e2,e3,e4,e5,e6) * K(e) > \mu$$

✓ **Objectif**

En tant qu'objectif, on maximise la somme des profits sur les états de la nature

$$\text{Maximiser } \sum REVMG(e2,e3,e4,e5,e6) * K(e) + \sum REVMS(e2,e3,e4,e5,e6) * K(e)$$

- Analyse des résultats

La première de nos observations est la corrélation *a priori* négative qui semble exister entre les deux objectifs de l'activité hydroélectrique. En effet, lorsque l'on cherche à maximiser le revenu de l'activité hydroélectrique, l'on tend à produire plus d'énergie que souhaité par EDF. En réalité, les deux objectifs ne sont divergents qu'à partir du moment où la production électrique est supérieure à la demande souhaitée, tandis que dans le cas inverse (simulation où la fonction à maximiser est l'objectif agricole), ils sont convergents. C'est pourquoi, lorsqu'on pose pour objectif de maximiser le revenu de l'agriculture, la production énergétique varie peu de celle souhaitée.

On peut donc affirmer que, dans les limites des données choisies pour notre modèle et toutes choses étant égales par ailleurs, l'objectif hydroélectrique de continuité de la mission de service public est plus compatible avec l'objectif de maximisation des profits des agriculteurs, qu'avec l'objectif de maximisation du profit hydroélectrique.

Analyse des résultats de la figure 17 : C'est l'objectif de maximisation du profit hydroélectrique qui dégage le profit plus faible pour la société, alors que les deux autres objectifs tendent vers un bénéfice équivalent. Cependant, en décomposant le revenu de cette simulation, on constate que la perte s'effectue au niveau du bénéfice de l'activité hydroélectrique, tandis que celui de l'agriculture n'en est pas affecté. Les situations de conflit les plus flagrantes ne sont donc pas entre les deux secteurs d'activité, mais plutôt à l'intérieur du secteur énergétique. Or c'est au concessionnaire hydroélectrique qu'il appartient d'établir une hiérarchie entre ses deux objectifs : s'il décide que c'est l'objectif de maximisation du profit qui

prime, alors la figure 18 ainsi que la figure 17 nous indiquent qu'il y a effectivement un des secteurs d'activité qui sera favorisé au détriment de l'autre ; en revanche, si c'est l'objectif de conformité à la DS qui prime, alors pourra exister une convergence entre les deux secteurs d'activité qui, sans être totale, permettra néanmoins d'élaborer des procédures de gestion ne lésant aucun des agents économiques.

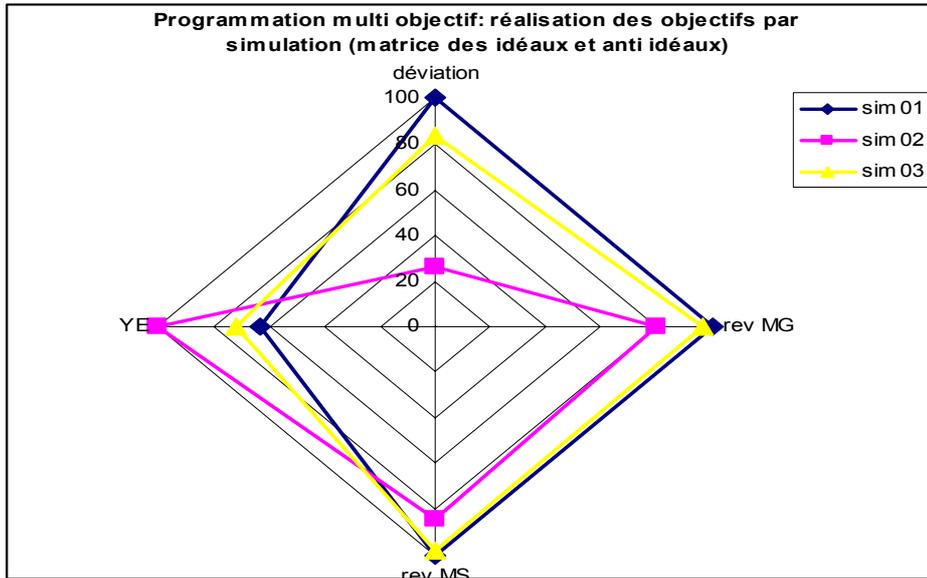


Figure 15 : Programmation multiobjectif : réalisation des objectifs par simulation

légende : sim 01 l'objectif est de minimiser la déviation entre l'énergie souhaitée et l'énergie produite
 sim 02 l'objectif est de maximiser le profit de l'activité hydroélectrique
 sim 03 l'objectif est de maximiser le profit de l'activité agricole

Note : sur l'axe « déviation », la valeur 100 représente le cas où l'énergie produite NRJ est égale à l'énergie demandée DS. Les déviations sont exprimées en valeur absolue et représentent une déviation négative (sim 03 ; $DS \geq NRJ$), aussi bien que positive : (sim 02, $DS \leq NRJ$).

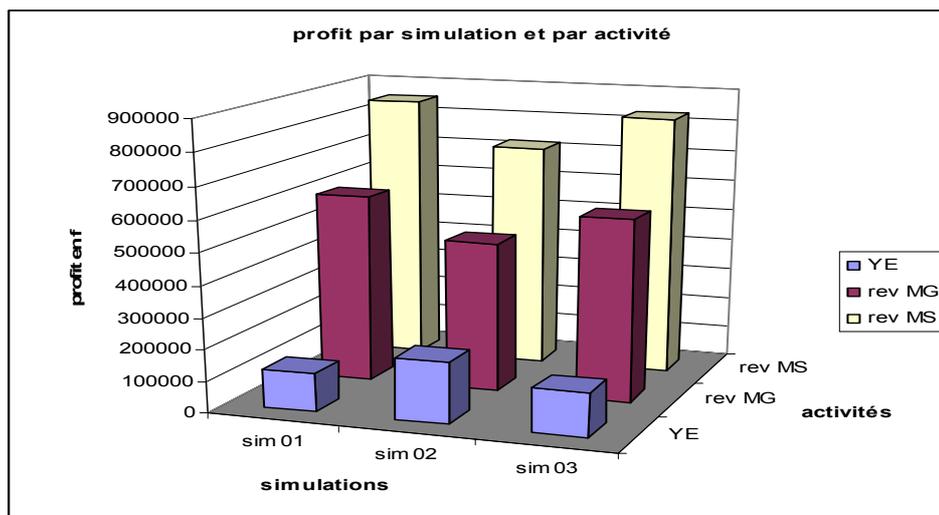


Figure 16 : Profit par simulation et par activité

II. Simulations sur les hypothèses

1. Efficience économique (hypothèse 1)

La théorie de l'efficience économique au sens Parétien précise, comme nous l'avons développé dans le chapitre II, partie IV, que pour que la rentabilité collective soit maximale, le bénéfice marginal doit être le même pour toutes les utilisations. On peut déduire que cela est en contradiction avec la théorie classique de « la main invisible » de Smith, qui prévoit que le bénéfice social maximal s'atteint quand chaque acteur poursuit son propre intérêt.

Afin de déterminer le résultat sur le bénéfice total des deux secteurs si chaque acteur poursuit son intérêt propre, nous allons utiliser la méthode des coefficients de pondération qui permet de représenter ce type de comportement. En effet, si chaque acteur poursuit uniquement ses intérêts, alors on peut dire que pour lui le poids qu'il donne à la réalisation de son objectif est bien supérieur au poids qu'il donne à la réalisation de l'objectif de l'autre secteur.

Nous avons donc procédé à deux simulations, l'une dans laquelle le revenu de l'activité hydroélectrique a un poids 9 fois supérieur à celui de l'activité agricole et que nous désignerons sous le nom « hyp 01 » ; l'autre dans laquelle les poids sont inversés et que nous appellerons « hyp 02 ».

- Analyse des résultats

On observe un relatif équilibre entre les simulations, que ce soit au niveau des prélèvements d'eau effectués ou du revenu qui en est dérivé. En effet, dans le cas où le plus grand poids est donné au secteur énergétique, le bénéfice total de la société est de 1 385 615 francs, contre 1 549 549 F quand le secteur agricole a le plus grand poids, et 1 550 002 F à poids égal. Cela peut être dû soit à l'activation de la contrainte de production d'électricité minimale, soit au fait que les résultats obtenus par un agent économique ayant une stratégie de maximisation de son profit ne sont pas très éloignés de ceux désirés par la société dans son ensemble. Ceci aurait donc tendance à corroborer la théorie d'Adam Smith .

Ainsi, si la recherche d'un optimum Parétien qui transcende les dimensions sectorielles permet effectivement de dégager un bénéfice total plus important que la somme des comportements individuels, force est de constater que cette différence reste minime, notamment dans le cas de l'agriculture. Il faut cependant nuancer cette affirmation en rappelant que, si cette différence est minime (≈ 500 F) en raison des petites dimensions de l'ouvrage hydroélectrique et de la superficie agricole modélisés (barrage d'une capacité de 1 million de m³ seulement, exploitation de 500 ha), à l'échelle d'une région ou même d'une nation, cette différence représente des valeurs beaucoup plus importantes.

De l'observation de la figure 20, on observe que, quand on considère que la recherche du profit individuel permet de dégager le plus grand bénéfice pour la société, l'allocation de la ressource à l'activité pour laquelle elle a la plus grande valeur permet de dégager un bénéfice peu éloigné du bénéfice social maximal. La différence résultant du fait que la valeur de l'eau pour l'agriculture est une fonction décroissante du volume d'eau total utilisé et devient donc inférieure à celle qu'elle aurait pour une utilisation hydroélectrique.

Quand le plus grand poids est donné à l'objectif hydroélectrique, on observe que la simulation présente le plus faible bénéfice total (moins 165 000 francs par rapport à la simulation de base).

Or, si dans notre modèle, nous avons considéré que les deux secteurs ont une égalité de droit et d'accès à l'eau contenue dans le barrage, dans la réalité, EDF dispose d'une priorité physique, technique et contractuelle (concession de l'Etat) sur les agriculteurs. On comprend donc la nécessité qu'il y a de dépasser la dimension sectorielle dans la gestion de la ressource, afin de mettre en place des procédures d'attribution basées sur l'optimum de Paréto.

Remarque : pour rendre justice à Adam Smith, il faut rappeler qu'il n'existe pas de marché libre sur l'eau, en France. Or, si un tel marché existait, la théorie néoclassique prévoit que le jeu de l'offre et de la demande et des mécanismes de prix qui y sont associés, empêcherait qu'une activité accapare une ressource au détriment d'une autre activité qui pourrait en dégager une plus grande valeur.

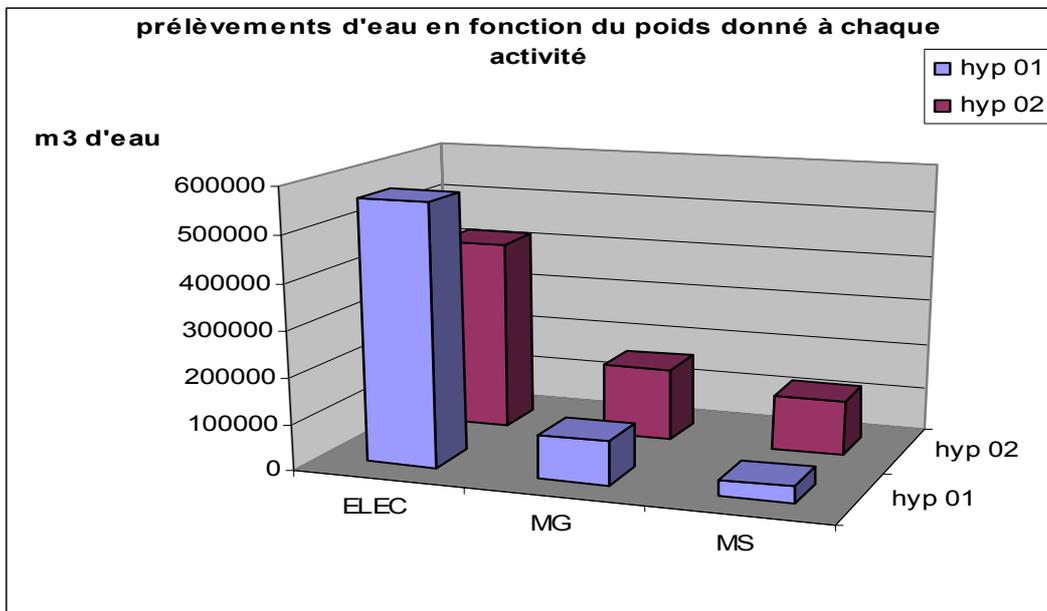


Figure 17 : Prélèvements d'eau en fonction du poids donné à chaque activité

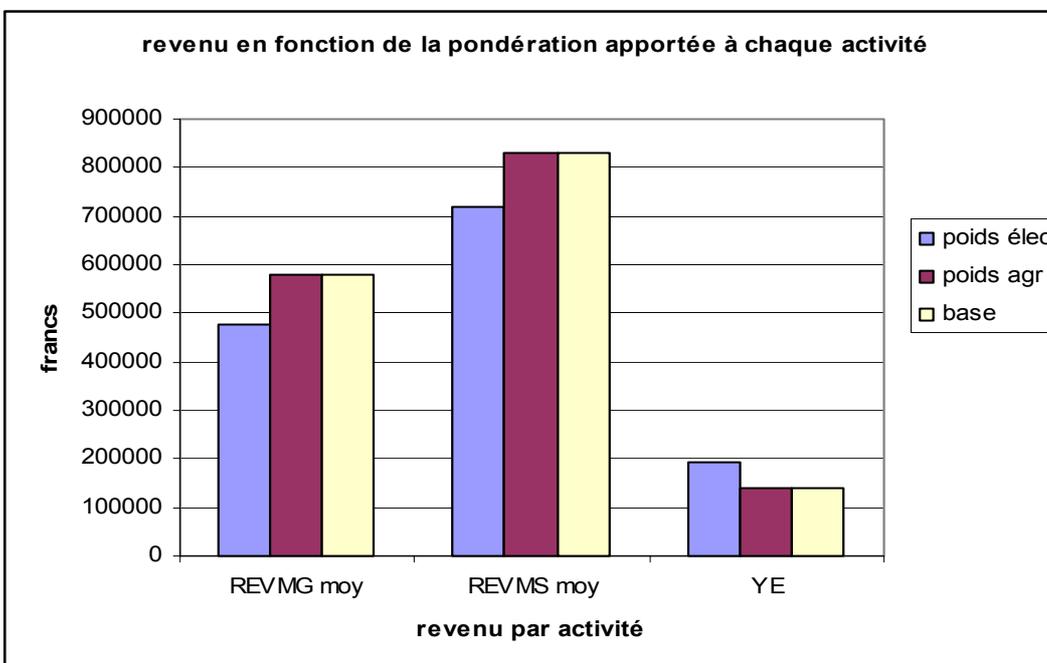


Figure 18 : Revenu en fonction de la pondération apportée à chaque activité

2. Intégration de la prévision (hypothèse 2)

Notre deuxième hypothèse est qu'il faut dissocier du temps la comparaison des bénéfices marginaux.

Il nous faut aussi ici rappeler que nous avons opté pour une connaissance probabiliste du niveau que prendront les états de la nature dans chaque période. On ne se trouve donc plus en situation d'avenir inconnu mais seulement incertain. La distinction n'est pas mince puisqu'elle autorise une stratégie de maximisation du revenu annuel, alors que si l'on était dans une situation où rien ne permet de connaître le niveau des précipitations dans les périodes suivantes, il faudrait alors maximiser le revenu de la période en cours. (cf chapitre III).

Afin de simuler ce type de situation, nous allons accorder une préférence pour le présent qui se matérialisera par un taux d'actualisation différent pour chaque période, mais indépendant de l'activité. Il est à noter que le revenu de l'agriculture ne se réalisant qu'en dernière période, cette activité en sera évidemment pénalisée.

Cette préférence pour le présent se modélise sous la forme :

$$YE1 * \mu_1 + \dots + YE6 * \mu_6 + REVMG * \mu_6 + REVMS * \mu_6 = Z \text{ à maximiser}$$

Le taux d'actualisation est un paramètre décroissant :

$$\begin{array}{lll} \mu_1 = 1 & \mu_2 = 0.8 & \mu_3 = 0.6 \\ \mu_4 = 0.5 & \mu_5 = 0.4 & \mu_6 = 0.3 \end{array}$$

Remarque : le taux d'actualisation que l'on utilise est sans rapport avec celui utilisé en comptabilité, car nous ne prenons en compte que la préférence subjective des acteurs pour le présent sans considérer d'autres éléments tels que le taux d'inflation, le taux d'intérêt etc...

- Analyse des résultats

Très logiquement, l'emploi d'un taux d'actualisation accorde une préférence aux activités dont le revenu est immédiat. Ainsi l'activité hydroélectrique, pour laquelle l'utilisation de la ressource permet une production immédiatement commercialisée, est favorisée par cette actualisation. On peut déterminer avec précision en quelles périodes et en quelles proportions influe ce taux d'actualisation grâce au graphique représentant la répartition par période des prélèvements d'eau de l'activité hydroélectrique. La différence de prélèvements entre simulation étant la plus grande en première période et revenant au même niveau dès la quatrième période.

Cependant, cela se fait au détriment du bénéfice total de la société, ce qui confirme notre seconde hypothèse, et montre la nécessité de considérer le bénéfice indépendamment de la période dans laquelle il se réalise.

Remarques :

- Dans nos précédentes simulations, bien que n'ayant pas explicitement utilisé un taux d'actualisation, il existait pourtant un taux d'actualisation implicite égal à 1 pour toutes les périodes.
- L'utilisation d'un taux d'actualisation ne simule qu'imparfaitement le comportement des agents en situation d'incertitude totale. En effet, théoriquement, le taux d'actualisation de toutes les périodes postérieures à celle en cours devrait être égal à 0.

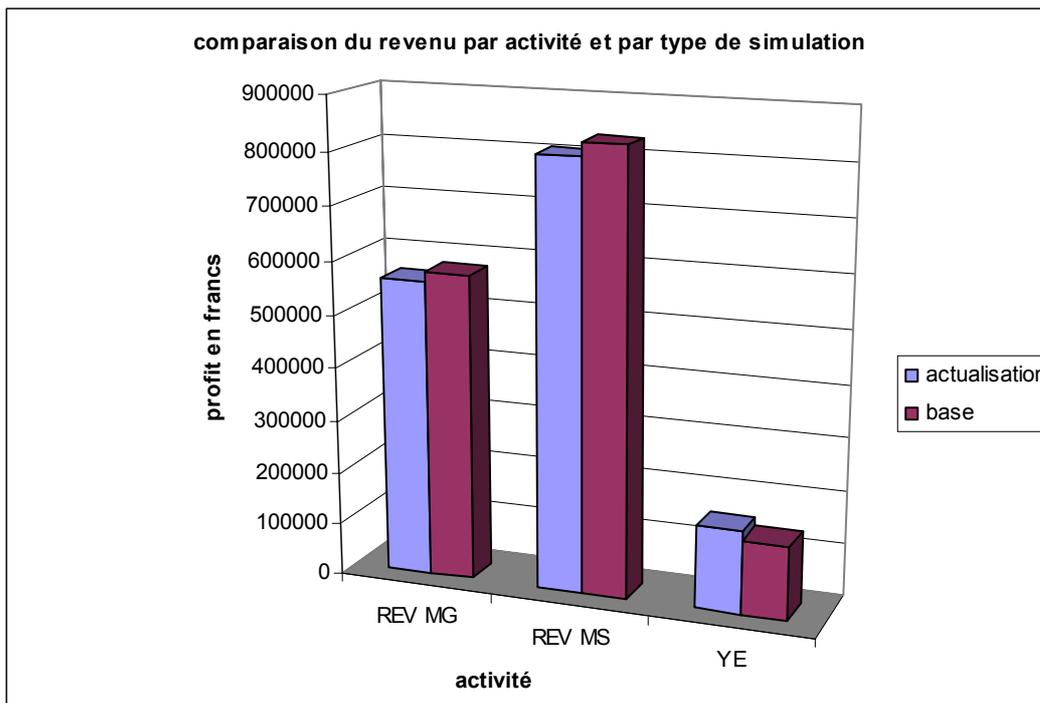


Figure 19 : Comparaison du revenu par activité et par type de simulation

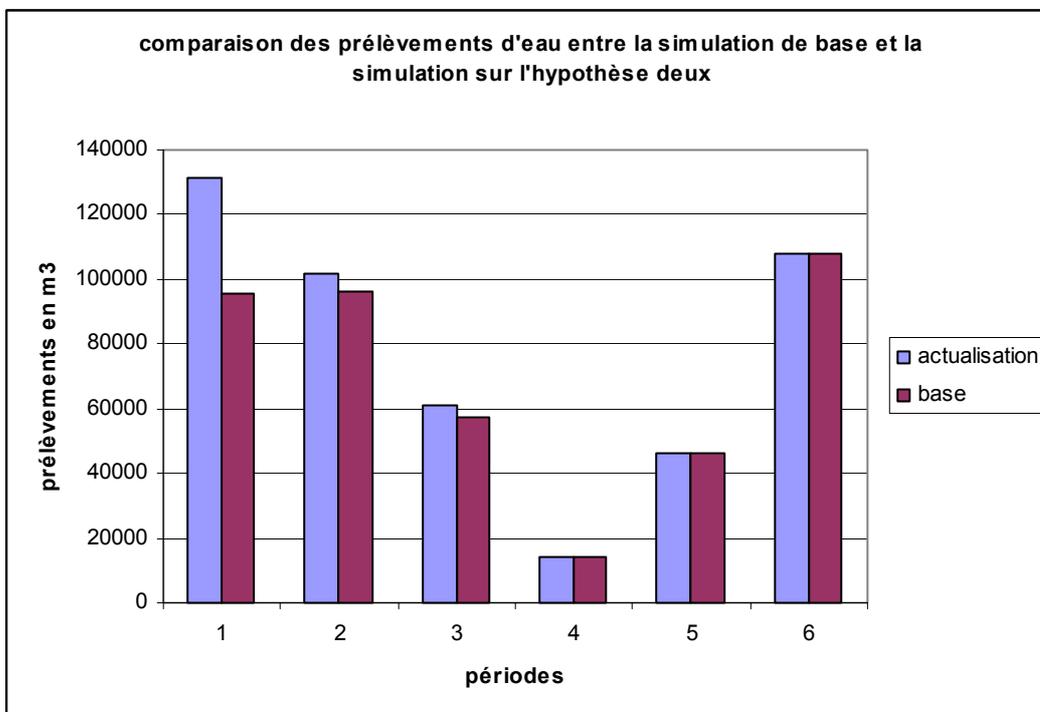


Figure 20 : Comparaison des prélèvements d'eau entre la simulation de base et la simulation sur l'hypothèse deux

3. Réutilisation de la ressource (hypothèse 3)

Comme on l'a précisé dans le chapitre introductif de notre travail, l'utilisation que fait EDF de l'eau est non consomptive et laisse donc la ressource disponible pour un emploi ultérieur par un autre acteur. Ainsi l'agriculture, plutôt que de prélever une partie de l'eau du barrage pour l'irrigation, peut aussi bien utiliser les effluents de ce barrage. Certes, se posent alors des problèmes de timing et de coordination pour la réutilisation de cette eau et une grande partie risque d'être perdue (ce qui s'exprime par un faible Taux de Récupération TR), mais elle est de toute façon perdue à 100 % si l'on ne fait rien.

Rappelons que c'est en partie cette possibilité de double emploi d'un même volume d'eau qui a motivé ce travail.

Nous allons maintenant simuler quelques moyens de coopération. La composante commune à toutes ces simulations sera que l'agriculture, plutôt que d'opérer des prélèvements d'eau exclusifs, peut se servir de l'eau déjà utilisée par l'activité hydroélectrique. Cependant, cette réutilisation pose des problèmes de coordination entre les deux activités qui se modélisent sous la forme d'un coefficient d'efficacité de l'eau réutilisée (EFR) inférieur au coefficient d'efficacité de transport (EFD).

L'écêtement des volumes d'eau dépassant la capacité de rétention du barrage est lui aussi réutilisable par l'agriculture.

A. Simulation de base

Aussi avons-nous procédé à une simulation permettant de représenter la possibilité pour l'agriculture de choisir, pour irriguer les cultures, entre la réutilisation des effluents de l'activité hydroélectrique et des prélèvements directs sur l'eau du barrage. Pour l'instant, les prélèvements directs ne donnent pas lieu à une compensation financière des agriculteurs.

- Analyse des résultats

La figure 22 nous indique que la possibilité de l'agriculture de réutiliser les effluents de l'activité hydroélectrique, si elle n'influe pas sur le revenu de cette dernière, permet néanmoins de dégager une marge supérieure pour les deux variétés de maïs, et au final un bénéfice total supérieur pour la société. Certes, ce surplus apparaît peu important pour notre modèle qui, rappelons-le, est de petites dimensions. Cependant, à l'échelle d'une région, cela peut représenter des sommes considérables, tout en ne remettant pas en question les performances de l'activité hydroélectrique.

Les figures 25 et 26 nous renseignent sur l'origine de l'eau d'irrigation par culture. On observe que la réutilisation de l'eau est le type d'irrigation de prédilection, à l'exception de la période s4 durant laquelle la faible demande d'électricité conjuguée aux besoins en eau des plantes dans une phase très courte (7 jours) critique pour leur développement, nécessite le prélèvement direct d'un volume d'eau conséquent. Nous en concluons que si la réutilisation des effluents est un mode d'irrigation permettant d'assurer un résultat agricole satisfaisant, il est toutefois nécessaire de permettre un accès direct des agriculteurs à l'eau contenue dans le barrage en période s4, durant laquelle se réalise plus de la moitié de la demande en eau de la plante (figure 23).

Cette pratique ne pénalise que peu le secteur énergétique en raison de la faible demande électrique, du prix peu élevé de l'électricité en cette période, ainsi que la proximité des précipitations automnales permettant le remplissage du barrage.

Un autre apport de ce graphique concerne la valeur de l'eau par période et par variété de maïs. On constate que dans la période s1 et s3, c'est le maïs semence qui utilise la quasi-totalité des effluents hydroélectriques, alors qu'en période s2, c'est le maïs grain.

L'on en conclut donc que la valeur de l'eau, en fonction des paramètres physiques (fonction de réponse à l'apport d'eau) et économiques (prix, coûts...), est supérieure en période s1 et s3 pour le maïs semence, et pour le maïs grain en période s2. Cette information devra être prise en compte dans l'établissement de scénarios de coopération visant à coordonner plans de cultures et planification d'EDF. Pour les autres périodes, les deux cultures se répartissent équitablement les volumes d'eau.

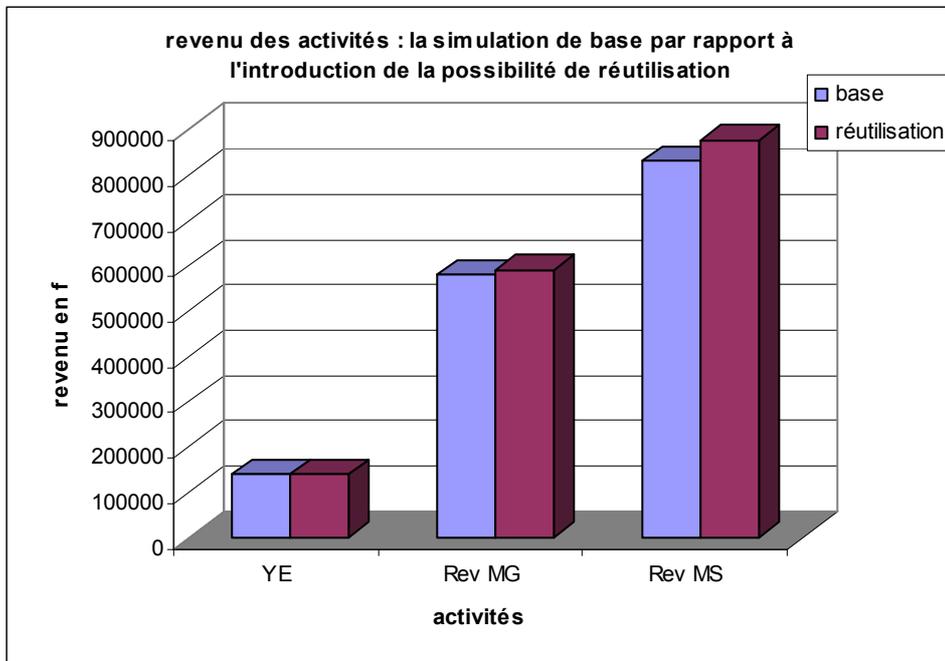


Figure 21 : Revenu des activités : la simulation de base par rapport à l'introduction de la

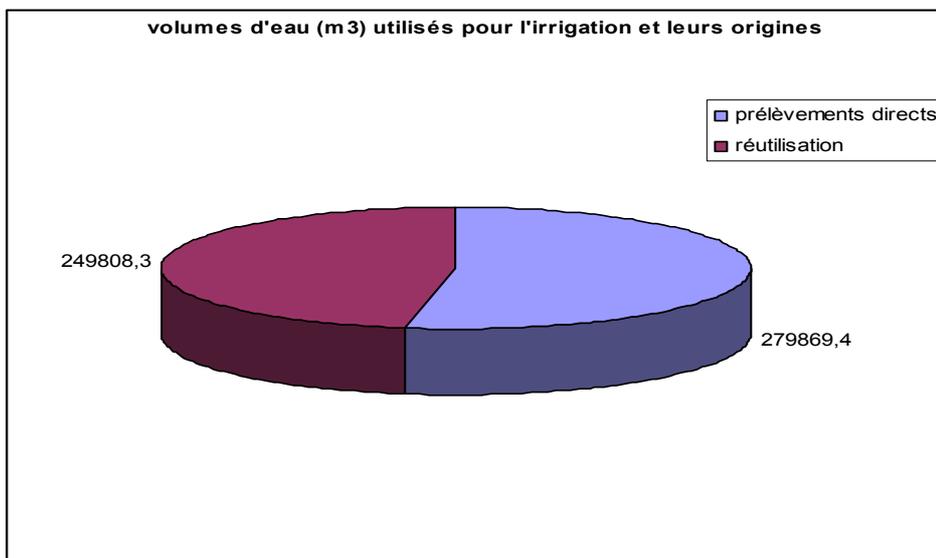


Figure 22 : Volume d'eau (m³) utilisés pour l'irrigation et leurs origines

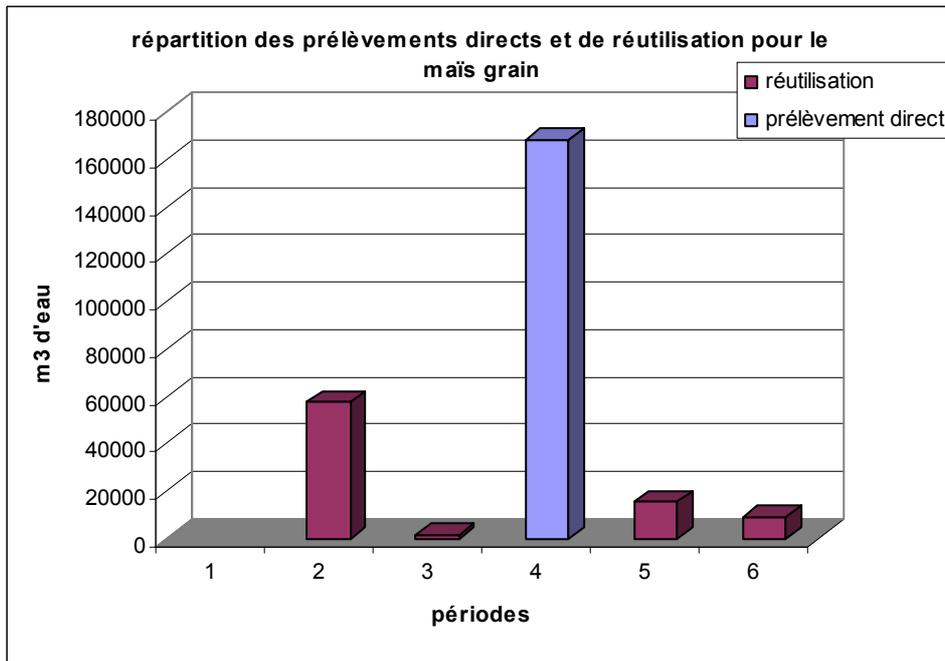


Figure 23 : Répartition des prélèvements directs et réutilisation pour le maïs grain

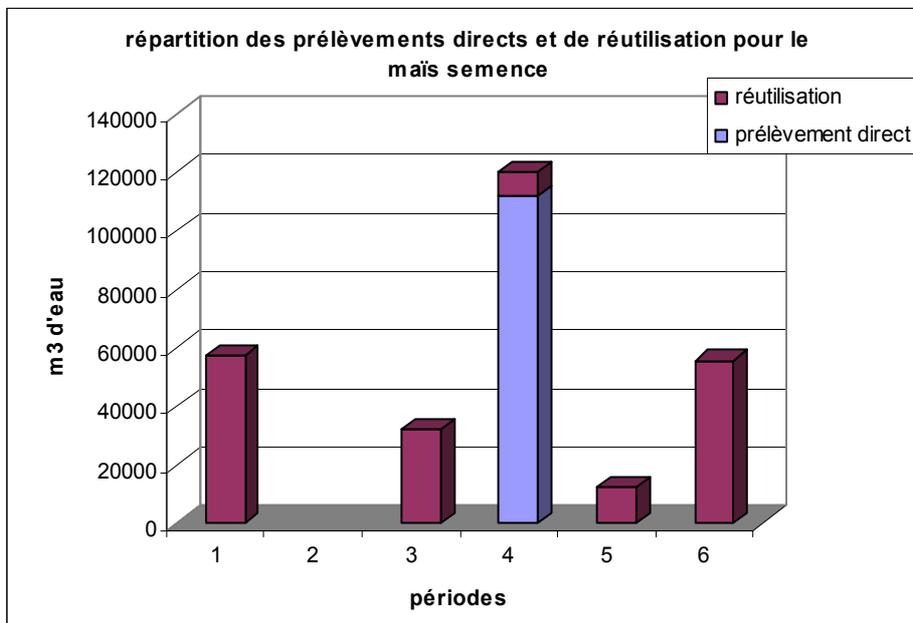


Figure 24 : Répartition des prélèvements directs et réutilisation pour le maïs semence

B. Irrigation uniquement à partir des effluents de l'activité hydroélectrique

Afin de déterminer l'importance de pouvoir procéder à des prélèvements directs pour l'irrigation, nous avons procédé à une simulation dans laquelle l'agriculture ne peut utiliser que les effluents de l'activité hydroélectrique.

- Analyse des résultats

Le volume des effluents n'étant pas assez important pour irriguer correctement les deux variétés de maïs, la totalité de l'eau disponible sera alors allouée au maïs semence qui permet de dégager la plus grande marge bénéficiaire. Ceci explique les écarts constatés pour le revenu des cultures, notamment le maïs grain. Le secteur électrique, disposant d'un plus grand volume d'eau, verra sa marge augmenter. Cependant, le bénéfice total pour la société sera bien moindre que celui permis par la simulation précédente.

Remarque

Nous n'avons dans les simulations précédentes que mis en lumière l'accroissement du bénéfice total de la société dans le cas d'une gestion concertée des différentes activités permises par l'utilisation de l'eau du barrage. Il reste cependant qu'il existe d'autres modalités de coordination pouvant permettre de dégager un surplus au moins équivalent, et qui doivent encore être explorées.

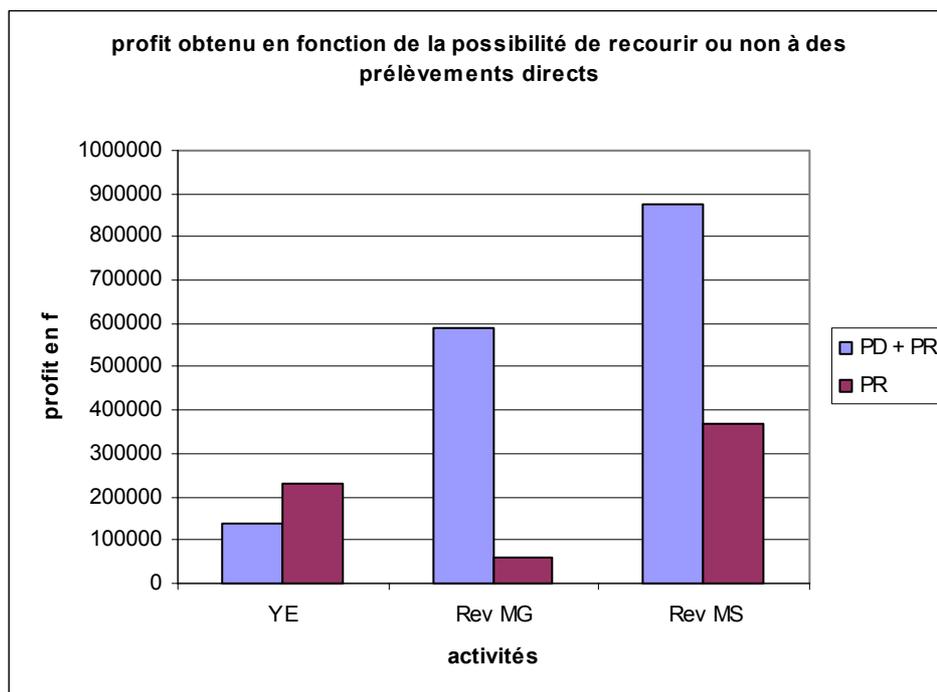


Figure 25 : Profit obtenu en fonction de la possibilité de recourir ou non à des prélèvements directs

Conclusion

Si les pouvoirs publics souhaitent l'ouverture des sites hydroélectriques au multi usage, on a vu dans cette étude qu'il existe de nombreuses difficultés à surmonter avant de mettre en place des procédures de coordination efficaces entre le secteur énergétique et le secteur agricole. Ces difficultés tiennent notamment au fait que la ressource en eau ne fait pas encore l'objet d'un marché de droits librement négociables et qu'en conséquence le principe néo-classique d'équilibre entre l'offre et la demande ne peut s'appliquer. Aussi la recherche de nouveaux principes de son allocation devient-elle pertinente et nécessaire.

Tout d'abord, il convient de souligner l'importance de procéder au cas par cas. En effet, les simulations visant à déterminer la sensibilité du modèle au niveau initial des variables a mis en évidence l'importance des caractéristiques techniques et physiques des barrages et des cultures sur les résultats.

En outre, le caractère local des états de la nature et de leur variabilité accentue encore le caractère spécifique que doit prendre tout projet de gestion commune de la ressource en eau, et nous conduit à souligner encore que la portée de notre étude est restreinte à l'objet modélisé. Toutefois, il nous est possible, toutes choses étant égales par ailleurs, d'affirmer que les hypothèses émises se sont avérées exactes et que leur respect concourt à augmenter le bénéfice total de la société.

Bien que la plus value de leur mise en application soit en général assez faible à l'échelle de la région d'étude, si elle se réalisait sur de grandes zones, elle pourrait être considérable. De plus, le modèle ne mesure pas les améliorations de qualité des produits pouvant en résulter, ni même les bénéfices sociaux résultant de l'absence de conflit entre les acteurs.

Notons encore que l'intégration de la contrainte, concernant la déviation de la production hydroélectrique par rapport à la demande à satisfaire en tant qu'objectif, a mis en évidence une corrélation positive entre les buts des activités agricoles et énergétiques.

Il en résulte que si les modalités de gestion coordonnée des activités restent encore à explorer, notre travail permet néanmoins d'affirmer qu'elles sont possibles et permettent d'accroître le bénéfice total pour la société, notamment si l'on respecte les trois hypothèses que nous avons développées.

Bibliographie

1. **Adesina A., Sanders J.H. (1991).** *Peasant farmer behaviour and cereal technologies: stochastic programming analysis in Niger.* Agricultural Economics, vol. 5, n. 1, p. 21-38.
2. **Antle J.M. (1987).** *Econometric Estimation of Producers' Risk Attitudes.* American Journal of Agricultural Economics, vol. 69, n. 3, p.509-522.
3. **Bergman, H., Boussard, J.M. (1976).** *Guide to the Economic Evaluation of Irrigation Projects.* Paris : OCDE. 248 p.
4. **Binswanger, H.P. (1980).** *Attitudes Toward Risk: Experimental Measurement in Rural India,* American Journal of Agricultural Economics, 62, 395-407
5. **Blanco Fonseca, M. (1999).** *La Economía del Agua : Análisis de Políticas de Modernización y mejora de regadíos en España,* Thèse de doctorat : Universidad Politécnica de Madrid, 279 p.
6. **Boussard, J.M., Petit, M. (1966).** *Problèmes de l'accession à l'irrigation : étude économétrique d'une petite région.* 3^{em} éd. Paris : INRA.
7. **Burrill, A. (1997).** *Assessing the Societal Value of Water in its uses [on line].* Luxembourg : Office for Official Publications of the European Communities, 47 p. [Consulté le 10.01.05]. <http://www.jrc.es/home/publications/publication.cfm?pub=42>
8. **Chemak, F. (1999).** *Aide à la décision au niveau d'un périmètre irrigué :essai de mise en œuvre des concepts des modèles multi-agents.* Thèse Master of Science : CIHEAM-IAM Montpellier, 163 p. (Master of Science; n° 50).
9. **Dillon J.L., Scandizo P.L. (1978).** *Risk attitudes of subsistence farms in northeast Brazil: A sampling approach.* American Journal of Agricultural Economics, vol. 60, n. 3, p. 425-435.
10. **Dinar, A., Loehman, E.T., (1995).** *Water Quantity/Quality Management and Conflict Resolution ; Institutions, Processes and Economic Analyses.* Washington : Library of Congress Catalog Card Number : 94-13729. Praeger Publisher, 77 p.
11. **Dinar, A., Rosegrant, M.W., Meinzein-Dick, R. (1997).** *Water Allocation Mechanisms : Principles and examples. [on line].* World Bank, Agriculture and Natural Resources Department, 48 p. [consulté le 10.01.05]. http://www-wds.worldbank.org/servlet/WDSContentServer/WDSP/IB/1997/06/01/000009265_3970909143002/Rendered/PDF/multi_page.pdf
12. **Doward A.R. (1991).** *Integrated decision rules as farm management tools in smallholder agriculture.*Journal of Agricultural Economics, vol. 42, p. 146-160.
13. **Desaigues, V. Lesgards, D. Liscia, (1999),** " *La valeur de l'eau à usage récréatif : application aux rivières du Limousin* ", in La valeur économique des hydrosystèmes, sous la direction de P. Point, Economica.

14. **Hazell, P.B.R., Norton, R.D., Parthasarathy, M. and Pomareda, C. (1983).** *The Importance of Risk in Agricultural Planning Models*, in: Norton, R.D. and Solis, I. (eds.), *The Book of CHAC: Programming Studies for Mexican Agriculture*, pp. 225-249, The John Hopkins University Press, Baltimore.
15. **Hazell, P.B.R. and Norton, R.D. (1986).** *Mathematical Programming for Economic Analysis in Agriculture*, MacMillan Publishing Company, New York.
16. **PAP-CAR (Centre des activités régionales pour le Programme d'actions prioritaires, Split). (1998).** *Directives pour l'approche intégrée au développement, à la gestion et à l'utilisation des ressources en eau*. PAP/CAR : PAP-3/1998/G.1. Split (Croatie) : PAP-CAR, 123 p.
17. **Lambert, D., and McCarl, B.A. (1985).** *Risk Modeling Using Direct Solution of Nonlinear Approximations of the Utility Function*, *American Journal of Agricultural Economics*, **67**, 846-852.
18. **Moscardi E., Janvry A. de (1977).** *Attitudes Toward Risk Among Peasants: an Econometric Approach*. *American Journal of Agricultural Economics*, vol. 59, p. 710-717.
19. **Patten, L.H., Hardaker, J.B. and Pannell, D.J. (1988).** *Utility Efficient Programming for Whole-Farm Planning*, *Australian Journal of Agricultural Economics*, **32**, 88-97.
20. **Pillet, B. (2000).** *La Gestion concertée de l'eau en France : Enseignements pour la gestion des communs*. Thèse de doctorat : Université de Montpellier I, Laboratoire d'Analyse Méridional d'Economie Théorique et Appliquée (LAMETA), 255 p.
21. **Rae, A.N. (1970).** *Stochastic Programming, Utility, and Sequential Decisions Problems in Farm Management*. *American Journal of Agricultural Economy*, Jan 1970, vol. 21, p. 133-140.
22. **Rainelli, P., Vermersch, D. (1997).** *Irrigation in France : current situation and reasons for its development*. Muscrit non publié d'une étude soumise à la direction de l'environnement de l'OCDE, 65 p.
23. **Shapiro B.I., Sanders J.H., Reddy K. C., Baker T. G. (1993).** Evaluating and adapting new technologies in a high risk agricultural system. *Agricultural Systems*, vol. 42, p. 153-171.
24. **Sumpsi Vinas, J.M., Garrido Comenero, A., Blanco Fonseca, M. et al. (1998).** *Economía y política de Gestión del Agua en la Agricultura*. Madrid : Ministerio de Agricultura, Mundi-Prensa, 144 p.
25. **Taylor, R.G., Young, R.A. (1995).** *Rural to Urban Water Transfers : Measuring Direct Foregone Benefits of Irrigation Water under Uncertain Water supplies*. *Journal of Agricultural and Resource Economics*, vol. 20, n. 2, December 1995, p. 247-262.
26. **Torkamani J., Hardaker J.B. (1996).** *A study of economic efficiency of Iranian farmers in Ramjerd district: an application of stochastic programming*. *Agricultural Economics*, vol. 14, n. 2, p. 73-83.
27. **Zekri, S. (ca 2000).** *La Programmation Multi Objectif (PMO) dans la gestion des ressources naturelles*. Document non publié disponible au CIHEAM- IAMM, 3191 route de Mende, BP. 5056, 34093 Montpellier Cedex 5.