



**Thèse Présentée
par Idrissa
Kirsyamba
OUIMINGA**

**Unité de formation et de
Recherche en
Sciences Économiques
et de Gestion (UFR/SEG)**

**ANALYSE DE L'IMPACT
ECONOMIQUE DE
L'ENSEMENCEMENT DES NUAGES
DANS LA REGION DU NAKAMBE
(BURKINA FASO)**

Ouagadougou 14 décembre 2011

Burkina Faso

Unité-Progress-Justice

MINISTERE DES ENSEIGNEMENTS SECONDAIRE ET SUPERIEUR



**Unité de formation et de Recherche en
Sciences Economiques et de Gestion
(UFR/SEG)**

**THESE DE DOCTORAT UNIQUE ES SCIENCES
ECONOMIQUES**

Thème

**ANALYSE DE L'IMPACT ECONOMIQUE DE
L'ENSEMENCEMENT DES NUAGES DANS LA
REGION DU NAKAMBE (BURKINA FASO)**

Présentée et soutenue publiquement par :

Idrissa Kirsyamba OUMINGA

Jury

Pr Patrick POINT, Directeur de Recherche (CNRS), Université Bordeaux IV, *Président du jury.*

Pr Taladidia THIOMBIANO, Maître de Conférences, Université Ouaga II, *Directeur de Thèse.*

Pr Claude NJOMGANG, Professeur Agrégé, Université Yaoundé II, *Membre du jury.*

Pr Idrissa OUEDRAOGO, Maître de Conférences Agrégé, Université Ouaga II, *Membre du jury.*

Rapporteurs

Pr Patrick POINT, Directeur de Recherche, Université Montesquieu-Bordeaux IV (France).

Pr Claude NJOMGANG, Professeur Agrégé, Université Yaoundé II (Cameroun).

Ouagadougou 14 décembre 2011

Cette thèse a été réalisée grâce au financement du Nouveau Programme de Troisième Cycle Inter-Universitaire en Economie (NPTCI) et également du soutien de la Coordination Nationale de Programme Saaga sise à la base aérienne de Ouagadougou et du Conseil pour le Développement de la Recherche en Sciences Sociales en Afriques (CODESRIA).

L'Université Ouaga 2 n'entend donner aucune approbation, ni improbation aux opinions émises dans cette thèse ; ces opinions doivent être considérées comme propres à leur auteur.

CODESRIA - BIBLIOTHEQUE

DEDICACE

***A mon épouse et
toute ma famille***

CODESRIA - BIBLIOTHEQUE

REMERCIEMENTS

C'est avec un réel plaisir et beaucoup d'enthousiasme que ce travail a été réalisé grâce à la contribution de chacun d'entre vous qui m'avez permis d'effectuer ces recherches. Vous avez grandement contribué par vos encouragements, vos contributions scientifiques et logistiques dans le but de faciliter autant que possible mes conditions de travail. A cet effet, mes remerciements vont à l'endroit :

- du Professeur Taladidia THIOMBIANO pour, son encadrement très précieux durant ces années marqué par une très grande disponibilité malgré ses occupations, son encouragements, et ce dans le cadre professionnel mis à disposition au sein de son laboratoire pour nous faciliter la recherche ;
- de l'ensemble de la cellule scientifique dirigeante du Programme Saaga, et particulièrement au Général Abraham TRAORE pour son initiative à mettre en place une telle évaluation et aux efforts énormes consentis pour la réussite de cette recherche ;
- de ma famille et mon épouse pour leur soutien moral, social et matériel indéfectible à notre égard durant toutes ces années ;
- de la Direction Générale de la Promotion de l'Economie Rurale (DGPER) pour leur collaboration et contribution aux besoins statistiques de cette recherche ;
- de la Direction Générale de la SONABEL, à travers son ex Directeur Général Salif KABORE et son Conseiller Technique Monsieur Saïdou OUIHINGA et tout le personnel pour toutes les dispositions prises dans le but de faciliter les travaux de terrain.
- de la Direction Générale des Ressources Halieutiques et particulièrement à Monsieur Rock NOMBRE pour sa disponibilité, son soutien logistique sans faille pour faciliter les travaux de terrain ;
- du Nouveau Programme de Troisième Cycle Inter-Universitaire et de son personnel pour leur soutien financier, l'encadrement et l'appui moral dans le cadre de l'Appui à la Thèse ;
- du Centre d'Etudes, de Documentation et de Recherche Economiques et Sociales (CEDRES), à son Directeur et à son personnel pour son accueil et les efforts consentis pour nous mettre dans de bonnes dispositions de travail ;

- du Professeur Bernadette KAMIGNAN DIA et au Docteur Noël THIOMBIANO pour leur disponibilité, leur soutien et contribution scientifique ;
- de l'ensemble des enseignants et du personnel de l'UFR/SEG de l'Université Ouaga 2 pour l'environnement propice et la compréhension pour nous faciliter les conditions de travail en tant que doctorant ;
- de l'ensemble des membres du Laboratoire de l'Economie de l'Environnement et de SocioEconométrie (LEESE) et de tous les chercheurs pour leurs apports combien précieux à l'occasion de séminaires scientifiques et d'échanges de travail qui ont contribué à améliorer le travail.

CODESRIA - BIBLIOTHEQUE

AVANT-PROPOS

Cette thèse se situe dans un cadre académique mais également dans le cadre d'une recherche scientifique collaborative dans le but de répondre à des interrogations de plus en plus grandes.

Depuis ces dix dernières années, le concept de changements climatiques est récurrent à l'échelle planétaire. Cela est très concret avec les changements observés sur les éléments de base du climat que sont la température, la pluviométrie et les vents. On a selon les zones : des températures de plus en plus basses ou élevées ; des saisons hivernales plus courtes ou plus longues avec des inondations et parfois des sécheresses rencontrées ça et là ; et des tempêtes de vents violents de plus en plus fréquentes à travers le monde. Ces changements visibles, étaient accentués pour certains pays par une croissance démographique démesurée, rendant encore plus difficiles les conditions économiques de ces derniers qui le plus souvent se trouvent être des pays en développement.

Dans un tel contexte, plusieurs stratégies ont été développées comme mesures d'adaptation à ces changements climatiques. Pour les pays développés disposant de plus de ressources, la tâche s'est révélée moins ardue. Pour les pays en développement, les mesures à prendre se sont trouvées, le plus souvent difficiles à mettre en application faute de moyens financiers. La plupart des ces projets nécessitent régulièrement l'intervention des bailleurs de fonds. Dans de telles conditions, la prise en charge de certains programmes par les Etats interpelle les citoyens sur l'opportunité de s'engager dans ces actions d'adaptation de grande envergure avec de fortes incertitudes sur les retombées.

Le Burkina Faso n'a pas fait exception avec des hivernages plus courts, favorisant le recours aux semences hâtives et bien d'autres problèmes tels que la baisse des isohyètes. L'objet cette thèse qui essaie de mettre en lumière les retombées économiques du programme d'ensemencement des nuages, marque un point d'arrêt pour essayer d'apporter des éléments de réponse sur l'usage de cette pratique.

Ce travail collaboratif au niveau multidisciplinaire, vient aussi pour donner un point d'ancrage aux Etats Sahéliens sur l'expérience réalisée dans un pays aux conditions climatiques et économiques sensiblement identiques aux leurs par opposition aux résultats obtenus par les pays développés où les conditions diffèrent.

Les changements climatiques, dont l'évolution est difficile à prévoir par les spécialistes, confirment l'idée selon laquelle il faut toujours, pour les pays, chercher à s'adapter à ce qui se présente ; d'où l'idée que ces travaux ne sont qu'un prélude, une contribution qui permettra de poursuivre sur l'évaluation de cette stratégie ou d'autres méthodes d'adaptation aux changements du climat.

CODESRIA - BIBLIOTHEQUE

RESUME

De nos jours, le Burkina Faso comme plusieurs pays de la planète subit de plein fouet les effets des changements climatiques à des degrés divers. L'un des principaux faits observés est le changement du régime pluviométrique tendant pour certains, comme c'est le cas du Burkina Faso, à des périodes de plus en plus arides et une avancée du désert.

Face à cette situation, les autorités ont optées pour le recours à l'ensemencement des nuages comme stratégie de mobilisation des ressources en eau. Cette option des autorités burkinabè s'est soldée en 2005 par la mise en place d'un programme après des phases d'essai sous forme ponctuelle en 1998, puis expérimentale de 1999 à 2004.

Le passage en revue de l'usage de cette pratique, a permis de voir qu'elle était utilisée aux Etats-Unis, en Amérique Latine, en Chine et bien d'autres pays à des fins économiques. Les résultats obtenus par ces pays ont plutôt été positifs tant sur le plan agricole aux Etats-Unis que sur le plan énergétique en Amérique Latine. D'une manière globale, le recours à cette pratique qui rentre dans le cadre de l'innovation technologique a eu un succès dans les pays qui l'ont utilisée.

Mais, pour le Burkina Faso, cette méthode s'est révélée pour un grand nombre comme discutable quant à son caractère rentable du point de vue économique. C'est ce qui a conduit ces travaux à se pencher sur quatre grands axes économiques que sont les retombées agricoles, halieutiques, énergétiques et forestières. En outre, au plan social, les questions d'approvisionnement en eau ont fait l'objet d'analyse.

La vérification des interrogations posées s'est faite empiriquement par des estimations économétriques avec des analyses basées sur la méthode du changement de productivité. Cette dernière a permis de faire ressortir pour des périodes sans et avec recours à l'ensemencement des nuages, des résultats intéressants. Sur le plan agricole, les résultats ont attesté d'un effet positif sur le maïs et le mil et d'un effet négatif sur le sorgho. Au plan énergétique, les tests ont montré un effet positif de cette technologie sur la production hydroélectrique. Quant au volet halieutique, les estimations ont révélées un effet négatif sur le niveau des captures. Pour ce qui est du couvert végétal, on a constaté une amélioration de la productivité de bois grâce à l'ensemencement des nuages.

A noter que dans l'ensemble, les effets positifs comme négatifs enregistrés ont été de faibles ampleurs surtout pour les effets négatifs.

L'analyse à ce stade, a permis de conclure sur des résultats globalement positifs mais pas suffisamment importants par rapport aux moyens financiers investis et donc non rentable dans la vision néoclassique où les fonds investis doivent être rentabilisés mais rentable dans l'optique keynésienne. Le prolongement de cette analyse en faisant intervenir l'approvisionnement en eau montre que ce programme même dans la vision néoclassique est rentable.

En somme, compte tenu de la qualité sanitaire qui est jusqu'à présent prouvée et des moyens importants à investir, un tel programme est appelé à être soutenu financièrement pour des grandes entreprises qui ont de gros enjeux telle que la SOFITEX, à l'image de ce qui se fait aux Etats-Unis où de tels programme sont financés par des multinationales.

SUMMARY

Nowadays, the Burkina Faso as several countries in the world, undergo with strong hit the effects of climatic changes at different degrees. One of the most facts observed is the change of the amount of rain and his distribution in space for countries like Burkina Faso. This is showed by periods more arid with desert advance.

In face of this situation, national authorities have chosen to have recourse to cloud seeding as strategy to get more water. This choice of government was end in 2005 by the establishment of a permanent program. Before this, there was an operational phase in 1998 followed by an experimental phase from 1999 to 2004.

The study of this practice use allowed us to know that it was also used at United States, in Latin America, in China and more other countries for economics purposes. The results obtained by these countries were positive so much for agriculture crops in United States as energetic plan in Latin America. Globally, the recourse to this practice is a technology innovation which met a success where it was implemented.

But, for Burkina Faso, this method proved to be questionable for many citizens about is potential economic cost-effectiveness. This is why this research is focused on four major's axes that are: agriculture, fishing, hydroelectricity and forest with their respective results. In add, for social aspect analyses of supplying water issue were realized.

The checking of these issues was made empirically by econometrics estimations with analyses based on the productivity change. This method allowed bringing out interesting results between two periods: the first one without implementation of the technology of cloud seeding and the second one with the implementation. For agricultural field, the results confirmed positives effects for maïze and millet but the effect is negative for sorghum. Concerning energetic domain, the test also revealed a positive effect on hydroelectricity production. About fishery, the estimations have showed a negative effect on captured volume. Relative to the vegetal cover, we have noticed an improvement of wood productivity because of the cloud seeding.

On the whole, we can tell that negatives and positives effects recorded were weak widths, especially the negatives effects.

At this level, analyses have permitted to conclude that results are globally positives but not with an important width than the capital invested. This is why we can tell according to the neoclassic vision, where funds must be cost-effective, that the program is not profitable but profitable in the Keynesian vision. In extension of this comment in taking account of the supplying water, even in the neoclassic vision, the cloud seeding program is cost-effective.

All things considered, with the health quality justified till now and important financials to invest, high enterprises which have greats interest at stake have to support financially this kind of program in developing countries.

SIGLES ET ABREVIATIONS

ACP : Afrique Caraïbe Pacifique

APENS : Augmentation des Précipitations par Ensemencement des Nuages au Sahel

CCI-BF : Chambre de Commerce et d'Industrie du Burkina Faso

CNRS : Centre National de la Recherche Scientifique

CILSS : Comité permanent Inter-Etats de Lutte contre la Sécheresse dans le Sahel

DGPER : Direction Générale de la Promotion de l'Economie Rurale

FAO : Food and Agriculture Organization of the United Nations

Hbts/Km²: Habitants par kilomètre carré

IDH : Indice de Développement Humain

IFPRI : International Food Policy Research Institute

INSD : Institut National de la Statistique et de la Démographie

MEA : Ministère de l'Environnement et de l'Assainissement du Mali

MEF : Ministère de l'Economie et des Finances

MIDA : Migration pour le Développement en Afrique

MOB : Maîtrise d'Ouvrage de Bagré

MRA : Ministère des Ressources Animales

LNSP : Laboratoire National de Santé Publique

ORSTOM : Organisation de la Recherche Scientifique et Technique Outre Mer

OMM : Organisation Météorologique Mondiale

OMS : Organisation Mondiale de la Santé

PDR : Programme de Développement Régional

PGCD : Panhandle Groundwater Conservation District

PIB : Produit Intérieur Brut

RGPH : Recensement Général de la Population et de l'Habitat

SOFITEX : Société burkinabè des Fibres Textiles

UNEP : United Nations Environment Program

VIH/SIDA

WCU : World Conservation Union

WRI : World Resources Institute

TABLE DES MATIERES

| | |
|--|-----|
| SIGLES ET ABREVIATIONS | 2 |
| LISTE DES TABLEAUX..... | 5 |
| LISTE DES FIGURES..... | 7 |
| INTRODUCTION | 8 |
| PREMIERE PARTIE : CONTEXTE ET APPROCHE DU PROBLEME | 16 |
| CHAPITRE 1 : CONTEXTE DE L'ETUDE | 17 |
| 1.1. PROBLEMATIQUE | 17 |
| 1.2 JUSTIFICATION DE L'EFFET PROGRAMME | 26 |
| 1.2.1 Analyse cartographique | 26 |
| 1.2.2 Analyse empirique | 29 |
| 1.3. ETAT DES LIEUX | 32 |
| 1.3.1 AGRICULTURE | 32 |
| 1.3.2 PÊCHE | 37 |
| 1.3.3 HYDROELECTRICITE | 45 |
| 1.3.4 COUVERT VEGETAL | 48 |
| CHAPITRE 2 : APPROCHE THEORIQUE DU PROBLEME ET CADRE THEORIQUE DE L'ETUDE | 51 |
| 2.1. QUESTIONS ET OBJECTIFS SPECIFIQUES | 51 |
| 2.2. HYPOTHESES | 52 |
| 2.3. CADRE OPERATOIRE | 52 |
| 2.3.1 ENSEMENCEMENT DES NUAGES ET INNOVATION TECHNOLOGIQUE | 52 |
| 2.3.2 APPROCHE DES THEORIES DEVELOPPEES SUR LES EFFETS DE L'ENSEMENCEMENT | 66 |
| 2.3.3 VARIABLES ET INDICATEURS | 69 |
| 2.4 METHODOLOGIE | 75 |
| 2.4.1. ECHANTILLONNAGE | 75 |
| 2.4.2. METHODE D'ANALYSE : CHANGEMENT DE PRODUCTIVITE | 87 |
| 2.4.3. CHOIX DES SPECULATIONS | 88 |
| 2.4.4. ANALYSE CONCEPTUELLE DES DONNEES | 88 |
| DEUXIEME PARTIE : PRESENTATIONS DES RESULTATS ET ANALYSES | 92 |
| CHAPITRE 3 : ANALYSE ECONOMETRIQUE ET PRESENTATION DES RESULTATS..... | 93 |
| 3.1. AGRICULTURE | 93 |
| 3.1.1 Maïs | 93 |
| 3.1.2 Mil | 99 |
| 3.1.3 Sorgho | 103 |
| 3.2. PECHE | 109 |
| 3.3 HYDROELECTRICITE | 119 |
| 3.4 COUVERT VEGETAL | 125 |

| | |
|--|-----|
| CHAPITRE 4 : ET INTERPRETATION DES RESULTATS ET ANALYSE ECONOMIQUE, FINANCIERE ET SOCIALE..... | 135 |
| 4.1 Interprétation des résultats pour l'agriculture | 135 |
| 4.1.1 Maïs | 135 |
| 4.1.2 Mil | 136 |
| 4.1.3 Sorgho | 136 |
| 4.1.4 Analyse des résultats..... | 138 |
| 4.1.5 Contraintes liées à l'analyse..... | 139 |
| 4.2 Interprétation des résultats pour la pêche..... | 141 |
| 4.3 Interprétation des résultats pour l'hydroélectricité..... | 143 |
| 4.4. Interprétation des résultats pour le couvert végétal..... | 146 |
| 4.5 Autres types de contraintes..... | 149 |
| 4.6 ESTIMATION DE LA RENTABILITE ECONOMIQUE ET FINANCIERE DU PROGRAMME .. | 149 |
| 4.6.1 Analyse économique | 149 |
| 4.6.2 Analyse Bénéfices/Coûts | 158 |
| 4.6.3 Analyse des points connexes sur la rentabilité | 160 |
| CONCLUSION GENERALE..... | 166 |
| BIBLIOGRAPHIE | 171 |
| ANNEXES..... | 177 |

LISTE DES TABLEAUX

| | |
|---|-----|
| Tableau 1 : Evolution de la pluviométrie comparée et estimée en fonction du Trend..... | 31 |
| Tableau 2 : Revenus nets mensuels par tête des acteurs de la filière..... | 39 |
| Tableau 3 : Contribution du secteur pêche à l'économie nationale en Afrique de l'Ouest | 39 |
| Tableau 4: Estimation pour le test d'effets individuels ($\ln_{y_{it}}$ = variable dépendante) | 95 |
| Tableau 5 : Test de Hausman pour le maïs | 97 |
| Tableau 6 : Estimation par la méthode des effets fixes ($\ln_{y_{it}}$ = variable dépendante)..... | 98 |
| Tableau 7 : De 1993 à 1997 Test de White (Hétéroscédasticité)..... | 99 |
| Tableau 8 : De 1998 à 2002 Test de White (Hétéroscédasticité)..... | 99 |
| Tableau 9 : Estimation robuste de la seconde sous période (1998-2002)..... | 99 |
| Tableau 10 : Estimation pour le test d'effets individuels (y_{it} = variable dépendante)..... | 100 |
| Tableau 11 : Test de Hausman pour le mil..... | 101 |
| Tableau 12 : Résultats d'estimation (y_{it} = variable dépendante)..... | 102 |
| Tableau 13 : De 1993 à 1997 Test de White (Hétéroscédasticité)..... | 103 |
| Tableau 14 : De 1998 à 2002 Test de White (Hétéroscédasticité)..... | 103 |
| Tableau 15: Estimation pour le test d'effets individuels (y_{it} = variable dépendante) | 104 |
| Tableau 16 : Test de Hausman pour le sorgho..... | 105 |
| Tableau 17 : Résultats d'estimation (y_{it} = variable dépendante)..... | 106 |
| Tableau 18: De 1993 à 1997 Test de White (Hétéroscédasticité)..... | 106 |
| Tableau 19 : De 1998 à 2002 Test de White (Hétéroscédasticité)..... | 107 |
| Tableau 20 : Test de racine unitaire de Dickey-Fuller Augmenté | 112 |
| Tableau 21: Test de racine unitaire de Phillips-Perron | 113 |
| Tableau 22 : Test de racine unitaire KPSS | 114 |
| Tableau 23 : Résultats d'estimation | 115 |
| Tableau 24 : Test de l'autocorrélation à l'ordre 2..... | 116 |
| Tableau 25 : Test de l'autocorrélation à l'ordre 3..... | 116 |
| Tableau 26: Test de White (Hétéroscédasticité)..... | 117 |
| Tableau 27 : White Heteroskedasticity-Consistent Standard Errors & Covariance..... | 118 |
| Tableau 28 : Test de racine unitaire de Dickey-Fuller Augmenté | 120 |
| Tableau 29: Test de racine unitaire de Phillips-Perron | 121 |
| Tableau 30 : Test de racine unitaire KPSS | 121 |
| Tableau 31 : Résultats d'estimation : Variable dépendante Ln Et..... | 122 |
| Tableau 32 : Résultats d'estimation : Variable dépendante Ln Et* | 124 |
| Tableau 33 : Test de White (Hétéroscédasticité)..... | 124 |
| Tableau 34 : Estimation pour le test d'effets individuels ($\ln_{v_{it}}$ = variable dépendante)..... | 126 |
| Tableau 35 : Test de Hausman pour le couvert végétal..... | 127 |
| Tableau 36 : Résultats d'estimation ($\ln_{v_{it}}$ = variable dépendante)..... | 128 |
| Tableau 37 : De 1993 à 1997 Test de White (Hétéroscédasticité)..... | 130 |
| Tableau 38 : De 1998 à 2002 Test de White (Hétéroscédasticité)..... | 130 |
| Tableau 39 : Estimation robuste de la première sous période (1993-1997) | 131 |
| Tableau 40 : Test d'autocorrélation par le Wald (Wooldridge test for autocorrelation in panel data) | 132 |
| Tableau 41 : Test d'autocorrélation par le Wald (Wooldridge test for autocorrelation in panel data) | 132 |
| Tableau 42 : Récapitulatif des tests effectués | 133 |

| | |
|---|-----|
| Tableau 43 : Résultats d'estimation : Variable dépendante $\ln V_{it}$ | 133 |
| Tableau 44: Coût estimatif du fonctionnement du programme « Saaga » en millions de FCFA | 150 |
| Tableau 45: Estimation des gains obtenus dans la culture de maïs dans le Nakambé grâce à l'ensemencement..... | 151 |
| Tableau 46: Estimation des gains obtenus dans la culture de mil dans le Nakambé grâce à l'ensemencement..... | 152 |
| Tableau 47: Estimation des gains obtenus dans la culture de sorgho dans le Nakambé grâce à l'ensemencement..... | 152 |
| Tableau 48: Estimation des pertes enregistrées dans la pêche à Bagré imputable à l'ensemencement..... | 154 |
| Tableau 49: Estimation des gains obtenus d'un meilleur pâturage imputable à l'ensemencement..... | 156 |
| Tableau 50: Demande globale en eau pour les populations | 157 |
| Tableau 51: Analyse comparative bénéfices/coûts | 158 |
| Tableau 52 : Corrélogramme des résidus | 189 |

CODESRIA - BIBLIOTHEQUE

LISTE DES FIGURES

| | |
|---|-----|
| Figure 1 : Organigramme sur l'approche thématique construit par nous même..... | 25 |
| Figure 2 : Le Mali, localisation dans le continent africain et ses isohyètes | 28 |
| Figure 3 : Evolution de la pluviométrie à Ouagadougou de 1960 à 2003..... | 29 |
| Figure 4 : Estimation de l'évolution de la pluviométrie sans ensemencement des nuages.... | 30 |
| Figure 5 : cpue et production en fonction de l'effort de pêche | 43 |
| Figure 6 : Matrice d'adoption des innovations Environnementales..... | 64 |
| Figure 7 : Carte du Bassin Nakambé..... | 77 |
| Figure 8 : Carte Provinciale du Burkina Faso | 78 |
| Figure 9 : Carte de situation du barrage de Bagré..... | 79 |
| Figure 10 : Evolution des isohyètes par période décadaire jusqu'en 2000 | 177 |
| Figure 11 : Etat de l'évolution des isohyètes sur la période 2001-2009..... | 178 |
| Figure 12 : Générateurs au sol utilisés pour ensemercer | 179 |
| Figure 13 : Type d'avion utilisé pour l'ensemencement par voie aérienne | 179 |
| Figure 14 : Disposition des générateurs au sol autour de la zone cible | 180 |

INTRODUCTION

Situé au cœur de l'Afrique de l'Ouest, le Burkina Faso, pays en voie de développement, est un Etat continental faisant frontière à l'ouest et au nord avec le Mali, à l'est avec le Niger, au sud avec le Bénin, le Togo, le Ghana et la Côte d'Ivoire.

Selon les derniers travaux de l'Institut National de la Statistique et de la Démographie (INSD) effectués en 2006 à travers le recensement (RGPH, 2006), le Burkina Faso comptait à cette période une population de 13,730258 millions d'habitants pour une superficie de 274200Km², soit une densité moyenne de 50,08 hbts/Km². Cette densité cache d'énormes disparités de sorte que l'on enregistre des densités de 26 hbts/Km² dans le sahel et qui vont jusqu'à 620 hbts/Km² au centre du pays. Le pays connaît une très forte poussée démographique avec un taux de croissance annuelle de 3,3% (5,5% par an en zone rurale et 2% en zone urbaine).

La population se répartit à raison de 51,7% de femmes et 48,3% d'hommes avec près de 10% d'entre elle qui se concentre dans la capitale Ouagadougou. La plus grande partie est essentiellement rurale (80%) avec une composition pluriethnique composée en majorité de mossé qui représente 50% de la population. Les principales ethnies rencontrées sont les peulhs, les dioulas, les gourmantchés, les bissa les samo et les gourounsi. Sur le plan religieux on distingue trois grands groupes qui se présentent comme suit :

- l'animisme qui occupe la première place avec 50% de la population,
- l'islam 40% et,
- le christianisme avec 10%.

Selon les estimations faites en fonction du taux de croissance démographique, l'INSD) évalue en 2011 la population du pays à 15,73 millions d'habitants.

L'activité principale reste sans conteste l'agriculture qui contribue pour 40% à la formation du PIB. Les produits issus de cette activité sont les cultures vivrières composées principalement de mil, de maïs, de sorgho, de riz et les cultures de rente avec le coton et

dans de moindres mesures le sésame. A côté de l'agriculture, on retrouve l'élevage qui constitue une importante source de devises, mais également le secteur minier qui a pris de l'ampleur ces dernières années au point de concurrencer avec l'agriculture en termes d'exportation.

L'alphabétisation croît de plus en plus, et elle atteint 28,3% de la population de plus de 15ans (INSD, 2008) en 2007 contre 23,6% en 2003, soit une amélioration d'environ 5 points. Mais ce taux cache des disparités au niveau du genre et de la position géographique. En effet, on note 36,7% d'hommes alphabétisés contre 21% de femmes, tandis que pour le milieu géographique, il ya près de 63% d'alphabétisés en milieu urbain contre 19,2% en milieu rural.

Sur le plan sanitaire, bien qu'ayant connu une amélioration, les principaux indicateurs restent relativement peu satisfaisants. En effet, on est passé de 107‰ pour le taux de mortalité infantile et 5,66‰ pour la mortalité maternelle en 1996 à des taux respectifs de 81‰ et 4,4‰ (INSD, Santé Annuaire 2006). Les principales causes de morbidité et de mortalité sont le paludisme, les maladies à potentiel épidémique (méningite, choléra, fièvre jaune, rougeole etc.), la malnutrition, les infections sexuellement transmissibles, le VIH/SIDA et la tuberculose. Mais, il faut noter que des motifs de satisfaction existent face à certaines maladies transmissibles qui sont maîtrisées. Il s'agit entre autre du vers de Guinée, de la schistosomiase, de la lèpre et de la filariose lymphatique. Toutes ces avancées ont permis une amélioration de l'espérance de vie qui est passée de 48,5 ans en 1985 à 56,7 ans en 2006 (INSD, 2008).

Concernant le volet climatologie, avec les changements climatiques, la vulnérabilité du Burkina Faso est perceptible dans les prévisions de glissement du gradient des pluies de 15 à 30% vers le Sud du pays (baisse des isohyètes), soit une perte de 100 mm à l'horizon 2025-2050, ainsi que dans l'accroissement prévisionnel de la température de 2 à 4°C à ce même horizon. Cette situation est préjudiciable énergétiquement car le pays dépend, pour sa production d'électricité d'origine thermique et sa consommation domestique de sources ligneuses déjà rares dans un contexte sahélien.

A noter que l'électricité d'origine thermique et la consommation de ligneux constituent 84% de l'énergie totale consommée. Les produits pétroliers importés représentent quant à eux 10% de cette consommation totale.

L'hydroélectricité quant à elle, représente 6% de la consommation totale et est générée à partir d'une ressource en eau particulièrement vulnérable aux changements climatiques. Le degré d'accroissement de la dépendance énergétique est de 120 à 130% ces dix dernières années. (WHETE, 2009).

C'est pourquoi, la rareté de l'eau met en grande difficulté certaines économies car, à l'instar des autres pays sahéliens d'Afrique, le Burkina Faso a une économie basée en grande partie sur l'agriculture et l'élevage.

Dans le monde, plus de trois milliards de personnes résident dans les zones rurales des pays en développement, la majorité d'entre elles vivent avec moins de 2 dollars US par jour (FIDA, 2008). Ce sont les populations rurales pauvres qui sont le plus vulnérables aux effets du changement climatique. Nombreuses sont les personnes qui vivent sur des terres écologiquement fragiles et subsistent grâce à l'agriculture, l'élevage, la pêche et la foresterie.

En effet, ces changements climatiques, notamment les sécheresses, perturbent énormément les économies des pays en voie de développement et même ceux qui sont sur une phase plus avancée telle que l'Afrique du Sud. L'analyse des approvisionnements en eau, en nourriture et la croissance économique dans ce pays, montrent une étroite corrélation avec la variabilité du climat. Ainsi, de 1980 à 1999, le lien a été établi entre le niveau de pluviométrie estivale et le niveau du PIB sur la base de modèles statistiques (JURY, 2001).

Les problèmes d'eau depuis cette époque ont accentué les discussions sur les différents moyens de remédier à ce problème. La technologie d'augmentation des précipitations par ensemencement des nuages, qui faisait bien avant l'objet de discussions et d'essais ponctuels dans les années 1960 pour plusieurs pays, s'est vue confortée comme alternative probable.

Bien que certains objectifs économiques puissent être atteints, cela ne doit pas constituer une justification pour lancer d'emblée un tel programme (DENNIS, 1980). Mais, une telle décision peut s'effectuer sur la base de l'analyse comparative de l'ensemble des coûts et des bénéfices obtenus, ce qui peut être réalisé dans certaines conditions pour le Burkina Faso.

L'adaptation planifiée et anticipatoire peut réduire la vulnérabilité et permettre de réaliser des opportunités associées aux changements climatiques. Lorsqu'elle est facilitée par des autorités gouvernementales, elle constitue une part importante de la réponse de la société aux changements climatiques. C'est pourquoi, la mise en œuvre de politiques, de programmes et de mesures d'adaptation a généralement des bénéfices immédiats et futurs (QUIRION et al. 2005)¹.

Selon l'Organisation Météorologique Mondiale (OMM), plus de 40 pays, dont l'Australie, la Chine, les États-Unis, l'Inde et la Russie mènent des projets d'ensemencement des nuages. Dans la zone ACP, l'Afrique du Sud est leader dans ce domaine, avec également le Maroc et le Zimbabwe qui ont utilisé régulièrement cette technique pour suppléer au manque d'eau pour l'agriculture. Le Burkina Faso puis le Sénégal et le Mali s'y sont mis plus récemment. À premières vues, l'ensemencement des nuages a de nets bénéfices. Selon cette même organisation, des analyses montrent qu'il y a des retombées économiques significatives. Mais pour le Mali et le Sénégal, l'impact est toujours faible car ce sont ces dernières années que ces pays ont recouru à cette technique (5ans au maximum) et avec une maîtrise technologique moindre.

Illustration est faite avec la Chine qui est un pays phare qui recourait beaucoup à cette technologie. Les conditions désertiques de ce pays l'exposent à des sécheresses récurrentes et sévères qui sévissent fortement à l'intérieur du pays. Plusieurs programmes y ont été successivement menés. A titre d'illustration, Gao Z. et al. (WMP, 1999) étudient les effets d'un tel programme sur trente six (36) ans au niveau de la rivière de Baying qui constitue la première source de la région. Ce programme fut financé par la Clamayi Oil Field qui est la plus grande compagnie pétrolière en Chine. Un découpage de la période s'est fait en deux :

¹Atelier sur le changement climatique et conséquences sur l'agriculture en Afrique, projet réalisé par l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées (France).

la première allant de 1962 à 1983 sans intervention du programme et la seconde allant de 1984 à 1995 avec le programme. Pour cette dernière période de douze années d'ensemencement, les résultats obtenus furent impressionnants. Les flux annuels moyens observés au niveau de la rivière sur les deux périodes furent respectivement de 120,3 et 142,9 millions de mètres cubes, soit un accroissement de 18,7%. Après différents tests statistiques, une estimation de cet accroissement a été revue à la baisse avec un écoulement moyen annuel de 13,6 millions de mètres cube soit un taux de 11,6% avec une certitude de 90%. Ce résultat obtenu fut satisfaisant pour les autorités au regard des retombées économiques, notamment la possibilité pour la compagnie pétrolière de continuer à mener ses activités.

C'est pour de telles raisons que les autorités burkinabè ont opté pour la provocation de pluies artificielles par ensemencement des nuages.

De manière générale, le terme ensemencement signifie l'introduction de micro-organismes dans un milieu avec pour but leur développement et l'atteinte des résultats escomptés. Très utilisé en agriculture, on assimile ce terme dans ce contexte à l'introduction d'une semence dans une terre. En pisciculture, on parle d'un peuplement ou repeuplement d'une étendue d'eau par l'introduction d'alevins.

L'ensemencement des nuages est défini comme une stratégie d'adaptation aux changements climatiques et plus précisément de la désertification. Quant on fait allusion à cette technologie, il s'agit de l'introduction de particules dans une catégorie de nuages et ce, à l'aide de moyens aériens ou de moyens terrestres. Ces moyens aériens sont des avions spécialement aménagés et comportant sur leurs ailes des cartouches contenant les particules à ensemercer. Ces fusées sont projetées dans les nuages ciblés pour accélérer le processus de formation d'eau de pluie. Lorsqu'il s'agit des générateurs au sol, les particules à ensemercer sont envoyées du sol vers ces nuages grâce à un système de propulsion suffisamment puissant (fusées) permettant à aux particules d'atteindre leurs cibles (annexe, figure 10). Au total, on dénombre 26 générateurs au sol disposés autour du bassin du Nakambé tels que présentés en annexe à la figure 12.

Les nuages qui constituent la cible de l'ensemencement sont sélectionnés suivant des critères. Il s'agit :

- des nuages cumuliformes chauds qui sont des nuages dont la température au sommet est supérieure à 0°C (nuages des zones tropicales). Il s'agit généralement de cumulus ou de cumulonimbus en phase de développement initial ;
- des nuages froids qui sont caractérisés par une température à la base inférieure à 0°C (nuages des zones tempérées ou polaires) ;
- des nuages mixtes dont la base est à une température positive et le sommet a une température négative (nuages en état de surfusion). Il s'agit de cumulus ou de Cumulonimbus très développés ou d'une épaisse nappe de Stratocumulus.

A l'origine, la production artificielle de pluie a débuté en 1946 grâce aux travaux des chercheurs américains Vincent Schaefer et Bernard Vonnegut, lors d'études séparées. Le premier a mis en place une technique favorisant la formation de neige sous le nuage, laquelle se transforme ensuite en pluie. Le second met au point une technique d'ensemencement des nuages à l'aide d'iodure d'argent. Depuis cette période, la science et les techniques d'ensemencement des nuages ont considérablement progressé. A ce jour, des recherches et des expériences utilisant les technologies les plus avancées sont conduites à travers le monde entier sur cette activité.

Au plan national, la technique utilisée emploie des vecteurs de diffusion tels des avions appropriés, au nombre de trois, présentés en annexe (figure 11) ou des générateurs au sol (figure 10). Ces vecteurs servent à asperger les nuages de particules chimiques à base d'iodure d'argent pour favoriser la condensation de vapeur d'eau autour d'elles et provoquer leur chute sous forme de gouttes de pluie. Jadis assez fréquentes, les « pluies avortées » peuvent être évitées grâce à ce processus qui permet de profiter de la présence des nuages de pluies. Il faut noter qu'aussi bien les générateurs au sol que les avions sont à plusieurs reprises chaque campagne hivernale. En effet, c'est en hivernage entre mai et octobre que les opérations d'ensemencement s'effectuent. Durant cette période, à chaque mois ces deux types de vecteurs sont utilisés. C'est pourquoi, ne disposant pas du nombre de sorties effectués par les avions ou du nombre d'utilisation mensuels des générateurs, on

considèrera cette variable comme binaire pour laquelle le chiffre 1 signifierait que les vecteurs ont été utilisés et le chiffre 0 celui ou aucun vecteur n'a été utilisé.

Au Burkina Faso, cette activité s'effectue à travers une structure dénommée « Programme "Saaga" ». « Saaga » signifie pluie en langue locale « mooré ». Ce programme avait donc pour but de favoriser l'amélioration de la pluviométrie. Cette structure a connu trois phases dans son évolution qui se présente comme suit :

- d'abord en 1998, la première phase a pris le nom « Opération "Saaga" ». Elle a consisté, juste pour l'année en question, à effectuer des opérations d'ensemencement dans le bassin du Nakambé en vue d'y améliorer la pluviométrie ;
- la deuxième phase a marqué un changement, car du stade d'opération en 1998, l'activité est passée en 1999 au stade d'expérimentation pour une durée de cinq années et ce, sous le nom de « Programme "Saaga" » ;
- enfin, la troisième phase en 2004, est celle qui a vu l'engagement des autorités à pérenniser le programme.

La décision des autorités de s'engager dans le long terme se justifie par certaines évaluations qui ont montré un impact positif de cette pratique. A cet effet, nous pouvons citer le rapport du programme APENS (2003) qui cite le programme "Saaga" avec exemple à l'appui, comme référence sur le plan Régional. En outre, les relevés pluviométriques du service national de la météorologie témoignent d'une amélioration de la situation depuis l'application de la technique d'ensemencement des nuages.

La première étape qui fut celle de l'opération en 1998, a donné des résultats très satisfaisants même de l'avis des responsables Burkinabè. En effet, les objectifs qui lui avaient été assignés ont été pleinement atteints. Il s'agit entre autre :

- du remplissage des principaux barrages : Bagré 98,5% de sa capacité (1700 millions de m³) qui est sa cote d'alerte, Loumbila 100% de sa capacité (36 millions de m³), Kompienga 64,9% de sa capacité (2050 millions de m³) ce qui fut jusqu'à cette époque un niveau record jamais enregistré ;
- l'amélioration de la pluviométrie des zones chroniquement déficitaires ;

- et le transfert de savoir faire en matière de modification artificielle du temps en faveur du Burkina Faso.

C'est ce qui a motivé les autorités à s'investir davantage pour une telle méthode, d'où la pérennisation du programme.

A cela, nous pouvons ajouter le mémoire du Diplôme d'Etudes Approfondies (DEA, 2005) de Ouiminga dans lequel a été analysé l'Impact Hydrologique du Programme "Saaga" dans le barrage de Bagré. Nos recherches nous ont permis de constater une amélioration significative (9%) des ressources en eau de la région imputable à l'action du programme.

Cette étude sera structurée en plusieurs grands points présentant tour à tour les différents aspects socioéconomiques.

Dans un premier temps, une présentation du contexte sera faite pour caractériser l'environnement social et économique dans lequel l'étude sera effectuée. Cette section pose le problème majeur de l'étude et fait état des travaux déjà réalisés ayant trait aux différentes thématiques développées.

La deuxième section présente les modèles théoriques et les outils qui seront utilisés pour l'analyse empirique.

La méthodologie sera abordée à la suite à travers l'échantillonnage et la méthode d'analyse utilisée. A la suite de la méthodologie interviendra l'analyse empirique des résultats obtenus à partir des estimations économétriques et des différents tests pour renforcer la validité des résultats. C'est cette section qui permettra d'apporter des éléments de réponse aux hypothèses posées.

A l'issue de ces différentes sections développées, la conclusion résumera l'ensemble des travaux réalisés et la fin du document sera marquée par des recommandations sur la présence d'un tel programme au Burkina Faso.

**PREMIERE PARTIE : CONTEXTE ET APPROCHE DU
PROBLEME**

CHAPITRE 1 : CONTEXTE DE L'ETUDE

Ce chapitre de notre étude vise à mettre en exergue les différents éléments de l'environnement socioéconomique qui ont motivé cette recherche et comment ces aspects ont été abordés par d'autres travaux dans des conditions plus ou moins similaires à celles du Burkina Faso. En effet, en fonction de la nature du problème engendré par l'adaptation aux changements climatiques dans le cas du pays, nous aborderons successivement les raisons qui ont conduit à mener cette étude et les travaux qui ont porté sur les différents aspects du problème.

1.1. PROBLEMATIQUE

Le Burkina Faso, Etat enclavé, avec un climat rude, est confronté comme un grand nombre de pays à diverses difficultés qui sont des obstacles majeurs à son développement. L'économie essentiellement agropastorale, est tributaire des conditions climatiques souvent défavorables. En effet, la situation géographique du pays et son socle ne favorisent pas l'agriculture. Cette dernière reste le secteur le plus avide en eau, prélevant à elle seule environ 70% de l'eau consommée sur la planète (LUXORION, 2005) et cette situation est valable pour le Burkina Faso.

Le plateau central du pays très latéritique, n'est pas propice à une bonne rétention souterraine des eaux de pluies qui sont très inégalement réparties dans le temps et dans l'espace. De surcroît, la forte évaporation due à la chaleur entraîne des pertes importantes qui peuvent aller jusqu'à 70% en moyenne au niveau mondial (LUXORION, 2005) des ressources en eau à ciel ouvert. Au niveau national, l'évaporation moyenne est assez forte estimée à 3000 mm tandis que la recharge moyenne annuelle de la nappe souterraine est de 40 mm (INSD, 2008). Au Burkina Faso, les prélèvements d'eau pour l'agriculture en 2000 étaient évalués à 86,3% des prélèvements totaux (FAOSTAT, 2000)

En général, les réserves d'eau dans le pays ne sont pas disponibles là où les populations en ont le plus besoin. Les sources se situent globalement dans les régions du sud et sud ouest du pays alors que les plus grands consommateurs potentiels se trouvent au centre notamment dans la capitale qui est la région ayant la plus forte densité soit 477,1 hbts/Km² et 10% de la population (INSD, 2006) et comptant plus de 70% des industries (CCI-BF, 2007). C'est également là qu'on observe la plus grande déperdition d'eau, entre 40 et 60% de l'eau d'irrigation est perdue dans les fuites à travers les canalisations et par évaporation. En 2005, selon la revue scientifique Luxorion spécialisée dans le domaine de l'eau : « Le monde entier dispose en théorie de suffisamment de réservoirs d'eau douce pour satisfaire ses besoins mais c'est l'exploitation qui est difficile à réaliser ». En effet, l'exploitation nécessite des moyens de plus en plus considérables lorsqu'il s'agit d'aller vers des profondeurs plus importantes pour exploiter les réservoirs souterrains.

Une telle situation constitue un handicap au développement économique du pays. Cela s'illustre avec l'Afrique du Sud où le PIB en période de mauvaise pluviométrie correspond à 83% du PIB en cas de bonne pluviométrie (LINDESAY, 1990) soit un écart de 17%, tandis que l'amélioration de la pluviométrie de 10% contribue à accroître le niveau du PIB de 1%.

Pour remédier à de telles difficultés, plusieurs possibilités s'offrent. Une d'entre elles consiste à gérer la ressource de manière plus efficace. Il s'agit d'améliorer la gestion des ressources en eau en passant par le perfectionnement des techniques d'irrigation, le retraitement des eaux usées pour des secteurs qui ne nécessitent pas obligatoirement d'eau très potable. Une autre possibilité est l'amélioration des réseaux de distribution d'eau dans les grandes villes dont les pertes par fuite sont estimées entre 15 et 25% en Europe (LUXORION, 2005) et bien plus en Afrique.

Pour ce qui est d'assurer une meilleure gestion des ressources en eau, les études (GIZ, 2010) ont montré que l'eau potable est une ressource très précieuse dans beaucoup de pays en développement ainsi que dans les pays en transition. La situation du manque d'eau est aggravée par la croissance démographique. Cependant, les pertes sont souvent élevées (au moins 40% de l'eau potable distribuée) et causées par des insuffisances dans les

maintenances des infrastructures et des fuites au niveau des conduits. Les pics de pression dans les conduits contribuent à accroître les fuites permettant ainsi aux eaux d'égouts et à d'autres polluants d'infiltrer les canaux de distribution. En outre, les effets des changements climatiques contribuent davantage à la rareté de l'eau. C'est pourquoi beaucoup d'acteurs pensent qu'il est important de protéger la ressource et de l'utiliser de manière rationnelle et efficace. Et en ce sens, la réduction des pertes d'eau est un outil qui permettra une protection et gestion efficace de la ressource en eau.

Vouloir gérer l'eau pour résoudre le problème de l'insuffisance de la ressource est une alternative possible mais elle ne suffit pas quand on sait qu'elle est une ressource rare et vitale pour l'Homme (CNRS, 2006) avec une démographie toujours élevée de 3,1% au Burkina Faso (INSD, 2006). Le point sensible de cette chaîne bleue se trouve en amont à travers l'approvisionnement c'est-à-dire son renouvellement. C'est pourquoi malgré les différentes méthodes de gestion modernes, le renouvellement de la ressource est indispensable. Une possibilité pour améliorer le renouvellement de la ressource est l'utilisation de la technique d'ensemencement des nuages.

Cette technique consiste à introduire des particules chimiques dans les nuages afin de favoriser le déclenchement des précipitations (KEYES, 2006). Elle nécessite donc la présence de nuages et de conditions climatiques favorables pour son application. En l'absence de nuages, la technique n'est pas applicable. Elle ne constitue donc pas un procédé de création de pluie mais plutôt un outil qui favorise son déclenchement afin d'éviter les pluies avortées dont la fréquence est élevée dans les régions sahéliennes.

A l'instar de plusieurs pays développés tels que les Etats-Unis, l'Afrique du Sud ou encore la Chine, le Burkina Faso a fait l'option de l'ensemencement des nuages pour améliorer le renouvellement de cette ressource.

La situation présentée par les différents pays qui utilisent la technique de l'ensemencement des nuages varie suivant les zones et dépend du contexte climatique du pays en question. C'est pourquoi le Burkina Faso se trouve aujourd'hui à la croisée des chemins. La situation

qui se présente est celle de l'incertitude sur la rentabilité économique du programme compte tenu des moyens considérables investis pour un pays en voie de développement tel que le nôtre. Au regard des différents coûts importants que cela peut engendrer, et les bénéfices que l'on peut enregistrer, l'on se demande s'il est nécessaire de le maintenir comme alternative aux problèmes d'eau que nous rencontrons.

Il s'agit, à travers cette recherche, d'apprécier les bénéfices économiques du programme sur certains secteurs clés pour apporter des éléments de réponse à la question d'ensemble.

Le succès de la pratique de l'ensemencement des nuages au Burkina Faso dépend non seulement des aspects techniques à mettre en place mais également de l'approche socioéconomique du phénomène. C'est pourquoi SHIPPEY et al. (2004), expriment la nécessité d'instaurer un mécanisme d'information pour toutes les couches sociales sur les différentes activités et retombées économiques d'un tel programme. Cela, dans le but de lever les entraves sociales à la bonne marche du programme, car l'apport des communautés est nécessaire.

De manière synthétique, l'interrogation qui se pose aussi bien au niveau intellectuel qu'au niveau du monde rural est celle de l'efficacité de cette option et de la nécessité de la poursuivre.

Le principal but du programme, depuis sa mise en place, est d'accroître le niveau des précipitations et ce, à des fins économiques et accroître la disponibilité des ressources en eau pour les populations. A ce titre, l'intérêt est porté essentiellement sur l'agriculture qui représente la principale activité économique du pays et sur l'approvisionnement en eau potable. Mais, il faut noter que l'incidence des pluies provoquées en termes économiques, peut être appréciée de manière plus large à travers l'environnement qui est aussi intrinsèquement touché. Nous pourrions à cet effet recourir à la méthode du changement de productivité pour apprécier les variations de production sur les composantes naturelles que sont l'emploi des sols à des fins agricoles, l'utilisation de l'eau pour la pêche et l'hydroélectricité et du couvert végétal pour la population.

Une région qui enregistre une amélioration de sa pluviométrie sur plusieurs années peut observer des changements au niveau de son écosystème. C'est pourquoi l'on peut penser que suite à une amélioration de la pluviométrie, imputable à l'ensemencement des nuages, la végétation, la pêche, l'érosion des sols, la production hydroélectrique, pourraient également subir des modifications. La baisse de l'approvisionnement en eau affecte plusieurs domaines tels que les activités domestiques, industrielles, conduisant à des pertes de production conséquentes à travers les différents secteurs de l'économie (JURY, 2001).

Une pluviométrie suffisante et bien répartie dans le temps et dans l'espace est synonyme d'une bonne saison agricole. Mais, il n'est pas exclu que les pluies provoquées aient des conséquences négatives sur notre environnement à travers l'érosion qui peut être source de baisse de rendements en terme de production agricole. Déjà, selon le programme de nations unies pour l'environnement, environ 66 % du continent africain est classé désert ou terres arides et les pertes en sol et en éléments nutritifs y représentent chaque année 3 % du produit intérieur brut agricole. En effet, il est fort possible que suite à une pluviométrie supplémentaire, nous observions une érosion plus forte en nappe. Ce type d'érosion est dû au détachement des particules de terre causé par le choc des gouttes de pluies qui sont en plus grandes quantités, ou encore au ruissellement lorsque l'intensité devient supérieure à la vitesse de l'infiltration de l'eau dans le sol. C'est pourquoi, avec un supplément d'eau, on peut supposer qu'un tel phénomène aura certainement une incidence sur les rendements agricoles.

La pêche est un secteur très important pour l'économie burkinabè. En 2005, on dénombrait plus de 8500 pêcheurs professionnels, 4500 semi professionnels et environ 2000 occasionnels. Ses implications sont nombreuses ; car en plus des revenus qu'il génère pour les pêcheurs, il fait intervenir d'autres acteurs en amont (fabricants et vendeurs de filets, pirogues, etc.) et en aval (transformateurs). La production nationale s'élevait en 2009 à 12 500 tonnes alors que les besoins estimés à la même période étaient de 60 000 tonnes (DGRH, 2010). Les importations sont utilisées comme recours pour satisfaire la demande. En 2009, elles ont été de 40 000 tonnes ce qui traduit une demande totale insatisfaite.

Le secteur de la pêche, est à prendre en considération comme le présente le rapport 2006 de la FAO sur la contribution du secteur des pêches à l'économie nationale en Afrique de l'Ouest et du Centre. Ce rapport montre une corrélation positive entre la disponibilité du poisson et le niveau de l'IDH avec une situation critique pour le Burkina Faso où la disponibilité en poisson est de moins de 10 kg/hab./an et une contribution à la formation du PIB qui est passée de 0,35 en 1995 à 0,5% en 2005.

Le poisson est essentiel pour une alimentation variée et équilibrée des populations. Le plus grand avantage du poisson est qu'il est faible en calories et en graisse, alors qu'il apporte des protéines, vitamines, fer et minéraux. Il intervient en outre dans les stratégies d'autosuffisance alimentaire mises en place par la plupart des gouvernements des pays en voie de développement. Or, pour parvenir à l'autosuffisance alimentaire, qui revêt le double aspect quantitatif et qualitatif, il faut nécessairement non seulement intensifier mais aussi diversifier la production agricole au sens large du terme à travers la promotion et le développement de toutes les activités constituant le secteur primaire. En d'autres termes, il s'agit de toucher les secteurs qui ont un impact direct sur l'alimentation des populations ; ce sont entre autres la production agricole, l'élevage, la chasse etc. Un tel impératif requiert de prendre en considération la pêche même si jusqu'à une époque récente les potentialités étaient insignifiantes.

En effet, en période de soudure ou dans le but d'accroître et de diversifier les sources de revenus, la population rurale qui représente 82% de la population totale (MIDA, 2005) recourt à la pêche ; ce qui constitue pour elle un moyen de pallier les insuffisances alimentaires. De meilleures réserves en eau au niveau des barrages pourraient se révéler comme un avantage pour la reproduction piscicole et par conséquent pour les prises au niveau des pêcheurs.

Quant à la production hydroélectrique, son accroissement permet non seulement de réduire la pollution atmosphérique, mais aussi les coûts d'importation d'énergie pour répondre à la demande. Cette demande croît sans cesse avec l'accroissement de la population et surtout elle se fait de plus en plus pressante dans les provinces avec le processus de décentralisation

(universités, industries minières...). Ce type de production compte comme facteur principal de production, l'eau.

Pour ce qui se rapporte à la végétation, BOUDET affirme en 1980 que la rareté de l'herbe et le dépérissement des ligneux sont des conséquences immédiates de la sécheresse au sahel. Il en résulte une pénurie alimentaire sans précédent entraînant un exode massif et désordonné des populations et la disparition du cheptel. Cela peut malheureusement entraîner la mort des personnes les plus fragiles (enfants et vieillards). Par contre, la végétation peut connaître une régénérescence grâce à une amélioration des ressources en eau. En outre, cela mettra à disposition des éleveurs un pâturage plus étendu et fourni, permettra d'améliorer les rendements agricoles, de développer le niveau de l'irrigation et de résoudre un des problèmes récurrents du conflit entre éleveurs et agriculteurs. En effet, ce sont les objectifs qui étaient recherchés au Texas dans le programme d'ensemencement des nuages (PGCD, 2004). Une évaluation partielle de ce programme a montré un succès dans l'utilisation de cette technique pour résoudre les problèmes économiques liés à la rareté de l'eau. En un mot, il peut contribuer à améliorer les conditions de vie de la population (relations sociales).

Le problème général de cette recherche repose sur l'incertitude de la capacité des pluies provoquées par ensemencement des nuages à résoudre les différents problèmes économiques liés au manque d'eau dans la région du Nakambé. C'est pourquoi nous voulons tenter d'apporter des réponses sur les éventuelles retombées économiques pour le Nakambé.

Cette région est appropriée, car elle a longtemps bénéficié de l'application du « Programme Saaga » et parce qu'elle renferme plusieurs caractéristiques économiques adéquates à étudier (barrage hydroélectrique, grande zone de culture, zone de pêche). Cela nous permet de poser la question générale du problème de la sorte : quels sont les retombées économiques de la pratique de l'ensemencement des nuages dans la région du Nakambé ?

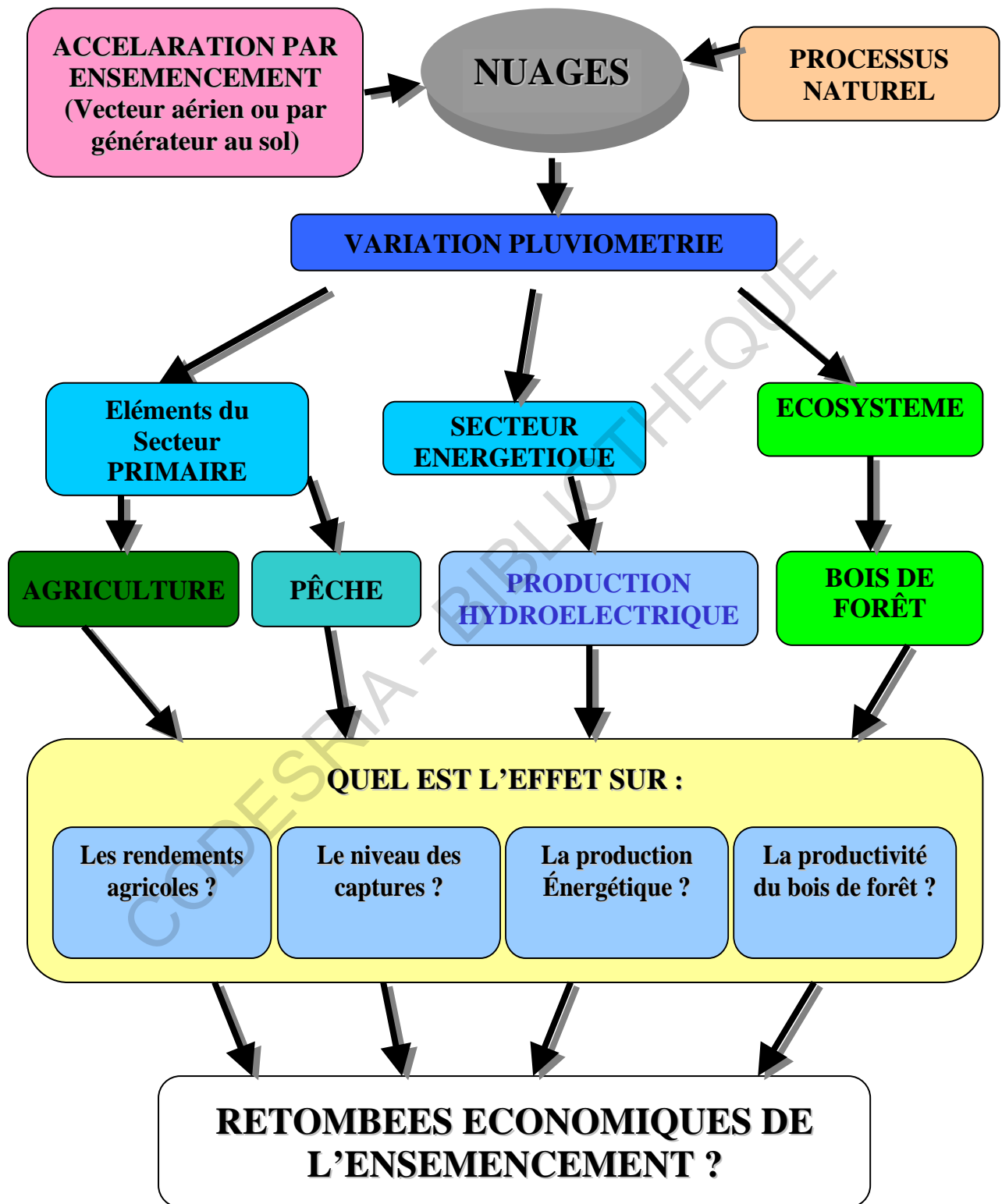
Nous pourrions aborder l'étude de ce problème par une approche en plusieurs points spécifiques. Ainsi, on tentera d'appréhender :

- les niveaux d'évolution des rendements des cultures céréalières (mil, maïs et sorgho) en fonction de la pluviométrie ;
- les pertes des produits de la pêche ;
- la variation du volume d'eau (niveau de remplissage du barrage) sur la production hydroélectrique ;
- l'évolution de la productivité du bois dans la zone.
- une plus grande disponibilité d'eau potable

De manière schématique on peut avoir l'organigramme suivant :

CODESRIA - BIBLIOTHEQUE

Figure 1 : Organigramme sur l'approche thématique construit par nous même



1.2 JUSTIFICATION DE L'EFFET PROGRAMME

1.2.1 Analyse cartographique

Dans sa structure géographique, le pays est sahélien et a un relief plat (moins de 750 m de hauteur). Le Burkina Faso se situe à la limite du désert et comme un grand nombre de pays présentement, fait face à une situation d'insuffisance des ressources en eau. Selon le Programme des Nations Unies pour l'environnement, les deux tiers de la population seront confrontés à une pénurie d'eau d'ici 2025. Les sécheresses des années 1960 et 1970 n'ont fait qu'accentuer le problème qui était déjà important. En effet, depuis les années 1930, on assiste à une baisse du niveau des isohyètes pour les pays d'Afrique de l'Ouest et particulièrement pour le Burkina Faso ; ce qui est accompagnée par une baisse de la pluviométrie.

De fait, comme l'atteste le niveau des isohyètes représentées sur la carte (figure 7, page 77), on note une nette migration vers le bas. En considérant les isohyètes 600 et 900 mm pendant la période 1931-1960, on constate que leur position moyenne s'est fortement déplacée vers le sud de 100 à 150 Km (Météorologie Nationale, 2006) durant la période 1961-1990.

Ce fait s'est aggravé dans le temps comme cela est visible avec les isohyètes 1971-2000. La baisse de latitude de ces dernières a été de telle sorte que la ligne des 900mm n'étaient plus très loin de Bobo Dioulasso.

Jadis aux environs de Ouagadougou, les isohyètes 900 mm se sont retrouvées juste au nord de Bobo Dioulasso et celles de 600mm aux environs de Dori. Par la suite, les isohyètes de 600mm ont migré au niveau de Bogandé (200km au sud), et celles de 900 mm apparaissent beaucoup plus au sud aux environs de la ville de Pô. Cela traduit une migration nette des isohyètes vers le sud, témoignant d'un changement tendant à la baisse du régime pluviométrique depuis les années 1930 jusqu'à la fin des années 1990 sur tout le territoire national.

Une telle situation est caractérisée par une baisse de pluviométrie, et cela favorise l'avancée du désert ainsi que d'autres problèmes liés à la pénurie d'eau tels :

- la baisse des rendements agricoles ;
- les besoins en eau de boisson aussi bien pour l'homme que le bétail ;
- la pêche et bien d'autres activités économiques tributaires de ressources en eau suffisantes.

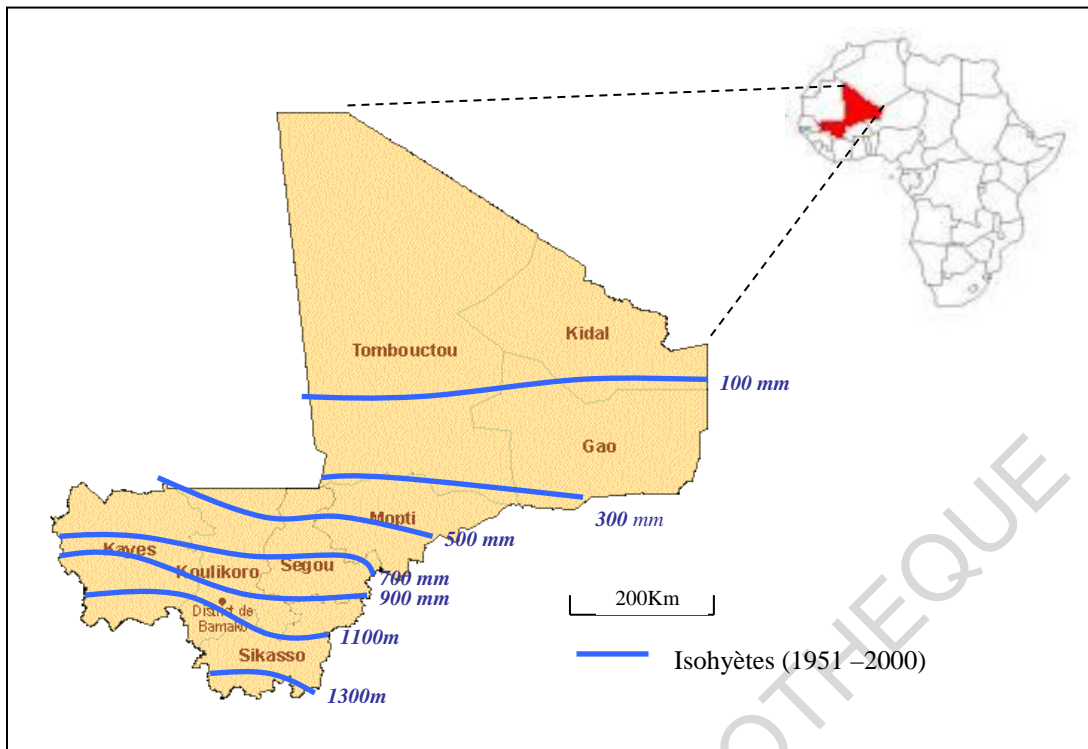
Nous pouvons tenter d'observer brièvement sur la figure 9 quelles sont les tendances depuis le début des années 2000 jusqu'en 2009.

Lorsqu'on observe la situation de 2001 à 2009 les niveaux évoluent significativement : on constate une remontée nette du niveau des isohyètes. Cette situation est quelque peu générale pour tout le pays en comparant les deux cartes.

On observe qu'une localité comme Ouagadougou se trouve dans une zone où la pluviométrie moyenne enregistrée est comprise entre 700mm et 900mm alors qu'auparavant sa pluviométrie était voisine de 600 à 700mm. Cette remontée est synonyme d'une amélioration de la pluviométrie. Il en est de même pour la ville de Manga (légèrement au nord de la ville de Po) qui à la fin des années 1990 recevait une pluviométrie inférieure à 900 mm et de 2001 à 2009 on voit que l'isohyète 900 passe par cette ville. Cela traduit l'amélioration de la pluviométrie pour cette ville.

Toutefois, on peut penser que cet effet est géographiquement isolé et propre au Burkina Faso dans le cas de la sous région. En effet, cela s'explique en observant cette carte des isohyètes du Mali. On constate bien la présence des isohyètes du niveau 1300 mm sur la période 1951-2000. Cette situation a connu des évolutions avec un déplacement des isohyètes vers le sud sur environ 200 km entre la période 1951/1970 et 1971/2000. Cette carte (figure 2) traduit la pluviométrie moyenne observée sur les cinquante années (1950 à 2000).

Figure 2 : Le Mali, localisation dans le continent africain et ses isohyètes



Mais depuis le début des années 2000, la situation s'est davantage dégradée pour le Mali. C'est pourquoi, selon les autorités maliennes en 2009 (Direction Nationale de la Météorologie), l'isohyète 1200 mm n'existe plus sur la carte du Mali. Cette disparition atteste que le régime pluviométrique du Mali est très affecté par la variabilité et les changements climatiques (MEA, 2009) qui se traduit par une baisse des eaux de pluie.

Cela se traduit, pour ce pays voisin du Burkina Faso, par un régime pluviométrique qui stagne conformément aux prévisions du GIEC pour la zone. Dans la pratique, le Burkina Faso tendait à suivre les prévisions du GIEC pour la zone mais depuis le début des années 2000, le pays présente un changement de régime que l'on peut supposer dû à l'utilisation de l'ensemencement des nuages depuis la fin des années 1990 jusqu'à ce jour.

Cette idée est renforcée avec les conclusions des études du CILSS(2009) selon lesquelles pour la partie Est du Sahel (Niger, Tchad), il y a une remontée vers le nord des isohyètes de la période 1994 – 2006 par rapport à celles de la période 1970 – 1993, alors qu'elles restent confondues pour la partie Ouest (Burkina Faso, Mali). Cela montre qu'en général, pour la zone des pays d'Afrique de l'Ouest, le régime pluviométrique a stagné.

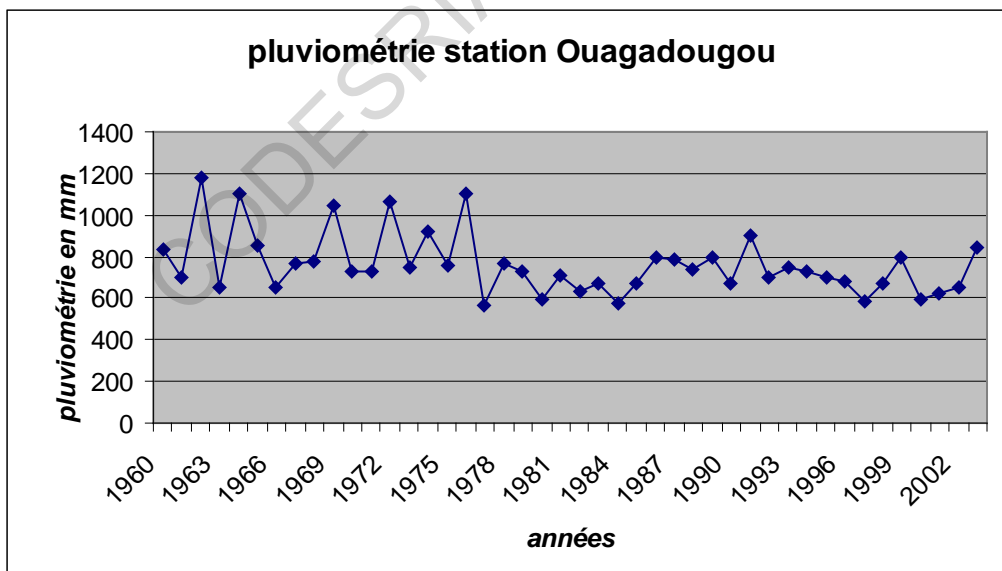
Mais, comme on peut le constater de manière concrète pour le Burkina Faso, il y a une remontée des isohyètes, attestant que cela peut être expliqué par un effet intrinsèque au pays qui le fait différer des autres. Ce fait est par hypothèse dû à l'ensemencement effectué depuis plus d'une dizaine d'année dans le cadre d'une politique de mobilisation des ressources en eau pour faire face au changement du régime pluviométrique.

1.2.2 Analyse empirique

La prise en compte de la pluviométrie est essentielle dans l'appréciation de l'impact de l'intervention du programme. En effet, en fonction de son évolution sur la période 1998 à 2003 par rapport aux années antérieures, on peut tirer certains renseignements sur l'effet du programme «Saaga». Une différence significative entre la tendance imputée pour les années précédentes (1992 à 1997) et les valeurs effectivement observées de 1998 à 2003 peut donner une idée de l'ampleur de l'évolution du régime pluviométrique dans la région cible.

L'analyse de la pluviométrie dans la ville de Ouagadougou donne un aperçu sur son évolution à la baisse depuis plus de cinquante ans. Le graphique suivant en est la preuve.

Figure 3 : Evolution de la pluviométrie à Ouagadougou de 1960 à 2003.

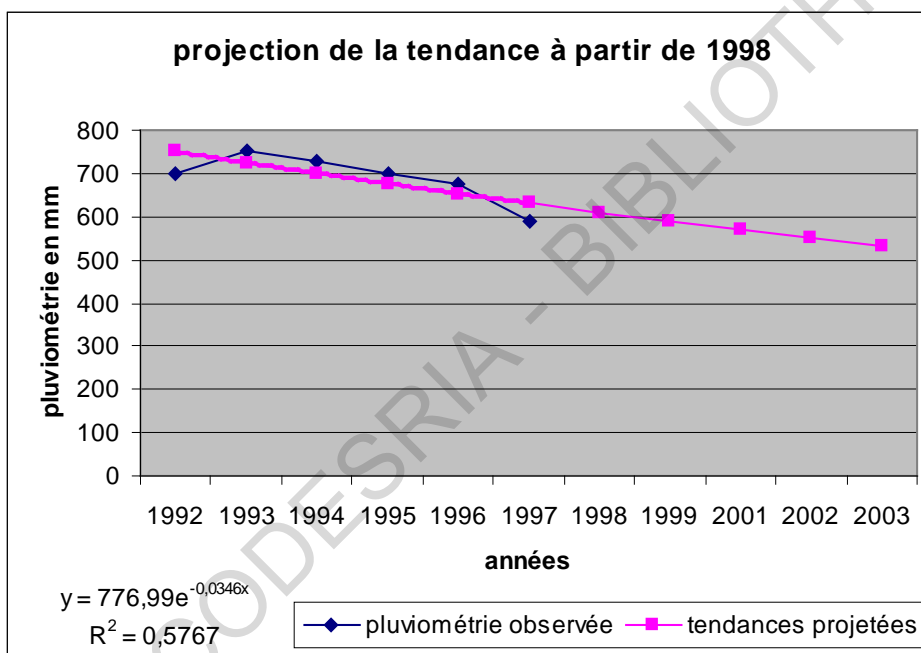


La première observation que l'on peut faire de ce graphique est qu'entre 1960 et 1976 on a eu des saisons où on a souvent enregistré plus de 1000 mm de pluie. En effet, comme le montre le

graphique, plusieurs saisons se sont soldées par une pluviométrie dépassant le seuil des 1000 mm avec également des minima dépassant la barre des 600 mm. A partir de 1977, et jusqu'en 1997, les hauteurs d'eau enregistrées sont assez faibles avec la majeure partie des saisons recevant moins de 800 mm d'eau et des minima n'atteignant pas les 600 mm. En effet, cela est observable pour les années 1977, 1980, 1984 et 1997 ce qui témoigne d'un changement net du régime des saisons.

A partir de la pluviométrie enregistrée de 1992 à 1997 (6 années), faisons une projection afin d'apprécier les tendances qu'on aurait obtenues de 1998 à 2003 sans l'intervention du programme. On obtient la courbe suivante :

Figure 4 : Estimation de l'évolution de la pluviométrie sans ensemencement des nuages



Avec X désignant les années.

Cette tendance est obtenue par ajustement exponentielle avec un coefficient de détermination de 0,576. Elle permet d'avoir une estimation de la pluviométrie s'il n'y avait pas eu d'ensemencement des nuages à partir de 1998.

On peut ainsi récapituler ces valeurs estimées avec celles effectivement obtenues après ensemencement des nuages. On obtient le tableau suivant :

Tableau 1 : Evolution de la pluviométrie comparée et estimée en fonction du Trend

| Années | 1998 | 1999 | 2000 | 2001 | 2002 | 2003 |
|--------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Trend | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
| PI estimée | 609,9 | 589,1 | 569,1 | 549,7 | 531,1 | 512,9 |
| PI estimée + marge d'erreur 5% | 641 | 619 | 599 | 578 | 558 | 539 |
| PI observée | 668,3 | 800,2 | 594,1 | 618,7 | 656,2 | 847,7 |

Source : Données d'enquête et estimation

En supposant une marge d'erreur de 5%, la pluviométrie estimée majorée de cette proportion demeure toujours inférieure à celle observée sur la même période sauf pour l'année 2000.

Pour avoir une idée globale on peut recourir au calcul du coefficient de Nash (CN) qui est un indicateur permettant d'évaluer l'ampleur des écarts qui existent entre les valeurs observées et celles déterminées par estimation. Ce coefficient CN se détermine comme suit :

$$CN = 100 \left[1 - \frac{\sum_{t=1998}^{2003} (q_{obs,t} - q_{est,t})^2}{\sum_{t=1998}^{2003} (q_{obs,t} - \bar{q}_{obs})^2} \right] \text{ O\`u,}$$

- $q_{cal,t}$ est la quantité de pluie déterminée pour l'année t allant de 1998 à 2003 par la tendance des années précédentes ;
- $q_{obs,t}$ est la quantité de pluie observée pour l'année t allant de 1998 à 2003 ;
- $q_{est,t}$ est la quantité de pluie estimée pour l'année t en fonction du trend ;
- \bar{q}_{obs} est la quantité de pluie moyenne pour la période de 1998 à 2003.

$$\text{L'application donne } CN = 100 \left[1 - \frac{109832,51}{22530,01} \right] = -387,49$$

Le coefficient de Nash négatif traduit un écart important entre les valeurs observées et les valeurs estimées. Cela confirme le fait que les écarts entre les tendances estimées et la pluviométrie obtenue après intervention du programme sont véritables. D'où l'idée qu'il y a une amélioration effective de la pluviométrie grâce à l'ensemencement des nuages.

1.3. ETAT DES LIEUX

La modification artificielle du temps est un thème qui faisait auparavant l'objet de peu d'études et de travaux. Cependant, la question environnementale qui est de plus en plus à l'ordre du jour depuis la deuxième moitié du $xx^{ième}$ siècle, donne lieu à plusieurs recherches sur l'opportunité d'utilisation de techniques de modification artificielle du temps telle que l'ensemencement des nuages ainsi que leurs retombées économiques. L'approche de l'ensemencement des nuages en termes économiques, est un aspect qui est de plus en plus traité au regard des fréquentes sécheresses observées à travers la planète. L'utilisation de cette technique a donné lieu à des investigations pour mesurer les résultats obtenus selon les différents objectifs recherchés. C'est ainsi que nous passerons en revue certaines études réalisées sur les retombées économiques des pluies provoquées.

Cette présentation se fera sous forme thématique suivant les différents aspects économiques qui font l'objet de cette recherche. Nous aborderons d'abord les travaux qui ont traité des impacts de cette technologie sur l'agriculture, ensuite successivement ceux relatifs à la pêche, à l'hydroélectricité et enfin les travaux qui font ressortir la question du couvert végétal.

1.3.1 AGRICULTURE

Les changements climatiques touchent toutes les facettes de l'activité économique en Afrique noire, particulièrement pour les pays les moins développés, dépendant de l'agriculture de subsistance (HULME, 1996)². L'agriculture est considérée comme le moteur de l'économie pour tous les pays au sud du Sahara et à ce propos, il est indispensable d'envisager un développement sans ce secteur (IFPRI, 2007). C'est pourquoi, la plupart des Etats Africains cherchent à développer ce secteur tout d'abord en lui assurant un approvisionnement en ressources en eau conséquent.

² Hulme, M., 1996: Climate Change and Southern Africa, Rapport commandé par le FMN International et coordonné par la section de la recherche climatique.

Pour le Burkina Faso ainsi que d'autres pays africains tels que le Mali, le Sénégal ou le Niger, les prévisions selon divers modèles des experts font ressortir une chute de leurs productions céréalières d'ici 2080 quels que soient les scénarii (QUIRION et al., 2005).

Plusieurs projets d'ensemencement des nuages à travers le monde ont été entrepris dans l'objectif d'améliorer la situation agricole de leur région. Les pays développés n'échappent pas à cette règle : c'est le cas des Etats-Unis, d'Israël, de l'Afrique du Sud. Depuis les années 1970, un grand nombre d'études ont été menées sur l'efficacité de l'ensemencement des nuages par rapport à l'agriculture.

En 1981, les travaux de BULLER, BARK et VANDERLIP ont porté sur l'effet de l'ensemencement des nuages sur la production agricole et les conséquences sur le revenu de la région. Ils ont mis en évidence des effets qui varient selon les zones observées. En effet, l'Etat du Kansas qui a fait l'objet de l'étude a été subdivisé en trois parties : la région Ouest, la région du centre et celle de l'Est. Les résultats observés ont montré une augmentation de la production agricole au niveau de la région Ouest tandis que les régions du centre et de l'Est ont enregistré par moment des baisses de rendements à la suite de l'ensemencement. Les résultats d'ensemble au niveau de l'Etat ont été positifs pour la campagne agricole et de manière spécifique, les travaux ont indiqué une efficacité de l'ensemencement des nuages liée aux conditions climatiques favorables et à la répartition temporelle des pluies.

Ces travaux de recherche ont par la suite montré que cet accroissement de la production agricole contribuait à augmenter le revenu des producteurs au niveau de l'Etat du Kansas. Mais, cet avantage ne bénéficiait pas à l'ensemble des producteurs du marché des céréales lorsque ces derniers étaient confrontés à une demande inélastique. Cette situation s'explique par un prix qui baisse suite à l'accroissement de la production agricole totale disponible sur le marché. Mais pour la zone ensencée, cette baisse du prix est compensée par une hausse de leur production suite à l'ensemencement ; tandis que sur le marché, les autres producteurs sont confrontés à une demande inélastique alors que leur production n'a pas augmenté.

Dans le même ordre d'idée, PERRY et GLOVER par leurs travaux parus en 1986, ont essayé d'évaluer l'effet de la variation des précipitations, grâce à la technique d'ensemencement des nuages sur l'agriculture. Leurs travaux ont porté sur neuf régions de l'Etat de Utah aux Etats-Unis dans des cas de sécheresse vécus en 1934 et 1977. A l'aide d'un modèle logistique de croissance, l'expérience a été d'abord faite pour l'année 1979 qui fut une année de pluviométrie normale. Ils ont mis en relation la variation de la pluviométrie et la production agro-pastorale en montrant l'incidence positive qu'apportait le supplément d'eau sur les rendements des produits tels que le maïs, le blé, l'orge et la production de fourrage. L'extension de l'étude aux années de sécheresse 1934 et 1977, a confirmé les résultats par les gains qui auraient été engrangés si l'ensemencement des nuages avait été appliqué pendant de telles périodes. Leurs recherches ont indiqué que cette technique était rentable avec un gain plus élevé pour les régions arides que celles non arides. Toutefois, en situation de demande inélastique, ce bénéfice ne profitait pas aux Etats voisins qui n'avaient pas bénéficié des effets des pluies provoquées mais qui subissaient l'influence de la baisse des prix.

D'autres travaux de recherche ont permis de mettre en exergue les effets économiques que l'accroissement des précipitations pouvait avoir dans les plaines de la région du centre des Etats-Unis où est essentiellement cultivé le maïs. A l'aide d'un modèle économétrique, GARCIA, CHANGNON et PINAR en 1986 dans l'Illinois, ont mis en relation les rendements des cultures de maïs et de soja avec des variables de temps que sont les températures et les relevés pluviométriques mensuels. Les résultats se sont traduits par une influence non négligeable de la technologie de modification du temps, car les rendements de maïs ont subi une amélioration sensible. Il en a été de même pour le soja mais dans des proportions moindres. Les travaux ont relevé, que l'ensemencement des nuages avait en moyenne une influence positive sur l'amélioration des rendements agricoles grâce à une meilleure pluviométrie. Tout de même, ils ont relativisé les retombées positives de l'utilisation de cette technologie en indiquant qu'à petite échelle, elle contribuait à accroître les revenus des producteurs de la région ciblée mais à baisser ceux des producteurs des autres régions. De surcroît, les travaux ont indiqué que plus on utilisait cette technique à grande échelle, plus les revenus des producteurs des zones non ciblées avaient tendance à baisser.

De manière générale, plusieurs autres études qui ont porté sur l'effet de l'ensemencement des nuages sur l'agriculture ont révélé des succès de cette technique sur l'amélioration des rendements agricoles. Les diverses méthodes utilisées dans les études ont répondu aux attentes des décideurs dans le secteur agricole. Dans le même temps, les effets secondaires de ces retombées agricoles se sont traduits en général par une baisse de revenus au niveau global rendant l'utilisation de la technologie moins attrayante.

Mais, il faut noter que ces conclusions sont propres aux conditions de marchés rencontrés, à savoir une demande de biens alimentaires fortement inélastique, des parts de marché des zones ciblées assez fortes, mais surtout du niveau de développement du pays. En effet, dans le contexte d'un pays en voie de développement, les conséquences de la baisse du niveau des prix peuvent être différentes. Malgré cette baisse, les producteurs des zones non ciblées, peuvent ne pas commercialiser leurs produits ou les vendre en quantité moindre pour des raisons de subsistance. Cette hypothèse est plausible dans la mesure où elle s'explique par le fait que les producteurs qui n'ont pas bénéficié de l'augmentation de leur production, la conserveront pour une autoconsommation surtout que dans les pays en voie de développement l'autosuffisance alimentaire en termes de céréales n'est pas encore effective.

Pour le cas du Burkina Faso, cet effet secondaire n'est pas à redouter quand on sait que le programme couvre de nos jours, l'ensemble du territoire.

L'amélioration de la pluviométrie grâce à l'ensemencement a un impact sur l'agriculture comme l'atteste les résultats empiriques. Toutefois, il faut également souligner le facteur érosion hydrique qui est important, il joue négativement sur les rendements agricoles. L'érosion hydrique est la perte de terre due à l'eau qui par la même occasion entraîne la perte d'éléments nutritifs tels que les sels minéraux par son effet décapant. Bien que la composition physique et chimique des terres, la pente et la végétation du milieu soient tous des facteurs déterminants dans l'érosion hydrique, la pluie est l'élément majeur causant cette action, car sans précipitation, il n'y a pas d'érosion hydrique. Ainsi, l'impact des gouttes sur le sol et un ruissellement fort, dû à l'intensité et au volume plus important des pluies,

peuvent être source d'appauvrissement des sols et donc de baisse de rendements agricoles (Ministère Agriculture Canada, 2009). Cette affirmation est confirmée par les travaux de Roose en 1981 lorsqu'il dit qu'une raison fondamentale de la perte des éléments nutritifs des terres est l'érosion et le ruissellement. L'érosion hydrique, étant reconnue comme ayant un rôle négatif, a été la cause de l'utilisation de techniques de Conservation des Eaux et des Sols (CES) en vue d'atténuer son effet négatif (MIETTON, 1986).

C'est pourquoi, avec l'hypothèse que l'ensemencement des nuages contribue à accroître le niveau des précipitations, on admet par la même occasion que cette pratique peut être source de baisse de rendements agricoles. Ceci peut s'expliquer par de plus grandes quantités d'eau qui engendrent des ruissellements plus importants dus au volume et à la vitesse, quand on sait que l'infiltration au niveau du Nakambé (plateau central) est très faible à cause du sol latéritique. En somme, l'ensemencement des nuages peut être à la fois source d'amélioration des rendements agricoles mais aussi de baisse. A travers ces travaux nous essaierons d'apprécier les effets nets de cette pratique.

Mais cet accroissement de la disponibilité des ressources en eau a été perçu par certains travaux comme un facteur influençant aussi la pêche au niveau des zones ensemencées.

En Chine, des expériences ont été réalisées dans plusieurs secteurs. On peut citer celle réalisée dans la région de Jiangxi pour améliorer les rendements de riz. Li a mis en relation les rendements de riz (variété de courte et longue durées) avec le niveau de pluviométrie décadaire.

Cette province du Jiangxi située dans le sud-Est est une des régions les plus grandes productrices de riz du pays. Les sécheresses à répétition sont la cause de grands désastres et perturbent fortement la production rizicole. Les sécheresses se produisent une fois tous les deux à trois ans et s'étendent sur de très grandes superficies pendant un temps relativement long 80 à 100 jours par an et parfois elles atteignent 120 jours. Elles causent par conséquent d'importantes pertes. La provocation des pluies par ensemencement des nuages a été d'une grande importance pour assurer la production rizicole dans cette région.

Les périodes arides surviennent en été et en automne et perturbent énormément la croissance du riz. Les cas les plus récurrents furent rencontrés en début de saison hivernale (mai à juin) ce qui affecte particulièrement les variétés hâtives de riz.

Par des travaux préliminaires, les périodes idéales pour l'ensemencement se sont révélées être la période de juin à septembre.

Cette expérience réalisée précise que la pluviométrie n'est pas le seul facteur de production car il faut tenir compte de la nature des semences, des engrais et de l'entretien des champs. Cependant, pour isoler l'effet de l'intervention du programme il a fallu recourir à l'hypothèse ceteris paribus. Les autres facteurs ont été maintenus constants dans l'année en question pour observer les effets purs liés au régime pluviométrique. Cette réalisation a été faite de manière pratique par la relation polynomiale établie entre les rendements et les décades pluviométriques selon l'équation suivante :

$$y_i = c_0 + \int_0^t a_j(t) \cdot x_{ij}^p(t) dt + \varepsilon_t$$

Où x_{ij}^p représentent les valeurs décadaires de la pluviométrie dans le temps $j = 1, 2, \dots, t$ et l'espace i ;

a_j est le coefficient de pondération ou le poids de la pluviométrie décadaire sur le rendement des céréales ;

c_0 est le rendement minimum quelque soit le niveau de pluviométrie.

Les résultats obtenus furent très appréciables, car ils ont permis de mettre en exergue pour les variétés hâtives un accroissement de la productivité de 2,46Kg/ha et pour les variétés longues cet accroissement s'élevait à 1,65Kg/ha.

Sur la base des rendements additionnels générés pour les deux types de variété et pour une superficie exploitée d'un million six cent mille (1600 000) hectares, les estimations absolues permettent d'obtenir une production additionnelle de riz de 208000 tonnes engendrée par la provocation artificielle de pluies.

1.3.2 PÊCHE

1.3.2.1 Filière pêche à Bagré

A Bagré, la pêche était avant les années 1994 une activité isolée. Avec la mise en eau du barrage et l'ouverture de la pêche, les populations se sont adonnées à cette activité qui est

devenue en plus de l'agriculture et l'élevage, la troisième source de revenus de la région. Cette zone est l'une des plus peuplées du pays avec une densité sur ces plateaux en 2010 de plus de 93hbs/km² selon les estimations de l'Institut National de la Statistique et de la Démographie (INSD). La population est composée majoritairement de bissas (90%).

Le potentiel du barrage est estimé à 1600 tonnes de poisson par an en année normale. Les villages riverains du barrage de Bagré sont : Bagré, Paté, Yakala, Lenga, Koumboré, Djerma, Béguédo sur la rive gauche, et Gouyenga, Dirzé, Dassanga, Fougou, Bousgou, Bouta, Nagrigré, Niaogo sur la rive droite.

Un recensement effectué en Février-Mars 1998 indiquait que le nombre de pêcheurs opérant sur le barrage de Bagré était de 452, composés presque exclusivement de nationaux (447) (SOCREGE, 1998). En 2003, l'effectif est passé à environ 607 pêcheurs et 217 transformatrices de poissons. Contrairement à celles de Kompienga, les communautés de pêche de Bagré sont en majorité autochtones.

Au plan socio économique, la pêche à Bagré correspond pour l'économie nationale à un chiffre d'affaires de 960 millions de francs CFA dont 400 millions allant aux pêcheurs. La pêche représente en outre 1200 emplois directs (pêcheurs et aide pêcheurs) auxquels il faut ajouter les emplois indirects tels les transformatrices (plus de 250) et les commerçants (plus de 500) toutes catégories confondues. Le développement de la pêche peut induire le développement simultané d'autres activités indirectes telles que la menuiserie (pour les pirogues) et la vente d'engins de pêche sur place (Direction des pêches, 1996).

En termes de revenus, le tableau ci-dessous donne un aperçu de l'importance de la filière pour l'amélioration du niveau de vie économique des populations riveraines.

Tableau 2 : Revenus nets mensuels par tête des acteurs de la filière

| Acteurs à Bagré | Revenu en Fcfa |
|-------------------------------------|-----------------------|
| Pêcheurs professionnels | 10323 à 20389 |
| Pêcheurs semi professionnels | 7005 à 10288 |
| Pêcheurs occasionnels | 3056 |
| Femmes transformatrices de poissons | 11353 |
| Commerçant de poisson frais | 125574 |

Source DGRH, 1997

1.3.2.2 Pêche et niveau hydrique

De manière générale, le secteur de la pêche joue dans les pays en voie de développement un rôle dont l'importance varie suivant la position géographique des Etats. Pour la majeure partie des pays d'Afrique de l'ouest qui ont un débouché maritime, leur position géographique par rapport aux pays continentaux constitue un avantage à cause des ressources halieutiques. C'est pourquoi selon l'étude réalisée par la FAO en 2006, on observe que la pêche contribue de manière non négligeable pour ces Etats dans la formation du PIB tel qu'en témoigne les quelques résultats ci après :

Tableau 3 : Contribution du secteur pêche à l'économie nationale en Afrique de l'Ouest

| | Burkina Faso | Cap vert | Gambie | Mali | Mauritanie | Sao Tomé | Sénégal |
|---------------------------------|---------------------|-----------------|---------------|-------------|-------------------|-----------------|----------------|
| Contribution pêche / PIB | 0,4 % | 3,9 % | 5,7 % | 4 % | 5,3 % | 5,2 % | 4,1 % |
| Pêche / secteur primaire | 1,25 % | 10,8 % | 17,3 % | 8,9 % | 22 % | 19,2 % | 24,1 % |

Source : Extrait Rapport Mondial sur le développement humain (2004), PNUD. Les données sont celles de l'année 2002.

On note ainsi une contribution au PIB pour la Gambie, la Mauritanie, le Sénégal et Sao Tomé qui excède le taux de 4% avec une part de la pêche dans le secteur primaire de ces Etats qui est assez forte allant jusqu'à 24% pour le Sénégal. Selon la même source, on enregistre pour le Mali une contribution à la formation du PIB de 3,9%, et un apport au secteur primaire qui avoisine les 9%. A l'inverse, la pêche contribue à la formation du PIB au Burkina pour moins de 1% avec une faible participation au secteur primaire qui est de 1,25%. En effet, en 2007, la filière avait engendré 20 000 emplois dont 12 500 directs pour une valeur ajoutée de plus de 10 milliards de F CFA.

Bien que le Mali soit un Etat sans ouverture maritime directe, son cas diffère de celui du Burkina Faso. En effet, le Mali dispose d'un réseau hydrographique qui s'articule principalement autour du fleuve Niger long de 4180 Km (3^{ème} fleuve d'Afrique), ce qui peut expliquer sa situation meilleure à celle du Burkina Faso. Ce fleuve parcourt le territoire malien sur 250 Km avec un écoulement continu et pour un volume annuel estimé entre 1952 et 1999 à 40,4 milliards de mètres cubes.

Avec des infrastructures de pêche peu développées, le réseau hydrographique du Burkina Faso est moins dense que celui de plusieurs Etats de l'Afrique de l'Ouest. Cela nous permet de supposer que les faibles ressources en eau du pays peuvent constituer un handicap majeur pour la production halieutique.

Sur la base de cette étude, nous pouvons émettre l'hypothèse selon laquelle le potentiel hydraulique influence positivement la production halieutique d'une région.

Cette hypothèse a été confirmée par la FAO en 1996 dans sa circulaire sur les pêches au Mali. Elle affirme que pour la saison 1994/1995, la production halieutique a atteint les cent mille (100000) tonnes à la faveur d'une meilleure pluviométrie l'année en question, comparativement aux années antérieures.

D'autres travaux ont porté sur la relation entre les quantités d'eau et le niveau de la ressource halieutique, notamment celle réalisée en 2002 par LAË et MAHE sur le delta intérieur du fleuve Niger situé au Mali. Afin de mieux gérer les ressources exploitables, ils ont travaillé sur la mise au point d'un modèle pour prévoir le niveau des captures deux mois avant le début de la saison de pêche et aussi neuf mois avant sa clôture. Ils montrent que la pêche dépend intrinsèquement du rythme des saisons hydrologiques, notamment des périodes de crues et de décrues.

Le modèle utilisé dans cette étude comprend deux variables qui sont le débit moyen de l'année en cours pour la saison hivernale et le débit moyen de la saison précédente qui agit comme une variable retardée. Ils ont pu établir cette relation uniquement composée de deux variables, sur la base de la durée de vie des poissons. En effet, pour au moins 70% des

poissons capturés, leur durée de vie ne dépassait pas une année, d'où la variable retardée d'une seule année qui figure dans le modèle utilisé.

Ces travaux ont montré une corrélation positive forte entre le débit et le volume des pêches traduisant une augmentation proportionnelle du volume des captures avec l'intensité de la crue.

Partant de ce résultat, nous voyons que le débit d'un cours d'eau dépend de son relief, mais étroitement du volume d'eau disponible, donc de la pluviométrie. A travers ces recherches, les auteurs ont mis en avant la place importante que représentent les volumes d'eau recueillis dans les bassins. Cette analyse permet d'émettre l'éventualité selon laquelle l'ensemencement des nuages peut constituer un facteur qui contribue à améliorer le volume des pêches d'une région.

Tout de même, d'autres travaux ont donné des résultats différents. C'est le cas de celui mené par l'ORSTOM (1992) sur les captures des crevettes dans l'estuaire de Casamance au Sénégal. Ces travaux ont montré par moment que les captures annuelles étaient fortement corrélées négativement avec l'indice pluviométrique (pluviométrie moyenne des deux dernières années). En guise de conclusion de cette étude, les chercheurs ont émis l'hypothèse qu'il existait une relation parabolique entre les captures et la pluviométrie.

En général, pour ce qui est de la biomasse piscicole, les variations saisonnières se traduisent par des variations de l'importance des captures. Les captures sont d'autant plus importantes que les retenues contiennent plus d'eau (ILLE, 1997). Ceci traduit une certaine dégradation des conditions de vie des poissons au cours de la période basse des eaux. Des résultats similaires ont été obtenus au niveau du barrage de Loumbila par KABRE (1994) et selon cet auteur au moins 90 % de la prise des poissons sont affectés par ces variations saisonnières.

1.3.2.3 Modèle de Schaefer et Fox

Dans le cadre de l'évolution des productions, on peut citer les modèles globaux qui ont permis de mettre au point des outils de gestion basés uniquement sur les captures et sur les

efforts de pêche. En effet, ces modèles mettent en relation les prises et l'effort de pêche. Ils ont été proposés par Schaeffer (1954)³ et par Fox (1975).

L'effort de pêche se définit comme l'ensemble des moyens de captures mis en œuvre par le pêcheur pendant un temps donné. Il peut être exprimé en « jours de pêche » ou en matériel utilisé.

Le modèle global de Schaeffer (1954) suppose l'existence d'une relation linéaire entre la prise par unité d'effort (PUE) et l'effort de pêche (f). Il suppose une relation décroissante traduisant une baisse de la prise par unité d'effort lorsque l'effort de pêche croît. La relation s'exprime comme suit :

$$PUE = a - bf \quad \text{Où } a \text{ et } b \text{ sont des paramètres constants.}$$

L'évolution de la prise totale (P) en fonction de l'effort de pêche se représente graphiquement par une courbe en cloche dont le sommet correspond à la Production Maximale Equilibrée (PME) réalisée théoriquement par l'effort de pêche optimum (f optimal). La fonction correspondante est la suivante :

$$P = af - bf^2.$$

Le modèle de Fox repose d'une part, sur le fait que la relation existant entre la prise par unité d'effort (PUE) et l'effort de pêche n'est pas linéaire, et d'autre, sur l'idée que la prise par unité d'effort (PUE) et la prise totale ne peuvent jamais être nulle, mais tendent vers une valeur nulle quand l'effort devient infini, ce qui est plus réel. Il faut noter que dans cette fonction, la relation entre la prise par unité d'effort et l'effort de pêche est décroissante. Ceci a conduit à obtenir le modèle suivant :

$$PUE(U) = U_{\infty} \times e^{-bf}$$

$$\text{D'où } \ln(PUE) = \ln U_{\infty} - bf$$

³ Introduit pour la première fois dans l'aménagement des pêcheries à partir du modèle de LOTKA (1923) décrivant la relation existant entre prédateur et proie dans un système écologique autorégulé.

Et la fonction de production se détermine comme suit :

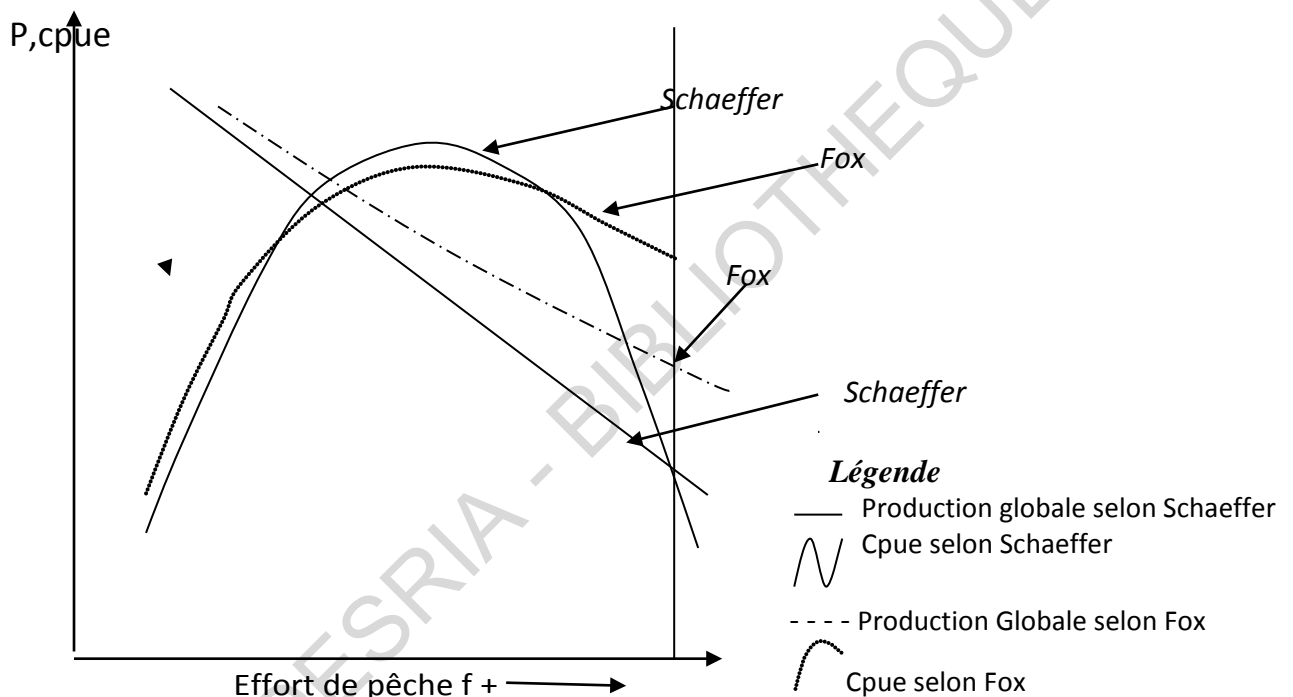
$$P = PUE \times f = U_{\infty} f \times e^{-bf}$$

$$\ln(P) = \ln U_{\infty} + \ln f - bf$$

Avec U_{∞} considéré comme le stock initial de la retenue et comme une constante positive dans le modèle, f est considéré comme l'effort de pêche.

Graphiquement, cela peut être représenté de la manière suivante :

Figure 5 : cpue et production en fonction de l'effort de pêche



NB : Cpue est la capture par unité d'effort

1.3.2.4 Modèles analytiques

Il existe aussi des modèles analytiques permettant de prédire les productions en faisant varier les paramètres qui composent ces modèles. Toutefois, leur utilisation est freinée par le volume considérable de données dont nous devons disposer et des contraintes qu'ils imposent telles que :

- la relation de croissance pondérale du poisson, est celle décrite par le modèle de Von Bertalanffy ;
- la constance de la mortalité naturelle;

- la mortalité par pêche garde une valeur constante à partir de la taille du premier recrutement (L_c).

Ces modèles (Beverton et Holt, 1957)⁴ ont permis d'établir la relation générale de production pondérale qui fait intervenir les paramètres de croissance et d'exploitation. Le modèle de base se présente comme suit :

$$y = \frac{Fw_{\infty}R_c \exp(-nk(t_c - t_0))}{F + M_n^K}$$

Avec comme définition des paramètres :

- Y production totale ou masse totale de poisson par pêche
- F = coefficient de mortalité par pêche
- M = mortalité naturelle
- R_c = recrutement au stade de première capture
- K = taux de croissance de l'espèce déterminé à partir de l'équation de Von Bertalanffy
- t_c = âge à la première capture
- t_0 = âge théorique du poisson quand sa longueur est égale à zéro
- w_{∞} = la masse moyenne individuelle que le poisson aurait eu s'il grandissait jusqu'à un âge très avancé (infini)
- n = nombre d'années

Dans nos travaux, nous allons recourir à une combinaison des modèles globaux et du niveau hydrique. Les modèles analytiques sont moins pertinents pour nos analyses car :

- la prise totale et la prise par unité d'effort ne sont jamais nulles mais tendent vers zéro ;
- la mortalité ne peut être constante ;
- les plans d'eau de tailles modestes ont une hydrologie très fluctuante et aléatoire à l'échelle de l'année, rendant hasardeux l'utilisation des paramètres de croissance comme k, qui serait alors très instable ;

⁴ Ce modèle part sur la base de quelques hypothèses fortes telles des coefficients de mortalité naturelle (M) et de mortalité par pêche (F) constants durant toute la phase d'exploitation.

- les fluctuations de conditions hydro biologiques et le mode de reproduction continue des Tilapia (espèce la plus représentée à Bagré) ne laissent pas transparaître clairement de cohortes dont la lecture est nécessaire dans les modèles analytiques ;
- les modèles globaux n'exigent pas un certain degré de précision sur les valeurs absolues, ils s'appuient largement sur les tendances qui sont assez aisément observables ;
- les paramètres utilisés sont palpables et concrets à la différence de paramètres abstraits comme K , W_{∞} , t_0 et Z des modèles analytiques, qui ne peuvent être appréhendés que par supposition ou par le calcul, ce qui est extrêmement délicat ;
- les hypothèses de constance des mortalités naturelles et par pêche sont trop fortes.

L'eau du barrage de Bagré est à usage multiple, car en plus du volet agricole et de la pêche, il sert à la production hydroélectrique.

1.3.3 HYDROELECTRICITE

L'hydroélectricité est un outil de production énergétique très apprécié pour son caractère propre car il ne génère point de pollution notamment en ce qui concerne les gaz à effets de serre. Sa production nécessite comme condition primordiale une disponibilité suffisante des ressources en eau. GRIFFITH et al. (1994) ont fait une étude sur la situation énergétique de 1990 à 1993 de certains Etats de l'Amérique centrale tel que le Guatemala. Ces pays disposent d'énormes potentialités en la matière et plus de 50% de leur production énergétique selon le rapport de l'étude, est assurée par la production hydroélectrique. Mais en 1991, suite à une grande sécheresse, les principales retenues du Guatemala et du Honduras servant à la production hydroélectrique, respectivement le Chixoy Reservoir et El Cajon Reservoir, ont connu un taux de remplissage faible. Cette situation a entraîné une chute de la production énergétique et a conduit ces Etats à entreprendre des opérations d'ensemencement à durée limitée, le temps de retour à des saisons pluvieuses normales.

Au Guatemala, les résultats d'un tel programme ont montré non seulement un accroissement des précipitations de 17%, une efficacité du taux de couverture évaluée à 30%, un coût de 0,001 dollar par mètre cube d'eau supplémentaire obtenu et surtout un retour à la normale au niveau de la production hydroélectrique. A la faveur d'un retour à des

saisons régulières, le Guatemala a suspendu son programme d'ensemencement tandis que le Honduras s'inspirait de l'expérience de son voisin en la matière.

Griffith et al., ont dans leur étude, montré qu'ils ont pu enregistrer un grand nombre de bénéfices dans la production hydroélectrique obtenus grâce à l'ensemencement des nuages. Au nombre de ceux-ci, ils citent : un coût en eau supplémentaire relativement faible qui, en général, ne dépasse pas les 10 dollars, un mode de production énergétique propre, car non polluant et beaucoup moins onéreux que la production thermique. En outre, ils ajoutent la possibilité de mener des opérations d'ensemencement sur des courtes périodes selon les besoins énergétiques pour remédier à des situations de crises comme ce fut le cas pour les expériences sud américaines où les opérations ont été menées temporairement, et avec succès.

Fort du succès de l'expérience au Guatemala, le Honduras a mis en place un programme similaire dans le but de relever le niveau de sa production hydroélectrique. GRIFFITH et d'autres chercheurs (1995) ont orienté leurs recherches sur l'expérience du Honduras qui s'est prolongée jusqu'en 1997. Les résultats présentés sont très pertinents car en 1995, l'ensemencement a apporté un supplément au niveau du bassin de EL Cajon évalué à 3,7 millions de mètres cubes d'eau. Et ce supplément d'eau a permis d'obtenir une production énergétique additionnelle d'environ 125 Gigawatt/heures pour un coût unitaire de 0.07541\$/kWh soit un bénéfice total financier estimé à 9,4 millions de dollars. Ce bénéfice rapporté à l'ensemble des moyens investis pour ce programme a donné un ratio estimé à 23,5. Ces résultats matérialisent la réussite dans l'objectif recherché des autorités qui était de restaurer la production hydroélectrique qui fortement affaiblie par la sécheresse observée dans la région.

De tels bénéfices ont été observés également en Tasmanie en 2004, où les responsables de la production énergétique ont affirmé l'efficacité de l'ensemencement des nuages pour un montant de deux millions de dollars investis avec un bénéfice net de six millions de dollars enregistrés grâce au supplément en eau mais surtout aux énormes potentialités hydroélectriques qui ont été exploitées. De même, en avril 2007 suite à une sécheresse

sévère, les autorités australiennes ont décidé de la fermeture des turbines qui constituent la première source d’approvisionnement et ont eu recours à l’ensemencement des nuages afin de satisfaire besoins énergétiques.

L’ensemencement des nuages, au-delà de pallier les ressources limitées en eau, peut contribuer à réduire les coûts de production d’électricité mais aussi à réduire le niveau de pollution par son caractère d’énergie propre. C’est pourquoi en Chine, 98% de l’énergie renouvelable provient des petites centrales ce qui leur permet de pallier les pénuries dans les zones rurales et contribue à la croissance des petites industries locales.

La question énergétique est également influencée sous un autre angle par le programme. En plus de l’énergie hydroélectrique, le régime pluviométrique fait varier la productivité de ligneux dans les forêts de savanes rencontrées au Burkina Faso.

CODESRIA - BIBLIOTHEQUE

1.3.4 COUVERT VEGETAL

Les forêts et autres formations ligneuses contribuent de manière importante à la stabilité des milieux naturels. Pour la majorité de la population, elles assurent des services importants pour l'environnement et le bien-être économique. Les services écologiques fournis par les forêts comprennent :

- La protection des ressources en sols qui contribue à réduire l'effet de l'érosion ;
- La conservation des eaux ;
- La conservation de la biodiversité ;
- L'amélioration des productivités des cultures ;
- La contribution à la lutte contre la désertification.

Les populations tirent une valeur d'usage importante des services écologiques fournis par leurs ressources forestières. Les arbres poussant sur leurs terres d'exploitation contribuent à la reconstitution de la fertilité des sols, au recyclage des éléments nutritifs ; ils protègent les sols fragiles et favorisent la fixation de l'azote (OUEDRAOGO, 2001).

En outre, au plan alimentaire, les forêts apportent un complément dans les rations des ménages et ont une action plus marquée pendant la période de soudure car les produits de cueillette constituent un soutien important à cette période de l'année. Elles ont donc une place importante dans la sécurité alimentaire des populations riveraines.

Les forêts régularisent la quantité et la qualité des ressources en eau, ralentissent l'évaporation des eaux de surface et limitent l'alluvionnement provenant des bassins versants.

En Afrique centrale et australe, la forêt constitue une source de revenus non négligeable pour les Etats. En Afrique du Sud, la sylviculture contribue pour 5% dans l'économie du pays. Le constat a été établi que les sécheresses ralentissaient non seulement le taux de croissance des arbres mais sont aussi la cause d'incendies. Ces travaux ont montré que la persistance des sécheresses pendant plusieurs années perturbe le cycle de croissance des arbres et réduisent certainement les recettes issues de la vente de bois. Ce fut le cas dans les

années 1940, 1960 et 1980. Par contre, en période de bonne pluviométrie prolongée, ce secteur a connu des années fastes, telles les années 1950, 1970 et 1990 (JURY, 2001).

De telles situations sont également rencontrées pour les pays sahéliens quoique ne pratiquant pas la sylviculture.

Ainsi, selon BOUDET (1980), il faut une année exceptionnellement pluvieuse pour que les terrains asséchés finissent par être détremés et permettent un nouveau départ de végétation herbacée et ligneuse grâce aux graines constamment réapprovisionnées par le ruissellement des eaux. Il poursuit plus loin en avançant qu'en année normalement pluvieuse, on peut observer un renouvellement parcimonieux du couvert herbacé.

Cette étude réalisée au Mali a montré que la faiblesse des pluies et très probablement l'ensablement des axes de drainages ont réduit l'écoulement des eaux, entraînant un remplissage des marres et des dépressions marécageuses. Ceci a conduit à observer sur certains sites, tels dans la zone de Gao de 1975 à 1977, la mort en grand nombre de certaines espèces de la forêt riveraine (gonakiés tels acacia nilotica). Plus au sud de cette région, dans des zones marécageuses, on a constaté la disparition du couvert végétal habituellement rencontré dû à l'assèchement des marécages. Cet état de fait était accompagné de l'apparition de nouvelles espèces telles les Balanitès aegyptiaca typiques des zones arides. Mais plus tard, en 1978, avec le retour des conditions normales d'hydrométrie grâce à l'ensemencement des nuages, ces nouvelles espèces typiques des zones arides qui s'étaient développées ont dépéri à la faveur de l'ancien couvert. Ceci s'explique par le retour de meilleures conditions pluviométriques.

En Afrique du Sud, des expériences menées entre 1991 et 1997 ont démontré que l'ensemencement des nuages s'est traduit par une augmentation moyenne de 20 à 48 % de l'écoulement moyen annuel dans 13 bassins-versants différents de l'Est du Haut Veld et de ses contreforts. Le modèle fait également état d'augmentations de 22 % en moyenne des rendements en bois, résultant de l'ensemencement des nuages.

Pour synthétiser cette analyse, l'auteur montre que la restauration du couvert végétal est grandement tributaire de l'amélioration des ressources en eau. C'est pourquoi, une amélioration de la pluviométrie par l'intermédiaire de l'ensemencement des nuages apparaît comme une solution pour restaurer le potentiel ligneux à court et moyen terme, et même la haute végétation à long terme.

Cet état des lieux donne un aperçu des effets de l'utilisation de cette technologie et des retombées socioéconomiques qu'elles peuvent générer. Il faut noter que ces différentes études ont été réalisées par le recours à la théorie, mais aussi par un cadre opératoire dont les modèles ont mis en lumière les différents résultats obtenus. Ainsi, les modèles théoriques et outils d'analyse sont les éléments qui feront l'objet du prochain aspect développé.

CODESRIA - BIBLIOTHEQUE

CHAPITRE 2 : APPROCHE THEORIQUE DU PROBLEME ET CADRE THEORIQUE DE L'ETUDE

Cette partie de la recherche comporte les éléments de base qui vont orienter l'étude. Après avoir posé le problème général et exposé les travaux qui ont abordé les aspects sous jacents, nous présentons les questions et objectifs spécifiques ainsi que les hypothèses qui constituent le fil conducteur des travaux. A ces éléments, viendront s'ajouter les théories dans lesquelles s'inscrivent cette étude, les outils théoriques et d'analyse économique qui sont les instruments qui permettront d'apporter des éléments de réponses à nos interrogations. La dernière partie de ce chapitre présentera la méthodologie utilisée pour la conduite de cette recherche.

2.1. QUESTIONS ET OBJECTIFS SPECIFIQUES

La recherche que nous menons, a pour principal objectif d'évaluer les retombées économiques des pluies provoquées par ensemencement des nuages au Burkina Faso et précisément dans le bassin du Nakambé.

Pour conduire cette recherche, il est nécessaire de faire ressortir les objectifs spécifiques de l'étude et pour cela, l'élaboration de questions spécifiques est nécessaire. Ces dernières servent à orienter sur les interrogations distinctives émanant du problème général. Elles se présentent comme suit :

- quel est l'impact de l'ensemencement des nuages sur la production vivrière ?
- y a-t-il un effet lié à cette technologie sur le volume des prises de pêche ?
- existe-t-il un bénéfice lié au programme dans la production hydroélectrique ?
- quelles sont les répercussions de l'ensemencement des nuages sur le couvert végétal ?

A partir des questions ci-dessus, nous pouvons retenir les objectifs spécifiques suivants qui sont au nombre de quatre :

- évaluer l'impact des pluies provoquées sur la production agricole vivrière au niveau des rendements et de l'érosion des sols dans la région de l'étude ;
- vérifier s'il existe un impact sur le niveau des captures pour le secteur de la pêche ;

- analyser si une relation de cause à effet existe entre l'évolution de la pluviométrie et les bénéfices dans la production hydroélectrique ;
- apprécier l'évolution du couvert végétal et la relation qui peut être faite avec l'évolution de la pluviométrie.

Pour ce faire, nous utiliserons pour chacun des cas la méthode du changement de productivité. Celle-ci va nous permettre de formuler des hypothèses de recherche.

2.2. HYPOTHESES

Notre recherche sera orientée par un certain nombre d'hypothèses qui sont intrinsèquement liées aux différents problèmes spécifiques mentionnés au niveau de la problématique. Ainsi nous pouvons poser nos hypothèses de recherche comme suit :

H₁ : L'ensemencement des nuages contribue à baisser les rendements agricoles.

H₂ : L'ensemencement des nuages diminue les rendements de la pêche.

H₃ : L'ensemencement des nuages est sans effet sur la production électrique.

H₄ : L'ensemencement des nuages est sans effet sur la productivité du bois de forêt.

2.3. CADRE OPERATOIRE

Dans le but de tester les différentes hypothèses, on aura recours au plan théorique à l'innovation technologique et aux techniques quantitatives notamment l'économétrie. Ainsi, pour chacune des hypothèses nous allons présenter un modèle économétrique dont la construction fait référence à un ensemble de théories socioéconomiques. C'est pourquoi nous allons d'abord mettre en exergue les théories qui permettent de justifier les modèles utilisés avant de présenter ces derniers ainsi que les différentes variables qui les composent.

2.3.1 ENSEMENCEMENT DES NUAGES ET INNOVATION TECHNOLOGIQUE

La technique d'ensemencement des nuages est un outil d'adaptation aux changements climatiques. Elle est aussi perçue comme une innovation technologique environnementale

non pas qu'elle soit très récente mais parce qu'elle a connu de grands perfectionnements et qu'elle est de plus en plus utilisée comme un recours par les Etats ou les grands groupes comme un moyen d'adaptation aux conditions climatiques.

2.3.1.1 Définition de l'innovation environnementale

De manière générale, on peut définir une innovation environnementale comme toute action novatrice, du point de vue de l'entité considérée, entreprise dans le but de (ou permettant de) réduire ou de gérer des impacts environnementaux négatifs ou/et de maintenir ou d'améliorer des impacts environnementaux positifs (Gasmi et Grolleau, 2003). Le terme "action" est très large et permet d'englober les aspects technologiques (produits ou procédés), organisationnels, ou liés aux compétences, sachant que les innovations environnementales empruntent généralement et simultanément dans des proportions plus ou moins importantes à ces trois catégories.

Circonscrire la définition des innovations environnementales est une tâche ardue, tant le concept d'innovation est dynamique et évolutif en fonction de l'angle d'analyse considéré. Toutefois, quelques auteurs ont essayé de donner des esquisses permettant d'observer des éléments clés qui servent de base.

On peut définir l'innovation environnementale comme celle qui empêche ou réduit la pression anthropogénique sur l'environnement, qui remédie à un dommage déjà causé ou qui diagnostique et contrôle les problèmes environnementaux (Hemmelskamp, 1997).

On perçoit dans cette approche l'idée de palier un effet néfaste commis par d'autres facteurs sur l'environnement.

D'autres définissent les innovations environnementales telles des procédés nouveaux ou modifiés, ou encore des techniques ou systèmes et produits destinés à éviter ou à réduire des nuisances sur l'environnement (Kemp et Arundel, 1998)⁵.

⁵ Etude sur les indicateurs de suivi pour l'innovation environnemental.

Pour Oltra et Saint Jean (2001) ce sont des combinaisons de compétences, de savoirs, d'équipements et d'organisations requises pour réaliser certains objectifs environnementaux et se conformer à certaines réglementations et pour produire de nouveaux artefacts technologiques.

En outre, les innovations environnementales peuvent encore être définies de deux manières : premièrement, par les effets de l'innovation sur l'environnement, et deuxièmement par les intentions de l'innovateur visant à réduire l'impact environnemental des procédés et produits (Markusson, 2001).

Toutes ces définitions mettent en avant des idées qui convergent, à savoir la recherche de l'atténuation d'effets néfastes sur l'environnement par l'introduction d'un nouveau procédé technique. Ainsi, l'intervention du programme par ensemencement des nuages répond à cette vision qui est de générer un supplément d'eau afin de limiter les impacts nuisibles des sécheresses sur l'agriculture et les divers secteurs économiques et sociaux du pays.

Le cadre d'intervention de l'ensemencement des nuages permet de le considérer comme une innovation environnementale « propre » ou « intégrée » au détriment des innovations « end of pipe » c'est-à-dire « en bout de tuyau ». En effet, il s'agit d'un changement préventif au niveau du processus de formation des pluies qui nécessite des ressources humaines, financières relativement importantes ainsi que des changements importants au niveau du processus de formation (accélération du processus de formation des pluies).

Les éléments de définition susmentionnés n'épuisent certainement pas le sujet. Néanmoins, leur croisement peut contribuer à une caractérisation relativement fine de l'espace des innovations environnementales. Du fait de leurs particularités, les innovations environnementales sont susceptibles d'être adoptées à un niveau sous optimal en référence au critère de Pareto.

2.3.1.2 Innovation environnementale et changements climatiques

De manière simpliste, on peut définir les changements climatiques comme l'évolution naturelle du climat, désormais fortement influencée par les activités humaines. Ils se manifestent par des événements extrêmes du climat tels que les tempêtes, les tornades, mais également par des sécheresses sévères qui viennent durcissent les conditions de vie des populations.

Les changements climatiques ont des implications tout à fait différentes pour les décisions d'adaptation qui sont structurelles (c.-à-d. qui exigent l'investissement à long terme), comparées aux décisions relevant de simples normalisations comportementales. En effet, les changements climatiques nécessitent des investissements à moyen et long termes pour permettre une adaptation efficace par rapport à certains problèmes environnementaux (hygiène) qui ont seulement besoin de réajustements des comportements, des mœurs (Hulme, 2003).

C'est pourquoi face à des problèmes de pollution atmosphérique, les entreprises sont souvent amenées à investir pour innover dans la technologie afin de « **produire propre** ». De même, face à la sécheresse, le réajustement du comportement des populations ne produit le plus souvent que des solutions de court à moyen terme : il y a un besoin d'innovation pour apporter une alternative de long terme ; d'où l'apparition et le développement de la modification artificielle du climat depuis la fin de la seconde guerre mondiale.

A titre d'exemple, les changements climatiques couplés aux changements technologiques de la Révolution Verte ont profondément modifié les rapports entre les activités agricoles et la nature. La symbiose qui existait entre les systèmes agroalimentaires et l'environnement ont laissé la place à une intensification, parfois à outrance, des activités agricoles (démographie), synonymes de détérioration des milieux face à un climat devenu très capricieux. C'est ce qui amène les grandes firmes américaines à recourir au financement de l'ensemencement des nuages de manière ponctuelle de sorte à sauver certaines campagnes agricoles (Merill et al, 2005). Cette technologie a été perfectionnée au point de réduire voire annuler les effets néfastes sur les Etats voisins.

2.3.1.3 Les innovations environnementales : des coûts privés et des bénéfices collectifs ?

A la différence de nombreuses innovations classiques, les innovations environnementales sont souvent perçues comme génératrices de coûts privés et de bénéfices environnementaux collectifs non valorisés par les mécanismes classiques du marché. Alors que l'adoption ou non d'une innovation classique, au niveau micro-économique, n'a de conséquences que pour l'agent potentiellement adoptant, l'innovation environnementale permet la production d'externalités environnementales positives, contribuant ainsi au bien-être d'agents autres que l'adoptant. Ces agents peuvent être des contemporains, mais également des tiers absents ou non représentés (générations futures, animaux, producteurs étrangers, etc.).

Les innovations environnementales correspondent à des innovations dont la rentabilité économique (généralement perçue comme incertaine comme c'est le cas pour l'ensemencement des nuages) ne constitue pas l'argument principal (Pampel et Van Es, 1977). Malgré l'influence d'autres facteurs (reconnaissance d'un problème environnemental, sensibilité personnelle, etc.) discutés par Nowak (1987), de nombreux travaux appliqués reconnaissent que la rentabilité économique reste l'un des déterminants primordiaux de l'adoption des innovations environnementales (Sinden et King, 1990 ; Pannell, 1999).

En effet, dans une perspective économique traditionnelle, l'adoption survient si l'adoptant potentiel perçoit les bénéfices privés d'une innovation comme étant supérieurs à ses coûts d'adoption. Dans leur modèle, Karshenas et Stoneman (1993) énoncent que l'acquisition de l'innovation au moment optimal (t') est déterminée par deux conditions :

- (i) la condition de rentabilité où l'acquisition de la technologie doit générer des profits positifs et supérieurs à ceux générés par l'ancienne entité
- (ii) la condition d'arbitrage qui requiert que les bénéfices nets de l'acquisition de l'innovation ne croissent pas dans le temps, c'est-à-dire qu'il n'est pas profitable pour l'entreprise d'attendre au delà de t' . La logique de l'adoption (ou de la non adoption) de l'innovation classique est sanctionnée par le marché. En effet, dans le cas de non-adoption d'une innovation commerciale profitable, le "réfractaire" voit ses coûts augmenter par rapport à ceux de ses concurrents adoptants, ce qui risque à terme d'entraîner sa disparition du marché.

Un bénéfice tel que l'amélioration du niveau de la pluviométrie en hivernage dans les savanes, présente dans une certaine mesure, des propriétés caractéristiques des biens collectifs, c'est-à-dire la non-rivalité (la consommation de ce type de caractéristiques par un individu A ne réduit pas la quantité disponible pour un autre individu B) et la non exclusion dans la consommation (une fois le bien produit, il est pratiquement impossible d'empêcher A ou B de le consommer).

En d'autres termes, le coût marginal d'extension du bien collectif à un individu est nul, tandis que le coût marginal d'exclusion d'un individu du bénéfice du bien procuré par le bien collectif est infini. Le cas de cette étude peut être comparé au cas classique de la qualité de l'air. En effet, une fois que les investissements de protection de l'air ont été engagés, la protection d'un individu supplémentaire est nulle, mais le coût d'exclusion d'un nouveau membre de la population risquerait d'être extrêmement élevé. Les propriétés collectives des bénéfices des innovations environnementales sont souvent évoquées comme des justifications à l'intervention des pouvoirs publics.

Si on poursuit l'analyse en projetant cela dans la théorie classique où c'est la recherche du gain qui prime (capitalisme à outrance), alors ces propriétés collectives favorisent notamment deux types de comportement susceptibles de provoquer des défaillances des marchés à savoir : le comportement "**free rider**" ou de "**passager clandestin**" et les "**problèmes d'assurance**".

- le comportement "**free rider**" ou de "**passager clandestin** :

En effet, le bien environnemental étant disponible pour tous, les "passagers clandestins" le consomment sans fournir la contribution correspondante. Face au marché, les passagers clandestins adoptent un comportement opportuniste. Les prédictions de la théorie néo-classique sont alors que le bien collectif sera insuffisamment produit ou l'innovation environnementale insuffisamment adoptée par des marchés privés (refus des multinationales de financer les programmes d'ensemencement). Dans le monde réel, il semble que les individus contribuent au-delà des prédictions de la théorie néo-classique. Plusieurs explications ont été proposées, telles la présence de comportements altruistes, la recherche du "**warm-glow**" traduisant une "chaleur intérieure" du fait de l'utilité accrue

générée par l'acte de donner plutôt que par le fait que quelqu'un d'autre reçoive une sorte "d'altruisme égoïste" (Andreoni, 1990) ou la présence de pressions sociales ou des mécanismes privés d'inductions (lorsque le contributeur profite de bénéfices privés associés plus importants que les autres en fournissant le bien collectif).

- les "**problèmes d'assurance**"

Dans le cas des problèmes d'assurance, l'agent n'adopte pas un comportement opportuniste. Il s'abstient de contribuer à la production d'un bien collectif parce qu'il pense que le bien ne sera de toute façon pas produit, malgré son effort individuel. Ce cas est très fréquent lorsqu'on fait une enquête d'opinion auprès des populations. Selon ces dernières même si elles devaient contribuer financièrement pour un tel programme, cela n'aurait aucun effet car elles ne s'attendent pas à une amélioration possible du niveau de la pluviométrie par ce procédé technique.

Pourtant, la production du bien collectif considéré nécessite d'atteindre un certain niveau de contribution, un seuil minimum pour être efficace. Si les contributions recueillies sont insuffisantes, le bien ne sera pas produit et l'agent considère qu'il a gaspillé sa contribution (Schmidtz, 1991). Ce constat est fréquent dans les travaux empiriques sur la contribution des agents individuels à l'amélioration de la qualité environnementale.

Mais lorsqu'on fait une analyse en dehors du marché, les comportements des agents diffèrent. En effet, on est à la recherche de l'optimum social et on retient comme indicateur de base la qualité d'amélioration de l'environnement. Quand il s'agit de l'air, on s'en tient à la mesure de l'amélioration de sa qualité. Dans le domaine de la dégradation des sols, on envisage des mesures par un changement de technologie de production. Pour ce qui de la pénurie d'eau, l'option de l'ensemencement des nuages est faite en ce moment sans un accent particulier sur la notion de bénéfices/coûts compte tenu de la nature social du bien : « **l'eau c'est la vie** ». Dès lors, on assiste à un comportement économique de type socialiste où c'est l'Etat-providence qui est perçu. Le coût de l'innovation environnementale est supporté par l'Etat et le bien collectif fourni est perçu comme un service apporté par l'Etat régalien dans une économie toujours en transition. C'est le cas des pays en voie de

développement où les conditions de marchés sont difficilement applicables à tous les niveaux.

2.3.1.4 Visibilité des coûts, invisibilité des effets environnementaux

Le degré d'observabilité par les adoptants des résultats générés par une innovation influe sur l'adoption. Plus il est facile d'observer les conséquences de l'innovation, plus il est probable qu'elle sera adoptée, en supposant que ces conséquences correspondent aux attentes des adoptants potentiels. En effet, l'observabilité permet d'évaluer plus facilement la valeur d'une innovation et son applicabilité dans les cas spécifiques des adoptants potentiels (Rogers, 1995 ; Pannell, 1999). L'observabilité des effets fait souvent l'objet d'un test à petite échelle avant d'envisager l'adoption complète. Ce phénomène avait été souligné par Ryan et Gross (1943) dans leur étude séminale sur les semences hybrides où les adoptants avaient d'abord testé ces semences sur une parcelle d'essai avant de les adopter sur l'ensemble des surfaces concernées. De même cela est observable avec l'ensemencement des nuages où dans un premier temps les décideurs n'ayant pas une idée des performances l'adoptent à une échelle géographique limitée avant d'envisager l'extension à des zones plus vastes en fonction de l'observabilité des résultats déjà obtenus sur l'espace réduit.

Pour l'adoptant, les effets environnementaux de l'adoption d'une innovation environnementale possèdent généralement les propriétés des biens de croyance, c'est-à-dire la quasi-impossibilité d'observer les conséquences environnementales de l'innovation avant ou après l'adoption (Darby et Karni, 1973)⁶, en raison de difficultés comme la quasi-impossibilité d'isoler sa contribution ou la présence de coûts de transaction prohibitifs.

Ce cas de figure est rencontré dans ce sujet avec l'adoption de la technique d'ensemencement pour améliorer la pluviométrie. Il est considéré par un grand nombre comme un bien de croyance car les effets espérés relèvent, pour les adoptants comme pour les bénéficiaires (populations), de la croyance ce qui veut dire qu'il n'y a pas de certitude. En outre, pour les adoptants comme pour les bénéficiaires, il est souvent difficile d'isoler la

⁶ Classification des biens en fonction de la disponibilité de l'information : bien de recherche (info disponible avant l'achat), bien d'expérience (info disponible après achat et consommation) et bien de confiance (info indisponible même après consommation).

contribution de l'adoption de cette technique (effet marginal) par rapport aux pluies naturelles ce qui justifie pour eux son caractère aléatoire.

Le caractère collectif des effets environnementaux renforce généralement ce manque de visibilité, sauf exceptions comme dans le cas d'une innovation améliorant la qualité paysagère. Dans le cas de cette recherche, l'un des aspects souhaités à travers l'ensemencement des nuages est aussi l'amélioration du couvert végétal mais compte tenu du fait qu'il y a aussi des pluies naturelles, l'effet net est plus difficile à observer pour l'ensemble des parties prenantes. L'adoptant est donc souvent dans l'incapacité de vérifier les effets environnementaux générés par son adoption. Il en est de même pour les parties intéressées par l'adoption d'innovations environnementales qui sont généralement dans l'incapacité d'observer l'adoption (hormis s'il s'agit d'un élément physique) et sa mise en œuvre effective ou son "assimilation" qui est la véritable génératrice des effets environnementaux.

Le "**fossé d'assimilation**" décrit l'écart entre les potentialités offertes par l'innovation entre les mains d'un expert et les réalisations effectivement constatées lors de l'utilisation par un adoptant classique. Du point de vue des concepteurs ou des experts, certaines innovations environnementales permettent des améliorations considérables de la gestion environnementale, mais leur mise en œuvre par des non-experts se traduit généralement par des réalisations nettement en dessous de leurs potentialités. Cela s'est traduit au Burkina Faso par la mise en place de l'opération « Saaga ». Cette phase opérationnelle était marquée, de l'avis même des responsables de la structure, par un manque de qualification du personnel conduisant parfois à des effets non désirés tels que les nuagesensemencés qui produisent la pluie mais dans des zones non ciblées qui parfois peuvent frôler avec les territoires limitrophes d'autres pays.

Dans un contexte similaire, Doussan (1998) souligne l'extrême difficulté à vérifier l'application de certaines pratiques environnementales "sauf à imaginer bien entendu, un officier de police judiciaire ou un agent assermenté, chargé de surveiller l'agriculteur d'un bout à l'autre de sa parcelle, et armé des moyens techniques lui permettant de vérifier la teneur en azote du lisier épandu, par exemple." D'une autre manière cela revient à positionner des agents disposant d'outils de pointe leur permettant d'évaluer la

pluviométrie obtenue après ensemencement et les mesures observées des rendements agricoles. Outre l'adoption en tant que telle, les conséquences environnementales sont dépendantes de nombreuses conditions et généralement mesurées à un niveau qui dépasse la contribution individuelle, avec une difficulté technique pour établir des chaînes de causalité ou d'imputabilité. C'est pourquoi dans cette recherche comme c'est le cas en général, on intègre d'autres facteurs (quantité d'engrais, taille du cheptel, température, etc.) qui peuvent agir de manière aléatoire et simultanément à l'application de la technique de sorte à influencer les résultats obtenus.

La visibilité des bénéfices environnementaux de l'adoption est souvent réduite par la déconnexion entre le contexte humain, temporel et géographique de l'exploitation agricole, halieutique, énergétique et celui des bénéficiaires de l'innovation environnementale. C'est pourquoi ces travaux prennent en compte dans les analyses et les recommandations la dimension sociale des retombées, l'aspect sanitaire et l'horizon temporel quant au maintien de l'innovation technologique pour la mobilisation des ressources en eau.

En effet, de nombreux processus de dégradation de l'environnement et de restauration sont relativement lents par rapport à l'échelle temporelle du producteur (plusieurs dizaines d'années). Ils concernent des espaces géographiques qui dépassent le site de l'exploitation d'origine où l'effet isolé est peut être peu visible et peuvent aller jusqu'à impliquer parfois des acteurs non présents à savoir les générations futures. En effet, à titre d'illustration, au jour d'aujourd'hui les résultats des analyses chimiques de l'eau peuvent être bons mais on ne sait pas ce que cela donnera à long terme si on continue à ensemercer chaque campagne hivernale. En outre, face aux conséquences sur l'agriculture avec les teneurs chimiques des différents produits utilisés (nitrates d'argent, ..), les experts reconnaissent qu'en cinq ans, il n'est pas possible de "distinguer une tendance d'évolution nette", les résultats constatés étant "en moyenne identiques" à ceux du début de l'opération (Inra, 1996 ; p.71).

Parfois, le degré de recoupement entre l'intérêt individuel (producteur) et collectif (bénéficiaires de l'environnement préservé) peut être relativement faible. En outre, les innovations environnementales relatives à l'agriculture nécessitent généralement une déclinaison locale pour être efficace, ce qui accroît parfois leur manque de visibilité pour un observateur extérieur. Les innovations classiques sont généralement conçues et analysées

par rapport à l'exploitation. En matière d'environnement, les innovations prennent généralement en compte une dimension territoriale qui s'étend au-delà des limites physiques ou administratives de l'exploitation agricole comme c'est le cas avec l'ensemencement des nuages.

De surcroît, à la différence de nombreuses innovations classiques qui ne requièrent pas nécessairement de changements structurels profonds, les innovations environnementales se caractérisent par des processus intangibles, particulièrement consommateurs de temps, de nouveaux modes organisationnels peu compatibles avec les logiques préexistantes (observation, raisonnement au cas par cas versus systématisation des pratiques), de ressources humaines qualifiées et de ressources financières (Morris et Winter, 1999 ; Nijkamp et al., 2001). C'est pourquoi pour mettre en place un programme de mobilisation des ressources en eau par ensemencement, il faut asseoir un arsenal logistique considérable nécessitant de gros investissements et également recourir à un personnel qualifié pour assurer son bon fonctionnement. Il faut aussi tenir compte de l'environnement social qui joue d'une certaine manière comme l'ont attesté certains travaux (Shippey, 2004)

De même en agriculture, sa pratique couplée au respect de l'environnement suppose des modifications profondes des routines des agriculteurs. Lorsque le réseau social environnant est particulièrement dense, le choix d'un individu pour l'application de l'innovation peut être contrarié par le contexte. Par exemple, choisir de ne traiter qu'au moment opportun peut être un important facteur de stress, notamment dans la phase de transition (période d'adaptation à la nouvelle technologie), surtout si les agriculteurs voisins pratiquent des traitements systématiques, vécus comme des moyens de s'assurer contre le risque de variations de rendement (Grolleau, 2001). La rationalité de l'agriculteur et ses décisions sont influencées par ces propriétés particulières des innovations environnementales, lesquelles justifient parfois une intervention étatique différente et généralement plus soutenue des pouvoirs publics dans la promotion des innovations environnementales.

De plus, la ligne de séparation entre bénéfices privés et tangibles et bénéfices collectifs et intangibles est étroitement dépendante du contexte institutionnel. Ainsi, de nouvelles lois

d'information du public ou anti-pollution peuvent contribuer à accroître l'attractivité de certaines innovations environnementales.

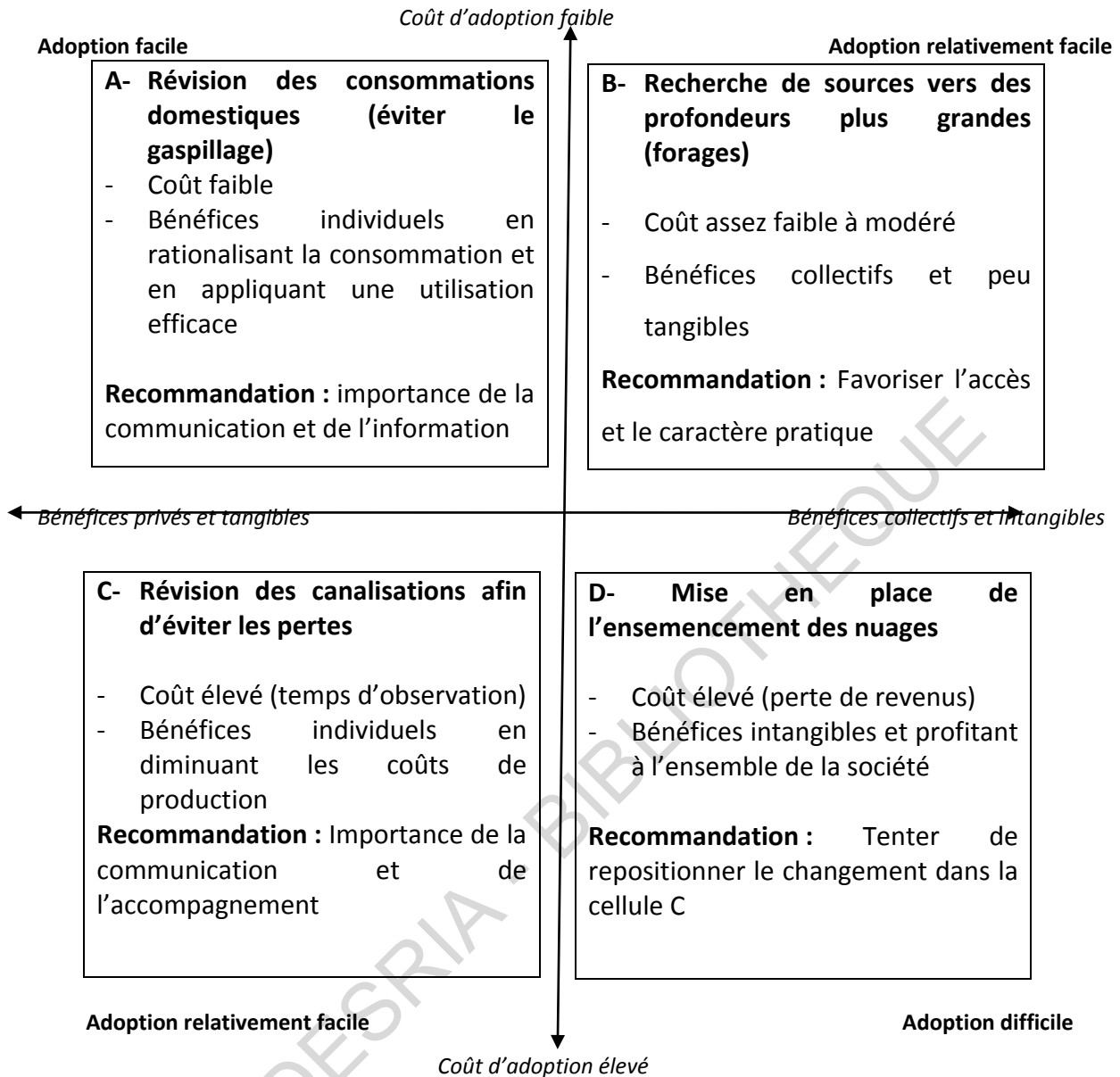
Par exemple, l'adoption de l'ensemencement des nuages comme outil légal de mobilisation des ressources en eau au vue de son succès dans les pays sahéliens (cas du Maroc) a permis de le faire accepter d'une certaine manière par les populations comme l'alternative à même de répondre au besoin d'eau. De même, la définition et la protection des droits de propriété relatifs à l'utilisation de l'expression "agriculture biologique" a permis le développement crédible et profitable de ce mode de production.

La relative invisibilité des effets environnementaux de certaines innovations ne doit pas être confondue avec la visibilité des effets commerciaux. En effet, malgré une certaine invisibilité, certaines innovations peuvent être caractérisées par des bénéfices commerciaux tangibles. Les bénéfices économiques de l'amélioration de la production hydroélectrique au Guatemala (Griffith, 1994) permettent de rendre visibles les effets bénéfiques de l'ensemencement des nuages dont l'efficacité était mise en doute. Egalement, les produits issus de l'agriculture biologique permettent d'illustrer ce phénomène d'intangibilité des effets environnementaux et de tangibilité des effets commerciaux.

Cette tangibilité des effets commerciaux peut ainsi devenir l'un des paramètres moteurs de l'adoption. Néanmoins, le manque de visibilité des effets environnementaux rend particulièrement difficile et onéreux en termes de coûts de transaction la transmission de la valeur environnementale créée lors des étapes précédentes de la chaîne. Ces coûts de transaction peuvent notamment provenir de la nécessité de définir, de vérifier et de signaler de manière crédible les caractéristiques environnementales produites c'est-à-dire les preuves concrètes des effets de l'innovation environnementale (Grolleau, 2000).

En s'inspirant des travaux de Rangan et al. (1996) relatifs au marketing social, on peut proposer une matrice synthétique de l'adoption des innovations environnementales en fonction du coût individuel perçu et du caractère privé et tangible des répercussions environnementales (Figure 1). On met en évidence quelques recommandations susceptibles de guider les promoteurs des innovations environnementales dans la construction de leurs stratégies.

Figure 6 : Matrice d'adoption des innovations Environnementales



Par exemple, la cellule D correspond à la situation la plus spécifique où les méthodes habituelles de diffusion d'une innovation peuvent s'avérer économiquement inefficaces mais socialement efficaces. En effet, étant donné l'association d'un coût d'adoption élevé et de bénéfices essentiellement collectifs, le changement est généralement difficile à promouvoir. Les promoteurs peuvent tenter de repositionner l'innovation la cellule D vers la cellule C en augmentant la perception des bénéfices privés susceptibles d'être induits par l'innovation. Dans les cas précités, la différenciation environnementale des produits et/ou la possibilité de bénéficier d'une rémunération spécifique, par exemple dans le cadre d'un Contrat Territorial d'Exploitation, peuvent contribuer à compenser les pertes privées générées par l'adoption

de ce type d'innovations environnementales. C'est le cas lorsque les retombées sont excellentes pour une zones et moins bonnes pour une autre comme c'est le cas parfois pour l'ensemencement des nuages.

Il faut noter que cette vision s'applique surtout lorsque ces innovations environnementales sont appliquées avec un objectif de rentabilité financière : ***c'est la logique de l'économie de marché ou encore une approche néoclassique.***

Dans le cas où c'est la rentabilité sociale qui prime, la cellule D paraît être la plus intéressante et par la suite celle de C dans une moindre mesure. Mais de telles positions nécessitent qu'on se trouve non plus sur un marché concurrentiel mais dans une dimension sociale où ce sont l'Etat et les partenaires (bailleurs de fonds) qui sont les principaux acteurs : ***c'est la vision interventionniste d'obédience keynésienne.***

2.3.1.5 Synthèse

Nous avons montré que les innovations environnementales présentent des spécificités susceptibles de contraindre les logiques et modèles d'adoption génériques. Les innovations environnementales proposées aux systèmes agropastoraux ou ayant trait de manière directe (telle que l'ensemencement des nuages) dépassent généralement le cadre d'une simple transaction marchande relative à un produit pour englober l'exploitation dans son territoire, d'où l'existence de particularités économique et technique pour les promoteurs. En effet, dans le cas de l'ensemencement des nuages, il faut tenir compte de l'espace géographique pour que cela ne soit pas source de perturbation dans un Etat voisin.

En outre, ces demandes se caractérisent par des niveaux croissants d'intangibilité par rapport aux innovations classiques qui concernaient essentiellement des aspects intrinsèques affectant la profitabilité économique des structures de production, et donc relativement bien régulés par le mécanisme marchand. Cette analyse est également fortement influencée par une conception statique de l'innovation comme un dispositif technique s'insérant directement dans le système préexistant, alors que la réalité est souvent plus complexe en terme d'effet d'apprentissage, de modification des routines, d'acquisition de nouvelles compétences, etc. Au titre de l'ensemencement des nuages, cette innovation apporte un supplément important compte tenu du fait que la technologie se

perfectionne sans cesse. Cela permet de ne pas tomber dans la routine et d'acquérir assez régulièrement de nouvelles compétences grâce aux transferts de technologies.

Il faut noter que cette analyse comporte également des implications susceptibles d'être lues sous l'angle normatif par les groupes d'intérêts souhaitant encourager l'adoption et la diffusion d'innovations environnementales dans une économie de marché. Par exemple, les politiques publiques d'encouragement à l'adoption d'innovations environnementales, outre leurs éléments classiques, sont interrogées sur leur capacité à renforcer l'attractivité privée des innovations environnementales en encourageant des stratégies "win-win-win" tangibles. Tout en partageant des points communs avec les innovations commerciales, les innovations environnementales nécessitent l'élaboration d'un cadre théorique bien adapté, capable de prendre en compte leurs spécificités dans la sphère socioéconomique.

2.3.2 APPROCHE DES THEORIES DEVELOPPEES SUR LES EFFETS DE L'ENSEMENCEMENT

L'ensemencement des nuages est un concept assez récent dans le domaine de l'économie. Il a donné naissance à plusieurs théories qui se sont développées ces dernières années avec l'utilisation de plus en plus accrue de cet outil.

Afin d'apporter des réponses aux différentes interrogations, cette recherche est basée sur la méthode du changement de productivité. Le fondement de cette théorie établit la possibilité de déterminer la valeur générée par l'utilisation du bien environnemental (sols, eau, végétation etc.) en fonction de la variation de la productivité obtenue avec et sans utilisation de la technique d'ensemencement des nuages. En effet, pour ce qui concerne les rendements des sols en agriculture (BOJÖ, 1991), la production de l'eau aussi bien pour la pêche que l'hydroélectricité et les gains procurés par la végétation, nos différentes mesures nous donnerons l'état de variation de production de ces différents biens environnementaux. Ainsi, en fonction des effets marginaux des pluies provoquées sur la productivité des sols, sur l'utilisation de l'eau (pêche et hydroélectricité) et sur le changement de la végétation nous pourrions évaluer économiquement les différentes variations engendrées par cette technologie de modification artificielle du temps.

La vulnérabilité aux fluctuations climatiques est considérablement plus grande dans les pays directement dépendants de la production agricole pour nourrir leurs populations que dans les autres (VANZYL, 1993). L'ensemencement des nuages est un instrument qui a pris de l'ampleur depuis le début du 20^{ème} siècle afin de faire face aux difficultés d'approvisionnement en eau sur un grand nombre de régions de la planète. L'approvisionnement concernait principalement non seulement les besoins directs humains, mais également les besoins agricoles. Face aux diverses expériences menées à travers la planète, les différents chercheurs ont abouti à un ensemble de résultats qui leur ont permis d'établir une théorie en rapport avec l'agriculture. C'est ainsi que selon BULLER (1981)⁷, PERRY (1986) et GARCIA (1986), l'ensemencement des nuages contribue à améliorer la production agricole et le revenu des agriculteurs dans la zone ensemencée.

En poursuivant les études d'impacts économiques de l'ensemencement des nuages sur la pêche, les différents travaux sont parvenus à des résultats assez proches. En effet, la FAO d'abord en 1996, puis en 2006 a montré en Afrique de l'Ouest que ce sont les Etats qui disposent de plus grandes ressources en eau qui ont une pêche plus prolifique. Elle a par ailleurs matérialisé cette différence en comparant la contribution de la pêche au PIB pour ces Etats. LAË (2002) a confirmé cette théorie en observant une corrélation positive forte entre le volume des captures et le débit sur le delta intérieur du fleuve Niger situé au Mali. En outre, l'eau constituant le milieu naturel et vital des espèces halieutiques, nous pouvons alors supposer que des quantités importantes d'eau constituent un facteur d'accroissement numérique de cette population.

La production hydroélectrique est également une pratique qui dépend intrinsèquement des quantités d'eau disponibles. Son mode de fonctionnement consiste à faire turbiner un volume d'eau important afin d'en retirer de l'énergie électrique. C'est pourquoi en 2007, suite à une sécheresse, les autorités australiennes ont suspendu leur production hydroélectrique. Cette situation a été vécue au Burkina Faso en 1998 où, suite à un déficit pluviométrique important, la production hydroélectrique a été réduite au minimum au niveau des sites de production que sont les barrages de Bagré et de la Kompienga. De plus

⁷ Une extension de l'effet de l'ensemencement a été faite sur le revenu individuel des zones ensemencées et celui de toute une région sous l'hypothèse d'inélasticité de la demande pour les denrées agricoles.

grandes quantités d'eau disponibles permettent donc aux centrales de production de turbiner davantage et par conséquent d'offrir une plus grande quantité d'énergie. Nous pouvons ainsi dire que selon la théorie de la production hydroélectrique, le débit d'une retenue d'eau est corrélé positivement avec le niveau de production. De manière conventionnelle, le calcul de l'énergie hydroélectrique se fait par la formule suivante :

$$E = V \times T \times G \times H \times \eta \times \rho$$

Où,

- E est l'énergie produite,
- V représente le débit de la retenue d'eau,
- T le temps pendant lequel est faite la production
- G la constante gravitationnelle,
- H qui représente la hauteur ou le dénivellement,
- η le rendement de la production,
- et ρ représente la densité de l'eau.

Nous voyons bien que pour un débit nul, il ne peut y avoir de production hydroélectrique et un débit élevé contribue à accroître la valeur de l'énergie produite.

L'ensemencement des nuages en accroissant le niveau des précipitations, contribue sans aucun doute à restaurer un couvert végétal et par extension la biodiversité. En effet, la biodiversité, qui se définit comme l'ensemble des gènes, des espèces et des écosystèmes d'une région (WRI /WCU/UNEP, 1992), est influencée par certains paramètres climatiques. Bien que le changement d'habitat dû à l'action de l'Homme, soit une variable qui influence la biodiversité, les facteurs environnementaux peuvent contribuer à l'améliorer ou à la détériorer (ASAFU-ADJAYE, 2003). Parmi ces facteurs, nous pouvons citer le niveau de la pluviométrie qui agit aussi bien sur le maintien des écosystèmes, la préservation des espèces que sur les gènes rencontrés. Cette influence s'accompagne d'une incidence sur la vie économique des populations. En effet, l'amélioration du pâturage des espaces boisés de même que la fertilité des sols constituent un gain non seulement en faveur du bétail, mais aussi des rendements agricoles.

Ces différentes théories développées, aussi bien au plan innovation qu'au niveau des effets de l'utilisation de cette technologie, constituent la base du choix des variables et de leur combinaison (modélisation) pour effectuer une vérification empirique des hypothèses de recherche.

2.3.3 VARIABLES ET INDICATEURS

✓ Pour évaluer empiriquement l'incidence de l'ensemencement des nuages sur la l'agriculture en termes économiques, nous allons recourir au modèle utilisé par Buller *et al.* (1981). Nous allons renforcer ce modèle par des paramètres essentiels selon la théorie économique en matière de rendements agricoles (engrais, répartition temporelle). Ce modèle se présente comme suit :

$$Y = \alpha + \beta C \quad (1)$$

Où β est la matrice uni ligne des coefficients, C la matrice uni colonne de variables et α le terme constant. De manière plus explicite, on a des fonctions non linéaires selon les différentes spéculations :

$$y_{it} = f(c; pl_{it}; trend; h_{it}; engr_{it}; njrp_{it}; \varepsilon_{it}) \quad (2)$$

$$\ln y_{it} = c + \alpha_1 \ln pl_{it} + \alpha_2 trend + \alpha_3 \ln h_{it} + \alpha_4 \ln njrp_{it} + \alpha_5 \ln engr_{it} + \varepsilon_{it} \quad (3)$$

$$y_{it} = k + \delta_1 \ln pl_{it} + \delta_2 trend + \delta_3 \ln h_{it} + \delta_4 \ln njrp_{it} + \delta_5 \ln(pl - engr)_{it} + \mu_{it} \quad (4)$$

$$y_{it} = u + \theta_1 \ln pl_{it} + \theta_2 pl_{it}^2 + \theta_3 trend + \theta_4 njrp_{it} + \theta_5 (pl - engr)_{it} + \theta_6 (pl - njrp)_{it} + \mu_{it} \quad (5)$$

Ainsi, nous estimerons ces trois équations pour les différentes céréales (maïs, mil et sorgho). Nous aurons des données de panels où les provinces constitueront les individus enquêtés sur plusieurs années pour la production agricole.

Les autres indices se définissent comme suit :

i = individu c'est-à-dire le site d'enquête,

t = année,

Pour ce qui concerne les variables on a :

Y représente le rendement de la production agricole,

Pl le niveau de la pluviométrie moyenne annuelle,
Trend est la variable qui est une suite arithmétique de raison 1,
H est la température moyenne annuelle de la période hivernale,
Njrp est le nombre de jours de répartition de la pluie (répartition temporelle),
Et Eng est la variable qui représente la quantité d'engrais utilisée par produit agricole par année.

Nous avons affaire à une forme quadratique car il a été montré que les éléments du climat que sont la pluviométrie et la température ont non seulement des effets directs sur les rendements agricoles mais peuvent également avoir des effets secondaires non négligeables. En outre, Buller et al.(1981), mettent en exergue l'effet combiné des variables climatiques sur les rendements agricoles.

Par la suite, pour estimer les effets de l'ensemencement sur les rendements agricoles nous allons dériver les effets marginaux de la pluviométrie sur les rendements par culture. Ces effets marginaux, pour chaque céréale et pour chaque sous période, permettront d'évaluer l'évolution des rendements. Ces rendements comparés mettront en relief l'effet de l'ensemencement sur les différentes spéculations.

✓ Afin de déterminer l'impact économique des pluies provoquées sur la pêche, nous utiliserons le modèle employé par LAË et al. (2000) qui ont mis au point un modèle dynamique permettant de prévoir les captures en fonction de l'évolution du débit comme variable. Nous utiliserons un modèle dynamique dérivé de ce modèle en faisant recours à des données mensuelles.

En outre, le modèle utilisé est une dérivée du modèle de Fox qui met en relation la production et l'effort de pêche tout en tenant compte du stock à l'origine. Le modèle de Fox est plus adéquat que celui de Schaefer car le niveau des captures (production) ne peut être nul même quand l'effort de pêche est très grand. Ce qui est réel car le poisson est une ressource renouvelable, ce qui garantie un niveau non nul même quand les conditions sont critiques.

On a donc les modèles suivants :

$$c_t = \sum_{i=0}^2 \beta_i y_{t-i} + \alpha A_t + \varepsilon_t \text{ Avec } i = 0, 1, 2 \quad (1)$$

$$C = PUE \times f = U_\infty f \times e^{-bf} \Leftrightarrow \ln(C) = \ln U_\infty + \ln f - bf \quad (2)$$

Nous poserons le modèle combiné comme suit :

$$C = U_\infty f \times e^{-bf + \sum_{i=0}^2 \beta_i y_{t-i} + \alpha_j A_t} \quad (3) \Leftrightarrow$$

$$\ln(C_t) = \ln U_\infty + \ln f_t - bf_t + \sum_{i=0}^2 \beta_i y_{t-i} + \alpha_j A_t + u_t \quad (4)$$

$$\ln(C_t) = k + \ln f_t - bf_t + \sum_{i=0}^2 \beta_i y_{t-i} + \alpha_j A_t + u_t \quad (5)$$

Où C_t représente les captures issues de la pêche au mois t,

f_t représente l'effort de pêche mensuel pour le mois t,

A_t est le vecteur des variables Pir_t et Zig_t qui sont respectivement le prélèvement d'eau pour irrigation et le volume d'eau enregistré au barrage de Ziga.

Y_t le débit moyen du barrage au mois t, et Y_{t-i} son débit moyen au mois t-i.

Une des vocations de base du barrage de Bagré est l'irrigation ; c'est pourquoi des quantités d'eau sont utilisées afin d'irriguer la vallée pour les diverses productions céréalières. Par ailleurs, le barrage de Ziga, situé en amont de Bagré et mis en eau en 2000 suivant l'écoulement des eaux du nord vers le sud dans le bassin du Nakambé, a une influence probable sur le remplissage du barrage de Bagré.

Le retard d'ordre 2 de la variable y_{t-i} (volume d'eau contenu dans le barrage au mois t-i) comme matérialisé dans le modèle, s'explique par le fait que les captures d'un mois, notamment en fin de saison sèche et hivernale (mai et octobre), dépendent du niveau de l'eau aux périodes précédentes et du mouvement cyclique des poissons. Suivant le volume d'eau de la retenue, les poissons ont tendance à changer de comportement en rentrant en hibernation pour certaines espèces notamment les silures. C'est pourquoi on peut présager qu'en octobre avec une bonne pluviométrie aux mois précédents (août – septembre) les captures peuvent être importantes. Par contre, au mois de mai, marquant la fin de saison

sèche, l'on peut entrevoir de faibles captures car le niveau des eaux est très bas au mois de mars et avril à cause de la décrue amorcée depuis le début de l'année (janvier).

Nous considérerons ces périodes à partir de l'année 1994 à 2003, c'est-à-dire depuis le début de l'exploitation du barrage de Bagré. Le choix de cette période par le fait qu'elle comporte deux sous périodes (janvier 1994 à avril 1998 et mai 1998 à décembre 2003). La première sous période est sans intervention du programme tandis que la deuxième sous période est marquée par l'intervention du programme. Cette dernière, bien que se faisant seulement en hivernage, a un impact même sur la période sèche car l'eau supplémentaire obtenue pendant la saison des pluies permet plus tard (novembre à mars) de pouvoir toujours pêcher mieux que par le passé à cause de la ressource en eau plus abondante à cette période de l'année. Bien que l'intervention du programme se poursuive jusqu'en 2011, la limitation à l'année 2003 se justifie par le but d'avoir deux sous périodes équilibrées soit respectivement 4 ans et demi et 5 ans et demi. Le prolongement jusqu'en 2011 aurait donné une période avec intervention de plus de dix ans comparée à celle sans intervention du programme de 4 ans et demi.

Le recours à une variable binaire sera fait dans l'analyse pour marquer l'utilisation de l'ensemencement ou non d'un mois à l'autre. Ceci montre que ce sera à partir de mai 1998 que l'on introduira cette variable à chaque mois ou l'intervention sera faite car c'est à partir de ce mois que le programme a commencé ses interventions.

Le coefficient associé à cette variable binaire donnera une appréciation de l'effet de l'utilisation de cette technique sur le niveau des captures pendant la période d'utilisation. Sur la base de ces différences, nous évaluerons la variation de la production hydroélectrique induite par l'intervention du programme.

✓ L'évaluation de l'incidence des pluies provoquées sur la production hydroélectrique se fera au moyen de séries chronologiques. Compte tenu des diverses études qui montrent que le volume de l'eau est un facteur prépondérant nous partirons de l'équation universelle de calcul de l'énergie hydroélectrique qui a été précédemment présentée à savoir :

$$e = v \times t \times g \times h \times \eta \times \rho \quad (1)$$

A partir de cette équation nous obtenons le modèle double logarithme suivant :

$$\ln e_t = \alpha_0 + \alpha_1 \ln v_t + \alpha_2 \ln T_t + \alpha_3 \ln \eta_t + \varepsilon_t \quad (2)$$

La constante α_0 comprend la constante gravitationnelle ($g = 9,8N / Kg$), la densité de l'eau ρ et également la hauteur h qui sont toutes des constantes au niveau du site de production.

A partir de l'élasticité de la production d'énergie par rapport au débit

$$\alpha_1 = \frac{\partial \ln e_t}{\partial \ln v_t}, \text{ nous pourrions estimer la production additionnelle moyenne par année (pad)}$$

générée par un meilleur débit au niveau du barrage.

Le coefficient associé à la variable binaire représente l'effet marginal imputable au changement de régime pluviométrique.

✓ La vérification empirique de la quatrième hypothèse (l'intervention du programme est sans effet sur la productivité du bois de forêt) sera faite à partir d'un modèle de biodiversité ASAFU-ADJAYE (2003).

Nous avons le modèle suivant : $V = D \times A^z$

Où V représente le volume de bois, A, la superficie de la zone étudiée, D et z des paramètres positifs. Cette équation, de la forme Cobb douglas, sera linéarisée comme suit :

$$V = [D(x)]^\varphi \times A^z \quad (1)$$

$$\ln V = \varphi \ln D(x) + z \ln A_t + \varepsilon \quad (2)$$

X représente le vecteur de variables qui ont un impact sur la végétation.

Dans notre cas de figure, les superficies des forêts classées varient peu donc $z \ln A_t$ est constante. En outre, les données sont des données panels pour lesquelles les individus sont les forêts des provinces du bassin Nakambé et ces données varient aussi dans le temps.

On a la relation générale suivante :

$$V_{it} = f(\ln pl_{it}; btl_{it}; dens_{it}; njrp_{it}) \quad (3)$$

Les variables se définissent comme suit :

V_{it} représente la productivité du bois de la forêt i et pour l'année t ,

Pl_{it} représente le niveau de la pluviométrie en millimètres reçu par la forêt i pendant l'année t ,

$Dens_{it}$ exprime la densité de la population dans la localité de la forêt i et à l'année t ,

$njrp_{it}$ exprime le nombre de jour de répartition des pluies pour la forêt i et à l'année t .

Dans ce modèle, nous prendrons comme unité de temps, l'année ; car certaines variables telles que le nombre d'espèces végétales ou la superficie agricole sont généralement très peu fluctuantes d'un mois à l'autre. Nous pourrions donc faire une meilleure étude d'impact de ces variables si nous considérons leur évolution annuelle.

Le recours à ces différents modèles nécessite l'utilisation de données. Ces dernières seront utilisées en fonction de l'échantillonnage effectué et du contexte géographique. C'est pourquoi, la description de la méthodologie utilisée est nécessaire. Tel sera l'objet de la section suivante.

2.4 METHODOLOGIE

Cette partie de la recherche permet de présenter les conditions dans lesquelles l'étude a été réalisée. Ainsi, seront présentés le cadre physique et géographique, la procédure d'obtention des données et leur nature ainsi que l'approche d'analyse par le changement de productivité.

2.4.1. ECHANTILLONNAGE

2.4.1.1 Cadre de l'étude

Ce travail de recherche s'effectue avec la collaboration du « Programme Saaga », structure menant les différentes opérations d'ensemencement sur l'ensemble du territoire national. Dans le cadre d'un large programme d'évaluation, le « Programme Saaga » a mis en place une équipe multidisciplinaire chargée de réaliser cette tâche. Cette équipe est composée de physiciens, de chimistes, d'agronomes, de sociologues, d'environnementalistes et d'économistes. Dans ce contexte de multidisciplinarité, le volet socioéconomique dans lequel s'inscrit cette recherche a pu collaborer avec les autres volets tels ceux des agronomes pour l'agriculture, des environnementalistes pour la végétation et également des résultats pour ce qui se rapporte à la pollution de la zone cible. Cette collaboration s'est faite surtout sur l'expertise apportée par ces différentes composantes dans certains résultats obtenus.

2.4.1.2 Choix de la zone d'étude

Situé dans la partie centrale du pays (voire en annexe carte bassin du Nakambé, figure 8) et s'étalant depuis le nord ouest dans la province du Yatenga, jusqu'au sud à la frontière du Togo, le bassin du Nakambé a une superficie de 41 407 Km². Le sol y est en majeure partie latéritique et il comporte deux grandes parties : la première située dans la partie sahélienne où la pluviométrie est inférieure à 600mm par an et la deuxième qui a un climat nord soudanien où la pluviométrie est comprise entre 600 et 900 mm d'eau par an.

Le bassin du Nakambé, par son fleuve appelé « volta blanche », draine toute la partie centrale et le nord du plateau central et ne coule que pendant la saison des pluies. Les premiers écoulements intermittents peuvent se produire en mai, mais ce n'est qu'en juillet/août que les débits deviennent permanents à la station de Wayen et se renforcent vers l'aval pour atteindre au barrage de Bagré un débit moyen de 145 m³/s en août.

En effet, cette région est caractérisée par le barrage de Bagré, deuxième plus grande retenue d'eau du pays s'écoulant sur plus de 500 Km et drainant plusieurs affluents. Situé entre le centre Est et le centre Sud du pays, le barrage de Bagré est à 230 Km de Ouagadougou. Sa construction a débuté à partir de 1992 et sa mise en eau est intervenue en 1994. Cette retenue a une capacité de 1,7 milliard de mètres cubes et a une vocation agricole et hydroélectrique. Il s'étend sur 25000 ha mais sa superficie moyenne observée depuis sa mise en eau jusqu'à ce jour est de l'ordre de 17.000 hectares. Sa cuvette versant occupe 33.000 hectares. Le barrage possède un potentiel halieutique estimé entre 1200 et 2 000 tonnes de poisson par an.

Le barrage de Bagré est partagé à la fois par les provinces du Zoundwéogo et du Boulgou. Autour du barrage, les activités économiques phares des populations riveraines sont l'agriculture de subsistance (mil principalement), les cultures irriguées et maraîchères développées avec la retenue d'eau et également la pêche. Ce barrage constitue la plus importante source de production hydroélectrique du pays. En 2009, la production hydroélectrique constituait 19% de la production énergétique nationale avec une part de 11% fournie par ce barrage contre 7,15% pour le barrage de la Kompienga et 0,45% pour les mini centrales de Tourni et Nofila à l'Ouest du pays (Sonabel, 2010).

Figure 7 : Carte du Bassin Nakambé

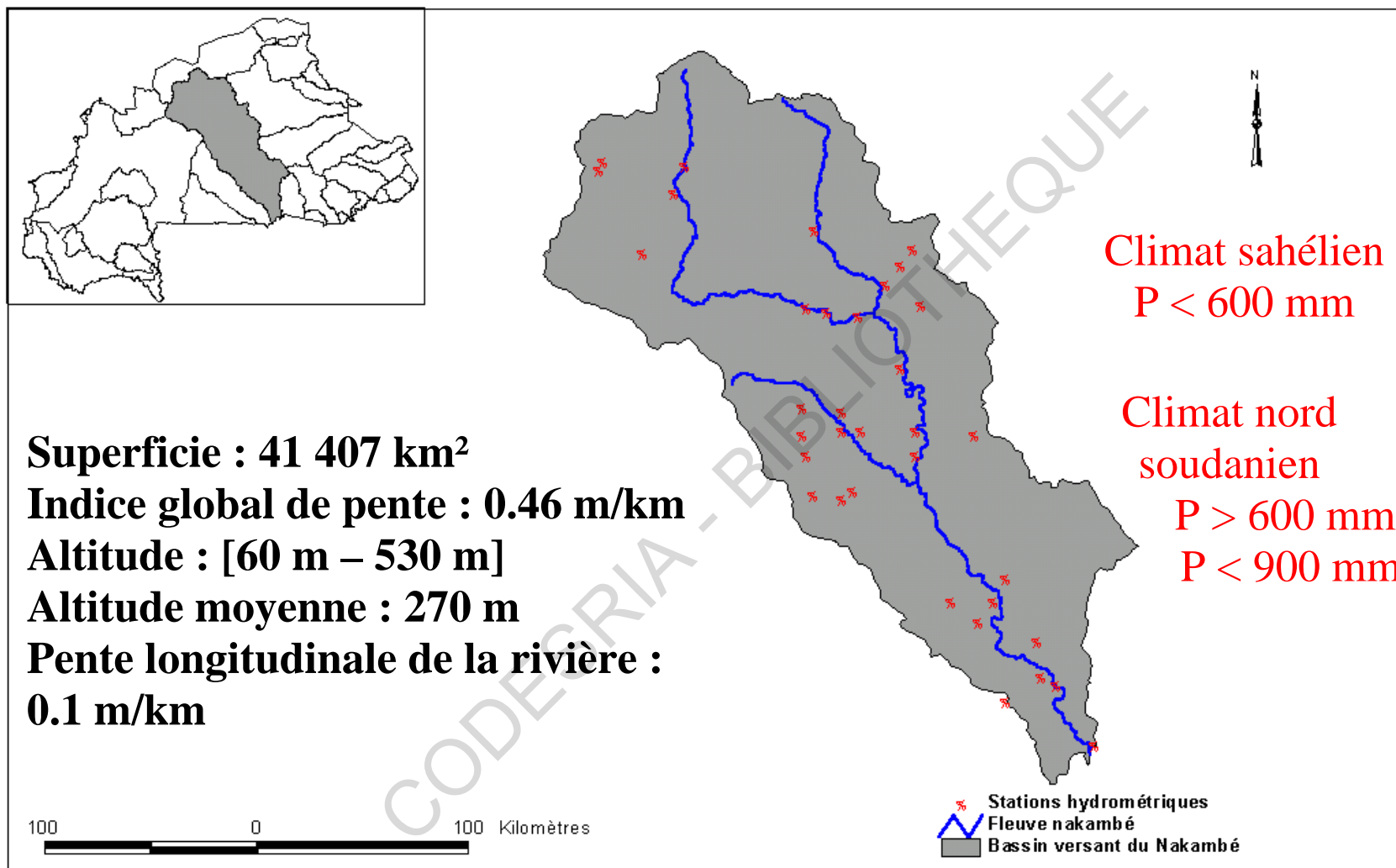
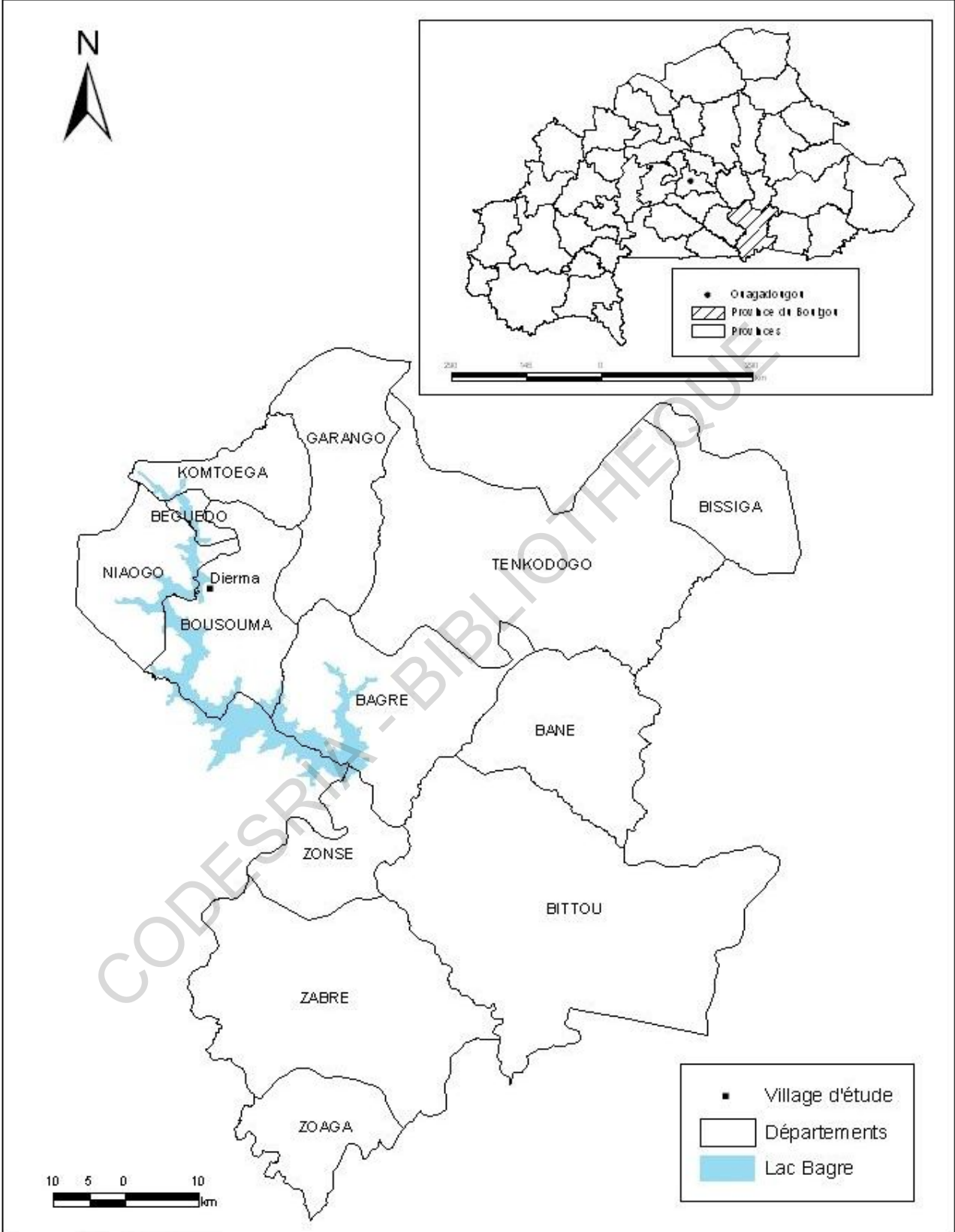


Figure 9 : Carte de situation du barrage de Bagré



Source: IGB, BNDT 2002

Le régime du Nakambé est fortement soumis aux précipitations qui influent grandement sur ses variations. La saison hivernale marque la période de collecte des eaux. Les nombreux affluents, notamment ceux de la zone de Bagré (le Koulipélé, le Tcherbo, le Doubégué, la Béga, etc.) et les lacs Bam et Dem en amont, y drainent leurs eaux. Cependant, à partir du mois de décembre, le niveau des eaux baisse et durant les mois les plus secs (mars et avril notamment), le cours d'eau n'est plus qu'un chapelet de mares. La mise en eau du barrage de Bagré en 1994 a permis de réguler en aval le Nakambé. Il faut noter que de nombreux barrages sont construits en amont de Bagré (barrage de Ziga, barrage Oumarou Kanazoé) et réduisent par conséquent de façon notable son approvisionnement. A cela s'ajoutent des pertes importantes par évaporation (entre 2600 et 3000 mm/an) et évapotranspiration (entre 1800 et 2200 mm/an).

La vallée du Nakambé par son régime naturel offre de nombreux avantages pour son exploitation mais elle est toutefois handicapée, comme déjà souligné, par la prolifération d'insectes vecteurs de maladies. Toutes ces potentialités ne sont pas passées inaperçues. D'abord les populations locales n'ont pas hésité depuis de longues dates à exploiter la décrue pour leurs activités de pêche car c'est une période favorable. En outre, suite aux grandes sécheresses des années 1972 et 1973, l'Etat a procédé à l'assainissement de la vallée et y a entrepris des études qui ont abouti à la réalisation d'un aménagement hydro-agricole en aval du barrage de Bagré.

Notre étude s'effectuera exclusivement dans le bassin du Nakambé. Ce choix se justifie dans la mesure où, depuis la mise en place de « l'opération Saaga » en 1998 jusqu'à nos jours, cette zone a toujours été une zone cible pour l'ensemencement des nuages. De surcroît, cette région offre des caractéristiques particulières telles : la présence d'une des principales retenues d'eau du pays : le barrage de Bagré, une exploitation rizicole importante et des activités variées avec une pratique importante de la pêche. Les autres régions du pays bénéficient du programme de nos jours mais seulement depuis un temps assez réduit (5 ans maximum) et offrent par conséquent des possibilités d'évaluations moins marquées que le bassin du Nakambé.

2.4.1.3 Choix des provinces

L'étude couvre une partie du plateau central et du sud du pays. En effet, les zones de recherche sont des provinces issues toutes du bassin du Nakambé. Il s'agit des provinces du Bazèga, du Boulgou, du Ganzourgou, du Kouritenga, du Passoré, de l'Oubritenga, du Zoundwéogo ainsi que celle du Kadiogo.

Le Ganzourgou, avec Zorgho comme chef lieu, est une province du Burkina Faso située à l'Est de la capitale avec une superficie de 4173 Km². Elle est limitée à l'Est par les provinces du Boulgou et du Kouritenga avec laquelle elle entretient des relations de parenté à plaisanterie, à l'Ouest par les provinces du Kadiogo et d'Oubritenga, au nord par celles du Sanmatenga et du Namentenga, au Sud par les provinces sœurs du Zoundwéogo et du Bazèga. Son relief, dominé par de petites élévations en chaîne avec une végétation peu arborée et herbeuse, est caractéristique de celui d'une zone soudanienne. En début de saison pluvieuse, c'est un paysage très attrayant propice aux promenades qu'il offre à ses visiteurs ; sa pluviométrie moyenne estimée n'excède pas les 700mm d'eau de pluie par an. L'économie de la région, essentiellement agropastorale, a bénéficié de l'appui du projet d'Aménagement des Vallées des Voltas (AVV), éleveurs et agriculteurs ayant en commun des objectifs non antagonistes. L'état de la province est caractéristique de celui d'un pays en voie de développement nécessitant une modernisation et une ouverture vers d'autres domaines davantage porteurs. Au plan éducatif, la province compte huit établissements secondaires d'enseignement général, cent soixante écoles primaires, deux écoles satellites, pour un taux de scolarisation de 46%.

L'Oubritenga est située sur le plateau central, au nord Est de la capitale et son chef lieu est Ziniaré. Avec une superficie de 2750 Km², elle est une province essentiellement agricole et pastorale avec une végétation dominée par des savanes. Elle est caractérisée par une pluviométrie moyenne annuelle comprise entre 600 et 900 mm, une saison des pluies de 4 à 5 mois environ. Les amplitudes thermiques diurnes et annuelles sont moins importantes que dans la partie nord, et les évapotranspirations potentielles y sont plus modérées. En 2008, le taux de scolarisation brut s'élevait à 70,8% (MEBA, 2008). L'agriculture pratiquée, est en

majorité une agriculture de subsistance dont l'intégration dans l'économie marchande n'est pas encore totalement effective. La production agricole est réalisée en très grande partie dans des petites exploitations traditionnelles gérées par le chef de ménage.

La province du Zoundwéogo, est située dans la partie Sud du Burkina Faso et son chef lieu est Manga. Elle a une superficie d'environ 3453 km² et est limitée à l'Ouest par les provinces du Bazèga et du Ziro, à l'Est par la province du Boulgou, au Nord par la province du Ganzourgou, au Sud par la province du Nahouri. Le relief est essentiellement formé par une vaste pénéplaine inclinée au Sud. L'altitude moyenne est de 250 à 300 mètres. La présence du barrage de Bagré à l'Est influence beaucoup son environnement. Le climat est caractérisé par une saison des pluies de cinq mois (mi-mai à mi-octobre) dominée par les vents de mousson. La saison sèche dure sept mois et est accompagnée de l'harmattan. Les précipitations sont comprises entre 750 mm et 900 mm. La moyenne mensuelle pluviométrique connaît des fluctuations ces dernières années. Le réseau hydrographique de la province est constitué par deux principaux cours d'eau que sont le Nazinon au Sud-ouest et le Nakambé à l'Est. Ces cours d'eau sont temporaires mais la présence du barrage de Bagré permet de parer aux difficultés liées à l'eau. Au plan socioéconomique, le taux brut de scolarisation était de 64,7% en 2007 (MEBA, 2008) et l'agriculture occupe près de 90% de la population active et est dominée par les cultures céréalières. L'élevage vient en seconde position avec notamment les petits ruminants.

La province du Boulgou, avec Tenkodogo pour chef lieu, est limitée au nord par les provinces du Ganzourgou et du Kouritenga, à l'ouest par le Koulpélogo, à l'ouest par la Zoundwéogo et le Nahouri et fait frontière au Sud avec le Togo et le Ghana. Elle est située plus au Sud que les autres provinces avec un climat moins rude et bénéficie également du barrage de Bagré. Sa superficie est de 6852 km² et l'activité principale est l'agriculture mais aussi avec un potentiel pêche non négligeable. L'agriculture est essentiellement vivrière avec les céréales (mil, sorgho rouge et blanc, maïs et riz) avec toutefois quelques cultures de rente (arachide, coton, niébé, soja, sésame et voandzou). Son taux brut de scolarisation est 70,9% (MEBA, 2008). La province est caractérisée par une pluviométrie moyenne annuelle supérieure à 900 mm, une saison des pluies pouvant atteindre les 6 mois, des amplitudes diurnes et annuelles

de températures et des évapotranspirations potentielles faibles. La végétation est de type soudanien comportant diverses formations. On observe souvent des savanes boisées en voie de dégradation avec tout de même quelques forêts galeries le long des principaux cours d'eau (Nakambé).

Le Passoré, avec Yako comme chef lieu, se situe au Nord de la capitale et au Sud de la région du nord. Elle appartient à la région du nord et est la province la mieux arrosée de la région. La tendance est d'environ 700 mm de pluie par an. Rarement la quantité d'eau est en dessous de 600 mm. Le nombre moyen de jours de pluie par an pour la province varie entre 40 et 50 durant la période hivernale mais avec une irrégularité et une mauvaise répartition de la pluviométrie. Le réseau hydrographique de la région est constitué de cours d'eau qui ont un régime temporaire et sont essentiellement des affluents et sous affluents du Nakambé. Economiquement, la population est à plus de 90% agriculteurs et/ou éleveurs. Quelques uns y associent la pêche très faiblement développée à cause des ressources en eau peu abondantes.

La province du Bazèga a pour chef lieu Kombissiri ; elle est limitée à l'Est par la province du Ganzourgou, au Sud par les provinces de la Sissili et du Zoundwéogo, à l'Ouest par les provinces, du Boulkiemdé et de la Sissili, puis au Nord par la province du Kadiogo. D'une superficie de 3644 Km², le Bazèga a un climat de type Nord-Soudanien, avec alternance d'une saison sèche (octobre à mai) et d'une saison pluvieuse (juin à septembre). La pluviométrie annuelle varie entre 600 et 900 mm. Les variations dans le temps et dans l'espace sont très importantes. La province du Bazèga est l'une des provinces du pays comportant un : réseau hydrographique important. Celui-ci se résume essentiellement au réseau fluvial du Nazinon et du Nakambé qui traversent la province. Ces deux fleuves sont d'une importance inégale, avec un écoulement intermittent notamment pendant la saison sèche. L'économie est basée sur le secteur primaire (agriculture et élevage). L'agriculture subit de fortes pressions avec la pression démographique de la province et les terres arables qui deviennent rares.

Sur le plan agricole, la province connaît donc un problème de terres arables dans la mesure où la pluviométrie et les valeurs agronomiques des sols ne permettent pas la mise en valeur

de n'importe quel type de sol. L'agriculture itinérante demeure l'activité économique essentielle de la majorité de la population du Bazèga. Les exploitations sont familiales et individuelles suivant des méthodes traditionnelles et modernes de culture. La province est une zone favorable à l'élevage du fait de la prépondérance des points d'eau. Malgré l'existence des potentialités pour la promotion de cette activité, cette dernière reste toujours traditionnelle. On distingue l'élevage de type sédentaire pour les petits ruminants (ovins, caprins) et l'élevage de type transhumant pour le gros bétail (bovins). La transhumance se fait à l'intérieur de la province aussi bien qu'à l'extérieur de celle-ci.

La Province de Kouritenga se situe dans la région centre-Est du Burkina Faso. Elle s'étend sur une superficie de 2 622 km² et son chef lieu est Koupéla. Le Kouritenga est limité à l'Est par la province du Gourma, au Sud par le Boulgou, à l'Ouest par le Ganzourgou et au Nord par le Namentenga et la Gnagna. L'activité principale des cultivateurs dans la région concerne la culture des céréales. Le mil, le sorgho blanc et rouge et le maïs y sont tous cultivés. Le cheptel est essentiellement constitué de bœufs, de chèvres et de moutons. Comme on le constate dans d'autres régions soudano-sahéliennes, le manque d'eau y cause beaucoup de problèmes, au niveau de l'agriculture et des autres activités quotidiennes. Les rivières coulent seulement durant 5 mois de l'année et les points d'eau sont bien surchargés. Pour se procurer l'eau pendant la saison sèche, les femmes doivent souvent marcher 3 à 5 km à la recherche de l'eau, ce qui occupe beaucoup trop de leur temps et énergie. Le manque de matériel et des finances empêchent la résolution de ces problèmes et accentue le sous-développement de la région.

Le Kadiogo est la province qui se trouve au cœur du pays et dont le chef lieu est la capitale Ouagadougou. D'une superficie d'environ 2800km², la province se caractérise par un climat tropical à deux saisons : la saison des pluies qui dure environ 5 mois de mai à septembre et la saison sèche plus longue qui couvre le reste de l'année. Les hauteurs de pluies annuelles ne dépassent pas en général 700mm. Les températures sont souvent élevées (supérieures à 35°) à l'exception des mois de décembre et janvier où elles sont assez fraîches (20° en moyenne). Le couvert végétal le plus dominant est la savane arbustive claire parsemée de quelques grands arbres et une strate herbacée. La région qui est le plus grand pôle

économique abrite en plus de l'agriculture la majeure partie des entreprises industrielles et les activités tertiaires. Le taux de scolarisation y est le plus élevé du pays.

Il faut noter que pour toutes ces régions, les saisons des pluies sont souvent marquées par des séquences sèches principalement en début et fin de période ; la répartition temporelle est très aléatoire.

2.4.1.4 Choix des sites forestiers

Les sites qui font l'objet de l'étude ont été choisis en fonction du suivi dont ils font l'objet car ce sont tous des forêts classées.

Ces sites choisis sont la forêt classée de Wayen dans le Ganzourgou, celle du barrage de Ouagadougou dans le Kadiogo et celle de Bissiga (guiloungou) dans l'Oubritenga, une partie de la forêt du Nakambé dans le Bazèga, Ouilingoré dans le Boulgou, Sitenga dans le Kouritenga, Niouma et Twessé dans le Passoré et une partie du parc National Tambi Kaboré un peu plus dans le sud. Ces forêts se situent toutes dans le Nakambé et font l'objet d'une situation délicate car les agents forestiers affectés à la protection de ces différentes forêts rencontrent souvent des difficultés compte tenu des aires qui sont assez étendues et de leurs effectifs assez limités.

Au niveau du Passoré, on a les forêts classées de Niouma, étendue sur 735 ha dans la commune de Bagaré délimitée depuis 1954 et celle de Twessé dans la commune rurale de Samba d'une superficie de 490 ha identifiée par le colonisateur français également en 1954. A l'instar des aires forestières du reste du pays, celles de Niouma et de Twessé sont menacées par la forte pression démographique qui se manifeste par les feux de brousse, la coupe du bois vert, le pacage du bétail et l'exploitation agricole. Des mesures ont été prises pour la reconstitution et l'entretien des limites des ces aires avec des mesures d'accompagnement à travers la mise en place de microprojets au profit des populations déguerpies.

La province du Boulgou est quant à elle caractérisée par 2 forêts : celle des yakala et celle de ouilingoré. La forêt de yakala autrefois d'une superficie de 1600 hectares a été engloutie par la mise en eau du barrage de Bagré et c'est celle de ouilingoré qui existe à l'état actuel et qui a fait l'objet de notre choix pour cette recherche. Avec une superficie de 6850 hectares, elle a été classée en 1936 et est beaucoup menacé par les activités humaines qui sont l'agriculture, le surpâturage avec le bétail et le braconnage surtout du fait de sa position frontalière.

A l'exception de la forêt du Nakambé (98000ha), la province du Bazèga ne compte pas officiellement de forêt classée mais dispose de certaines réserves pourvoyeuses en ressources ligneuses et autres produits naturels. La forêt du Nakambé parcourt trois (3) provinces dont le Bazèga est l'une d'elles.

Protégée à partir de 1936, la forêt classée de wayen subit un effet anthropique assez marqué. Elle a une superficie estimée à 17000 ha et se situe dans la province du Ganzourgou. Sa densité, relativement bonne, permet d'assurer aux amateurs la petite chasse. En effet, bien qu'étant classée, environ 360 ménages venus des villages riverains exploitent 8% de sa superficie et les riverains abusent de son potentiel par le commerce de bois de chauffe qui constitue une activité de contre saison pour ces derniers.

Connue également sous le nom de Bangr-Weoogo, la forêt classée du barrage de Ouagadougou fut l'une des premières forêts protégées du Burkina Faso. Ancien domaine de l'Empereur des Mossis (Moro-Naaba), elle a été protégée depuis 1936 et est devenue ensuite un « parc urbain ». Ce dernier se caractérise par une extraordinaire variété de formations végétales due surtout à la présence permanente de l'eau et de différentes typologies pédologiques et lithologiques. Il offre aux visiteurs un jardin botanique en cours d'agrandissement, un parc zoologique à l'intérieur duquel on prévoit l'introduction d'espèces animales typiques du pays, et une région de savane tantôt arborée et tantôt marécageuse destinée aux promenades et au loisir dans un milieu naturel. La forêt classée du barrage de Ouagadougou est une ancienne forêt sacrée de 260 ha, elle représente un

poumon vert pour la ville, un lieu pour le loisir et, comme le dit le nom « Bangr-Weoogo », une « forêt du savoir », lieu privilégié pour l'éducation environnementale.

Situé dans l'Oubritenga, à cheval entre les départements de Ziniaré et de Zitenga, la forêt de Bissiga fut classée en 1936. Elle fait partie d'un ensemble de barrières climatiques mises en place à l'origine par les colonisateurs. Avec une superficie estimée jadis à 4100 hectares, elle est à nos jours d'environ 3000ha. Une partie de cette perte de superficie (319ha) est due à la mise en eau du barrage de Ziga. Cette forêt est caractérisée par une prédominance de terrains plats avec une érosion assez perceptible le long du fleuve Nakambé. Cette érosion est aussi causée par les ménages qui y vivent et dénombrés à une soixantaine (MECV, 2005) qui exploitent 2% de sa superficie. Le site présente un état de santé assez délicat bien qu'il y ait peu d'arbres morts (<1%), environ 19% des arbres sont malades. La forêt est composée à majorité de savanes arbustives (54%) mais compte tout de même des forêts galerie, des savanes arborées et boisées pour environ 40% de sa superficie. La densité moyenne des pieds à l'hectare de cette forêt est évaluée à 217pieds/ha.

2.4.2. METHODE D'ANALYSE : CHANGEMENT DE PRODUCTIVITE

L'approche qui sera utilisée pour l'analyse est celle de la théorie du changement de productivité. Par définition, les changements de productivité peuvent être provoqués par des changements pratiques de technologie de production par une autre supposée meilleure, ou par un changement du niveau de l'efficacité avec la même technologie de production (ROGERS Mark, 1998).

L'approche qui sied à notre étude est celle du changement de technologie car au niveau du processus de pluviométrie une nouvelle méthode est utilisée.

En d'autres termes, l'approche de changement de productivité a pour objectif de dégager le changement de profit obtenu par adoption d'une technique. Ce changement de productivité peut être apprécié de deux manières :

- par un changement du niveau de production, ce qui est l'effet direct ;
- par un changement du niveau des intrants utilisés, ce qui relève de l'effet indirect.

Cette méthode fut utilisée avec succès dans une étude pour évaluer le changement de productivité généré par la conservation des eaux et des sols à Madagascar (B. MINTEN, 2003). L'effet direct s'est traduit par une augmentation de la production de 60% et l'effet indirect s'est matérialisé par une baisse de l'utilisation des intrants.

Dans notre étude, nous nous focaliserons sur l'effet direct généré, c'est-à-dire les éventuels changements des rendements agricoles, des captures des pêches, de la production énergétique et de la productivité du bois de forêt car nous ne disposons pas des investissements financiers chiffrés du programme.

2.4.3. CHOIX DES SPECULATIONS

Le choix des spéculations de cette étude s'est porté sur les cultures céréalières les plus répandues dans toute la région. En effet, sur toute l'étendue du Nakambé (Passoré jusqu'à la frontière avec le Ghana et Togo) les cultures de rente, notamment le coton, occupent une place moindre dans les cultures des populations locales.

L'agriculture est vivrière et les spéculations qui portent le plus l'attention des agriculteurs sont le maïs, le mil et le sorgho ; elles constituent la base de l'alimentation des populations locales. Ces trois céréales sont en outre la base de l'alimentation des ménages à l'échelle nationale.

2.4.4. ANALYSE CONCEPTUELLE DES DONNEES

Ce sous point sert à présenter la nature des données qui seront utilisées pour la vérification empiriques des hypothèses de recherche. Les données pouvant être de différente nature, il est nécessaire de les distinguer pour un traitement efficace. Ainsi, elles peuvent être de dimension temporelle, spatiale ou spatio-temporelle selon les circonstances.

L'ensemble de cette recherche est basé sur l'utilisation des séries chronologiques et de données de panels. Depuis le début de l'ensemencement c'est le Nakambé qui a toujours

bénéficié des effets par rapport aux autres régions du pays pour lesquelles c'est plus récent. Pour cela, l'on pourra procéder à une analyse intra zone.

Pour des questions pratiques l'obtention des données s'est faite auprès de structures spécialisées disposant de fichiers suffisamment fournis. Les données sont donc de types secondaires car nous avons à faire à des données dans le temps (1993 à 2003) et également dans l'espace qui ne seraient pas possibles à obtenir par nos propres enquêtes primaires.

L'analyse intra zone consistera à apprécier pour une zone ayant bénéficié de l'action du « Programme Saaga », l'évolution de sa pluviométrie depuis les années 1990 jusqu'à nos jours. Cela permettra d'avoir une idée du comportement du niveau des eaux jusqu'à nos jours. Nous n'aurons pas recours à l'analyse extra zone qui nécessite des sites témoins. Nous justifions cela car, au fur et à mesure de l'élargissement du programme, des régions qui au début n'étaient pas concernées font parti des zones cibles (Ouest, Est, Nord-Est). Le choix de sites témoins peut ainsi être biaisé par le fait que ces sites témoins pourraient avoir bénéficié des impacts directs et/ou indirects de l'ensemencement des nuages. En effet, la technique étant moins maîtrisée à ses débuts occasionnait parfois un manque de précision au niveau des cibles visées.

Pour ce qui se rapporte aux différents objectifs, on a mis en exergue les effets positifs générés grâce à l'intervention du programme sur les activités économiques que représentent :

- ◆ l'agriculture en ce qui concerne les cultures vivrières et le niveau des rendements ;
- ◆ la pêche au niveau du barrage de Bagré en fonction de l'évolution de la pluviométrie ;
- ◆ le niveau de la production hydroélectrique et les améliorations possibles de production énergétique ;
- ◆ l'amélioration du couvert végétal qui bénéficiera à la population et au bétail, favorisera la conservation de la faune.

En rapport avec le dernier objectif, nous pourrons à l'aide de régressions économétriques montrer les relations qui existent entre la restauration du couvert végétal à travers les espaces boisés (variable dépendante), l'évolution de la pluviométrie, l'action de l'homme à

travers la pression démographique et d'autres variables explicatives. A partir de cela, nous pourrions conclure sur les impacts économiques de cette évolution végétale sur la population.

Pour réaliser ces travaux, nous aurons recours essentiellement à des données secondaires. Il s'agit des données portant sur les céréales, la pluviométrie, le volume de pêche, le bétail. Ces données seront annuelles pour la majorité d'entre elles compte tenu de la nature de certaines variables telles que le rendement agricole observé qui ne peut être mensuel mais annuel. Les observations partiront des années 1993 à 2003 une période d'analyse d'environ dix (10) années pour une période d'application de l'ensemencement depuis 1998.

Pour la première et la quatrième hypothèse (agriculture et productivité agricole, productivité du bois de forêt), nous aurons recours à des données de panels. Elles seront dans l'espace pour chaque individu représenté par les huit (08) provinces de la région et dans le temps pour deux (2) sous périodes de cinq ans avec et sans intervention du programme soit une quarantaine d'observations par sous période. Pour la deuxième et troisième hypothèse (pêche et hydroélectricité), les données seront des séries chronologiques mensuelles sur dix (10) ans avec l'utilisation d'une variable binaire pour marquer l'intervention du programme quand cela est effectif.

Au-delà des points cités, une meilleure disponibilité en eau peut être source de revenus à travers des activités annexes (maraîchage, etc.). C'est pourquoi, à travers les effets secondaires sur les revenus moyens des populations, il peut y avoir une amélioration de leur niveau de vie.

Différentes localités sont traversées par le lac de Bagré, elles se trouvent dans la région de Nakambé et subissent depuis 1998 les différents effets du programme. Ce sont les localités de Béguédo, de Niaogho, de Boussouma, auxquelles nous ajouterons le département de Bagré.

Les données, telles que la production hydroélectrique, la température, le volume d'eau du barrage sont également de type secondaire et par conséquent feront l'objet de collecte dans les structures appropriées (SONABEL, METEO).

Une telle recherche permettra d'apporter des éléments de réponses à une question récurrente qui est celle de connaître les différents effets de l'ensemencement des nuages au Burkina Faso. Notre recherche ne répondra certes pas à toutes les interrogations mais contribuera à apporter des éléments d'éclaircissement sur le volet économique. Ces travaux s'inscrivent aussi dans le cadre d'un vaste programme multi et inter disciplinaires initié par les responsables du « Programme Saaga » et permettront également aux autres volets de pouvoir utiliser les résultats de ces travaux.

Ces différents outils et les contextes présentés dans ce chapitre, serviront à effectuer l'estimation et l'analyse des résultats pour chacune des hypothèses. Ces estimations traitées et testées sont présentées, commentées et analysées dans le chapitre suivant.

DEUXIEME PARTIE : PRESENTATIONS DES RESULTATS ET ANALYSES

CODESRIA - BIBLIOTHEQUE

CHAPITRE 3 : ANALYSE ECONOMETRIQUE ET PRESENTATION DES RESULTATS

Ce chapitre constitue un des points les plus importants de ces travaux. A partir de la modélisation présentée dans les points précédents, les différentes estimations sont effectuées. Une fois les résultats obtenus, nous ferons des tests pour renforcer leur efficacité et leur pertinence.

Cette section est essentiellement basée sur l'utilisation de l'outil économétrique afin d'obtenir une évaluation quantitative des résultats..

3.1. AGRICULTURE

Ce sous point met en lumière les tests, les résultats obtenus pour les spéculations étudiées : le maïs, le mil et le sorgho. Dans cette section, il est aussi fait cas des difficultés majeures rencontrées pour les estimations et leurs effets sur les résultats obtenus.

Résultats empiriques et tests

Les estimations de cette section ont été réalisées pour les différentes céréales (maïs, mil sorgho) à partir du modèle précédemment présenté qui est :

$$y_{it} = f(c; u_i; pl_{it}; trend; h_{it}; engr_{it}; njrp_{it}; \varepsilon_{it})$$

3.1.1 Maïs

Nous présentons dans ce point les différents tests effectués pour le maïs sur les deux sous périodes : l'une marquant la période sans l'intervention du programme (1993 à 1997) et l'autre marquée par l'intervention du programme (1998 à 2002).

Test de la présence d'effet individuel

En rappel, nous allons recourir au modèle à effets individuels qui admet l'existence de coefficients identiques pour tous les individus et de constantes spécifiques à chacun d'entre eux. Ainsi, la relation économique mise en évidence à travers ce type de modélisation n'est

censée différer pour tous les individus qu'au niveau des constantes introduites dans le modèle.

En général, lorsque l'on travaille sur des séries agrégées, il est relativement peu probable que la fonction de production macroéconomique soit strictement identique pour tous les pays étudiés. Mais dans ce cas de figure, il s'agit de fonction de production à l'échelle provinciale à partir de facteurs environnementaux et d'autres variables. Compte tenu du fait que c'est le même pays et que les processus de production sont sensiblement les mêmes dans les différentes zones, alors on peut dire qu'il existe bien une relation pratiquement identique entre la production et les facteurs pour toutes les provinces du Nakambé. Donc les éventuelles hétérogénéités du modèle proviennent alors de u_i . Dans notre étude u_i représente le rendement moyen total pour tous les facteurs ou encore la productivité moyenne totale. Dans la pratique, il se peut que des facteurs tels la position géographique, le climat ou d'autres conduisent à des différences structurelles de productivité entre les provinces. C'est pourquoi, il convient de tester l'hypothèse d'une constante commune à toutes les provinces. Si cette hypothèse est rejetée, cela veut dire que le modèle est à effets individuels de type :

$y_{it} = u_i + \beta x_{it} + \varepsilon_{it}$ Où x_{it} est le vecteur de variables explicatives et β le vecteur de coefficients associés.

Pour palier cela on a recours à l'estimateur within ou LSDV (Least squares of dummy variable) ou à l'estimateur des MCO obtenu à partir d'un modèle transformé où les variables expliquées et explicatives sont centrées sur leurs moyennes individuelles respectives Hurlin (2000).

Les hypothèses du test se présentent comme suit :

$$\text{Hypothèses : } \begin{array}{l} H_0 : u_i = 0 \\ H_1 : u_i \neq 0 \end{array} \quad \forall i = 1, \dots, 8$$

L'acceptation de l'hypothèse nulle signifie l'absence d'effets individuels. En d'autres termes, on dira que les systèmes de production dans les différentes régions sont assez homogènes entre eux.

Le test nous donne les résultats suivants pour les deux sous périodes :

Tableau 4: Estimation pour le test d'effets individuels ($\ln_{y_{it}}$ = variable dépendante)

| Variables Indépendantes | 1993 à 1997 | | 1998 à 2002 | |
|---|--|-----------------------------|--|-----------------------------|
| | Coefficients | Probabilités | Coefficients | Probabilités |
| $\ln_{Pl_{it}}$ | 1,047973 | 0,055 ^(***) | 1,875251 | 0,002 ^(*) |
| trend | -0,1945925 | 0,004 ^(*) | 0,0523007 | 0,342 |
| $\ln_{h_{it}}$ | 25,73805 | 0,030 ^(**) | -16,02511 | 0,115 |
| $\ln_{Njrp_{it}}$ | -0,3024624 | 0,528 | -0,8689305 | 0,107 |
| $\ln_{eng_{it}}$ | 0,2646886 | 0,329 | 0,0602424 | 0,538 |
| C | -86,83009 | 0,038 | 51,27921 | 0,133 |
| F test that all $u_i=0$ | F(7, 27)= 2,01 | Prob > F = 0,0902 | F (7, 27) = 1,92 | Prob > F = 0,1050 |
| | F(5,27) = 4,33 | Prob > F = 0,0051 | F(5,27) = 2,82 | Prob > F = 0,0354 |
| Fixed-effects (within) regression | Nombre d'observations = 40 Nombre de groupes = 8 Nombre d'années = 5 | | Nombre d'observations = 40 Nombre de groupes = 8 Nombre d'années = 5 | |

Source : Estimation données d'enquête

(*) significatif à 1%, (**) significatif à 5%, (***) significatif à 10%

De 1993 à 1997, au seuil de 5%, on a une probabilité de 0,0902 qui est supérieure à 0,05, ce qui signifie qu'on accepte l'hypothèse nulle. On a donc au seuil de 5%, une absence d'effets individuels pour cette sous période.

Dans la sous période de 1998 à 2002, on a également une probabilité de 0,1050 qui est supérieure à 0,05. Cela permet d'accepter l'hypothèse nulle d'absence d'effets individuels.

En somme, sur les deux sous périodes, il y a absence d'effets individuels au seuil de 5%.

Test de Hausman

Ce test permettra de déterminer si l'on aura recours à un modèle à effets fixes ou à un modèle à effets aléatoires.

La présence d'effets individuels ou non étant vérifiée, nous allons effectuer le test de Hausman (1978) pour déterminer si nous aurons recours au modèle à effets fixes (fixed effects) ou au modèle à effets aléatoires (random effects). Ce test permet de savoir lequel

des deux modèles nous adopterons car l'utilisation de l'un à la place de l'autre donne des résultats incohérents (Wooldridge, 2000). De surcroît, quand il n'y a pas d'effets individuels (u_i est aléatoire) cela ne suffit pas à affirmer que nous utiliserons un modèle à effets aléatoires. L'utilisation de modèle à effets aléatoires est nécessaire quand il n'y a pas de corrélation entre le paramètre u_i et les différentes variables explicatives ($cov(x_{i,t}; u_i) = 0$). Mais, lorsqu'il existe une corrélation entre le paramètre u_i et les variables explicatives ($cov(x_{i,t}; u_i) \neq 0$), on est dans un cas de modèle à effets fixes et les estimations sont faites en différences premières pour résoudre le problème posé par la corrélation (Wooldridge, 2000).

Les hypothèses du test sont les suivantes :

$$H_0 : \beta_i^{RE} = \beta_i^{FE} \quad \forall i = 1, \dots, 8 \text{ Où } \beta \text{ représente la matrice des coefficients des différentes}$$

$$H_1 : \beta_i^{RE} \neq \beta_i^{FE}$$

variables avec

β_{RE} , lorsque les coefficients sont estimés avec un modèle à effets aléatoires ;

β_{FE} , lorsque les coefficients sont estimés avec un modèle à effets fixes.

La statistique utilisée est la statistique de H et le test est un test de Wald:

$$H = (\hat{\beta}_{FE} - \hat{\beta}_{RE})' \left[\text{var}(\hat{\beta}_{FE} - \hat{\beta}_{RE}) \right]^{-1} (\hat{\beta}_{FE} - \hat{\beta}_{RE})$$

$$\left[\text{var}(\hat{\beta}_{FE} - \hat{\beta}_{RE}) \right] = \left[\text{var}(\hat{\beta}_{FE}) - \text{var}(\hat{\beta}_{RE}) \right]$$

$$\text{D'où } H = (\hat{\beta}_{FE} - \hat{\beta}_{RE})' \left[\text{var}(\hat{\beta}_{FE}) - \text{var}(\hat{\beta}_{RE}) \right]^{-1} (\hat{\beta}_{FE} - \hat{\beta}_{RE})$$

La statistique H suit une loi de χ^2 à $k-1$ degrés de liberté.

Décision : Si $\chi^2_{calculé} < \chi^2_{5\%}$ on accepte H_0 , on peut utiliser avec indifférence les deux modèles, on pourra donc estimer sans risque un modèle à effets aléatoires.

Si $\chi^2_{calculé} > \chi^2_{5\%}$ on rejette H_0 , dans ce cas le modèle est à effets fixes.

Ce test est un test de khi deux dont la décision peut être aussi faite à l'aide des probabilités calculées.

Au seuil de 5%, si la probabilité calculée est inférieure à 0,05 on ne peut pas accepter H_0 et on accepte H_1 . En ce moment, on aura recours à un modèle à effets fixes. Mais si la probabilité est supérieure à 0,05, on accepte H_0 ; ce qui signifie que les paramètres sont sensiblement égaux. On peut en ce moment estimer le modèle soit avec effets aléatoires ou avec effets fixes.

Les résultats des tests sont présentés comme suit :

Tableau 5 : Test de Hausman pour le maïs

| Test | 1993 à 1997 | 1998 à 2002 |
|--|---|---------------|
| H_0 | difference in coefficients not systematic | |
| chi2(5) | $(b-B)'[(V_b-V_B)^{-1}](b-B)$ | |
| chi2(5) | 9,35 | 67,62 |
| Prob>chi2 | 0,0958 | 0,0000 |
| Nombre d'observations = 40 Nombre de groupes = 8 Nombre d'années = 5 | b = consistant sous H_0 and H_1 ; obtenu de xtreg B = inconsistant sous H_1 , efficient sous H_0 ; obtenu par régression xtreg | |

Source : Estimation données d'enquête

Efficient

De 1993 à 1997, la probabilité calculée est supérieure à 0,05; on accepte donc H_0 . Les coefficients estimés par les deux méthodes sont sensiblement les mêmes au seuil de 5%.

Dans la sous période de 1998 à 2002, la probabilité calculée est nulle ce qui signifie qu'au seuil de 5% on accepte H_1 . Le modèle est donc à effets fixes et ce quel que soit le seuil choisi.

Estimation des paramètres

Les estimations des paramètres suivants les modèles ont donné les résultats ci après :

Tableau 6 : Estimation par la méthode des effets fixes ($\ln_{y_{it}}$ = variable dépendante)

| Variables Indépendantes | 1993 à 1997 | | 1998 à 2002 | |
|---|--|------------------------|--|----------------------|
| | Coefficients | Probabilités | Coefficients | Probabilités |
| $\ln_{Pl_{it}}$ | 1,047973 | 0,055 ^(***) | 1,875251 | 0,002 ^(*) |
| trend | -0,1945925 | 0,004 ^(*) | 0,0523007 | 0,342 |
| $\ln_{h_{it}}$ | 25,73805 | 0,030 ^(**) | -16,02511 | 0,115 |
| $\ln_{Njrp_{it}}$ | -0,3024624 | 0,528 | -0,8689305 | 0,107 |
| $\ln_{eng_{it}}$ | 0,2646886 | 0,329 | 0,0602424 | 0,538 |
| C | -86,83009 | 0,038 ^(**) | 51,27921 | 0,133 |
| | F(5,27) = 4,33 | Prob > F = 0,0051 | F(5,27) = 2,82 | Prob > F = 0,0354 |
| Fixed-effects (within) regression | Nombre d'observations = 40 Nombre de groupes = 8 Nombre d'années = 5 | | Nombre d'observations = 40 Nombre de groupes = 8 Nombre d'années = 5 | |

Source : Estimation données d'enquête

(*) significatif à 1%, (**) significatif à 5%, (***) significatif à 10%

Pour les deux sous périodes, le modèle est significatif dans son ensemble (car les β ne sont pas tous nuls) les probabilités associées à la statistique de Fisher sont respectivement de 0,0051 et de 0,0354.

Le coefficient de la variable d'intérêt (pluviométrie) est significatif au seuil de 10% pour la première sous période et au seuil de 1% pour la seconde sous période.

Qu'en est-il quant à la variance du terme de l'erreur pour chacune des deux sous périodes ? Effectuons donc le test d'hétéroscédasticité par le test de White

Test de l'hétéroscédasticité

Pour effectuer ce test, il s'agira de vérifier si la variance des erreurs de chaque individu est constante dans le temps. Les hypothèses du test se posent comme suit :

$$H_0 : \sigma_{it}^2 = \sigma^2 \quad \forall i = 1, \dots, 8 \quad t = 1, \dots, 5 \quad (\text{homoscédasticité})$$

$$H_1 : \sigma_{it}^2 \neq \sigma^2 \quad (\text{hétéroscédasticité})$$

A partir des régressions faites à l'aide de stata on obtient les résultats présentés dans le tableau 7 et 8 :

Tableau 7 : De 1993 à 1997 Test de White (Hétéroscédasticité)

| | | | |
|------------------------|----------|--------------------|--------|
| Taille (N) | 40 | Probabilité | 0,16 |
| LM _{cal} (20) | 26,17868 | Khi deux 5%(20) | 31,410 |

Source : Estimation données d'enquête

Tableau 8 : De 1998 à 2002 Test de White (Hétéroscédasticité)

| | | | |
|------------------------|---------|--------------------|--------|
| Taille (N) | 40 | Probabilité | 0,0268 |
| LM _{cal} (20) | 33,9052 | Khi deux 5%(20) | 31,410 |

Source : Estimation données d'enquête

De **1993 à 1997**, on constate que la probabilité est supérieure à 5%, ce qui permet de d'accepter l'hypothèse 0, on dira qu'il y a donc homoscédasticité sur cette sous période.

De **1998 à 2002**, la probabilité est inférieure 5%. On rejette donc l'hypothèse 0 qui permet de conclure sur la présence d'hétéroscédasticité. Pour corriger cela, on va effectuer les estimations robustes. On obtient les résultats, suivants :

Tableau 9 : Estimation robuste de la seconde sous période (1998-2002)

| Variables Indépendantes | Coefficients | Probabilités |
|----------------------------|--------------|--------------|
| Ln_Pl _{it} | 1,062841 | 0,049(**) |
| trend | 0,05773 | 0,161 |
| Ln_h _{it} | -11,79143 | 0,039(**) |
| Ln_Njrp _{it} | -0,4027422 | 0,326 |
| Ln_eng _{it} | 0,2213022 | 0,024(**) |
| C | 40,816 | 0,027(**) |
| n | 40 | |
| Wald chi2(6) | 19404,52 | 0,000 |

Source : Estimation données d'enquête

(*) significatif à 1%, (**) significatif à 5%, (***) significatif à 10%

3.1.2 Mil

De manière similaire au cas du maïs, on aura les différents tests pour caractériser le type de modèle que l'on va utiliser pour le mil.

Test sur la présence d'effet individuel

Les hypothèses du test : $H_0 : u_i = 0 \quad \forall i = 1, \dots, 8$
 $H_1 : u_i \neq 0$

On obtient les résultats qui suivent pour les deux sous périodes :

Tableau 10 : Estimation pour le test d'effets individuels (y_{it} = variable dépendante)

| Variables Indépendantes | 1993 à 1997 | | 1998 à 2002 | |
|--|--|-----------------------------|--|-----------------------------|
| | Coefficients | Probabilités | Coefficients | Probabilités |
| Ln_Pl _{it} | 483,4362 | 0,071 ^(***) | 881,2723 | 0,001 ^(*) |
| trend | -55,28149 | 0,041 ^(**) | 61,80616 | 0,007 ^(*) |
| Ln_h _{it} | 16501,98 | 0,004 ^(*) | 3978,632 | 0,316 |
| Ln_Njrp _{it} | -265,0468 | 0,222 | -0,217782 | 0,999 |
| Ln_pl_eng _{it} | -10,86788 | 0,203 | -9,545662 | 0,263 |
| C | -56251,98 | 0,005 ^(*) | -18145,35 | 0,177 |
| F test that all u_i=0 | F(7, 27)= 3,75 | Prob > F = 0,0058 | F (7, 27) = 4,06 | Prob > F = 0,0037 |
| | F(5,27) = 2,87 | Prob > F = 0,0334 | F(5,27) = 4,88 | Prob > F = 0,0026 |
| Fixed-effects (within) regression | Nombre d'observations = 40 Nombre de groupes = 8 Nombre d'années = 5 | | Nombre d'observations = 40 Nombre de groupes = 8 Nombre d'années = 5 | |

Source : Estimation données d'enquête

(*) significatif à 1%, (**) significatif à 5%, (***) significatif à 10%

De 1993 à 1997, la probabilité (0,0058) permet de rejeter l'hypothèse nulle et d'accepter l'hypothèse alternative de la présence d'effets individuels au seuil de 5%.

Dans la seconde sous période (1998 à 2002), la probabilité faible (0,0037) permet d'accepter l'hypothèse alternative de la présence d'effets individuels.

Ainsi, pour les deux sous périodes nous avons la présence d'effets individuels (propres à chaque province).

Test de Hausman

Les hypothèses du test sont telles que l'acceptation de l'hypothèse nulle permet de dire que les coefficients des deux modèles sont sensiblement égaux et l'acceptation de l'hypothèse alternative nous dit que les coefficients des deux modèles diffèrent et que c'est le modèle à effets fixes qui est adéquat en ce moment pour estimer.

$$H_0 : \phi_i^{RE} = \phi_i^{FE} \quad \forall i = 1, \dots, 8$$

$$H_1 : \phi_i^{RE} \neq \phi_i^{FE} \text{ (effets fixes)}$$

La spécification du modèle à partir du test de Hausman a donné les résultats ci-dessous :

Tableau 11 : Test de Hausman pour le mil

| Test | 1993 à 1997 | 1998 à 2002 |
|--|--|---------------|
| H ₀ | difference in coefficients not systematic | |
| chi2(5) | (b-B)'[(V _b -V _B) ⁽⁻¹⁾](b-B) | |
| chi2(5) | 12,285 | 3,72 |
| Prob>chi2 | 0,0312 | 0,5905 |
| Nombre d'observations = 40 Nombre de groupes = 8 Nombre d'années = 5 | b = consistent under H ₀ and H _a ; obtained from xtreg B = inconsistent under H _a , efficient under H ₀ ; obtained from xtreg | |

Source : Estimation données d'enquête

De 1993 à 1997, la probabilité de 0,0312 est inférieure à 0,05, on accepte l'hypothèse 1. Cela revient à dire que le modèle est à effets fixes.

On obtient pour cette sous période (1998 à 2002) une probabilité largement supérieure à 0,05. On accepte donc l'hypothèse nulle que les coefficients selon l'estimation par les deux méthodes sont sensiblement égaux.

Estimation des paramètres

L'estimation des paramètres selon les méthodes adéquates nous donne les résultats suivants :

Tableau 12 : Résultats d'estimation (y_{it} = variable dépendante)

| Variables Indépendantes | 1993 à 1997 | | 1998 à 2002 | |
|---|-----------------------------------|------------------------|-------------------------------|----------------------|
| | Coefficients | Probabilités | Coefficients | Probabilités |
| Ln_Pl _{it} | 483,4362 | 0,071 ^(***) | 819,0593 | 0,001 ^(*) |
| trend | -55,28149 | 0,041 ^(**) | 47,15309 | 0,007 ^(*) |
| Ln_h _{it} | 16501,98 | 0,004 ^(*) | 1233,774 | 0,316 |
| Ln_Njrp _{it} | -265,0468 | 0,222 | -161,2399 | 0,999 |
| Ln_pl_eng _{it} | -10,86788 | 0,203 | -6,747426 | 0,263 |
| C | -56251,98 | 0,005 ^(*) | -7965,403 | 0,177 |
| | F(5,27) = 2,87 | Prob > F = 0,0334 | Wald chi2(5) = 22,47 | Prob > chi2 = 0,0004 |
| Nombre d'observ. = 40 Nombre de groupes = 8 Nombre d'années = 5 | Fixed-effects (within) regression | | Random-effects GLS regression | |

Source : Estimation données d'enquête

(*) significatif à 1%, (**) significatif à 5%, (***) significatif à 10%

On observe dans les deux cas une régression d'ensemble significative car les probabilités associées à la statistique de Fisher et à celle de khi deux sont inférieures à 5%.

Pour la période 1993 à 1997, le coefficient de la variable majeure (pluviométrie) est significatif au seuil de 8%, il est de 483,43.

De 1998 à 2002, le paramètre de la variable pluviométrie est significatif quel que soit le seuil de confiance ; il est de 819,05.

Test de l'hétéroscédasticité

Pour effectuer ce test, on va utiliser le test de White. Posons les hypothèses du test.

On aura :

$$H_0 : \sigma_{it}^2 = \sigma^2 \quad \forall i = 1, \dots, 8 \quad t = 1, \dots, 5 \quad (\text{homoscédasticité})$$

$$H_1 : \sigma_{it}^2 \neq \sigma^2 \quad (\text{hétéroscédasticité})$$

A partir du logiciel on obtient les résultats présentés aux tableaux 13 et 14 :

Tableau 13 : De 1993 à 1997 Test de White (Hétéroscédasticité)

| | | | |
|------------------------|----------|--------------------|--------|
| Taille (N) | 40 | Probabilité | 0,4387 |
| LM _{cal} (20) | 20.30966 | Khi deux 5%(20) | 31,410 |

Source : Estimation données d'enquête

Tableau 14 : De 1998 à 2002 Test de White (Hétéroscédasticité)

| | | | |
|------------------------|----------|--------------------|--------|
| Taille (N) | 40 | Probabilité | 0,2177 |
| LM _{cal} (20) | 24,58756 | Khi deux 5%(20) | 31,410 |

Source : Estimation données d'enquête

Pour les deux sous périodes, on constate que les probabilités sont supérieures à 5% ce qui conduit à accepter l'hypothèse nulle. On est dans un cas d'homoscédasticité pour les deux cas.

3.1.3 Sorgho

Pour cette culture, l'on doit aussi déterminer si on a des effets individuels, si le modèle est à effets fixes ou aléatoires avant l'estimation des paramètres. Nous avons également ici un modèle non linéaire, à forme quadratique.

Test sur la présence d'effets individuels

Les hypothèses sont comme dans le cas du maïs :

$$H_0 : u_i = 0 \quad \forall i = 1, \dots, 8$$
$$H_1 : u_i \neq 0$$

Le test est un test de Fisher et on utilisera la probabilité associée pour la décision.

Les résultats sont les suivants :

Tableau 15: Estimation pour le test d'effets individuels (y_{it} = variable dépendante)

| Variables Indépendantes | 1993 à 1997 | | 1998 à 2002 | |
|---|--|-----------------------------|--|-----------------------------|
| | Coefficients | Probabilités | Coefficients | Probabilités |
| Pl_{it} | 1,593046 | 0,505 ^(***) | 2,806347 | 0,097 ^(***) |
| Pl^2_{it} | -0,0011868 | 0,477 | -0,0036896 | 0,003 ^(*) |
| trend | -42,37385 | 0,258 | 46,27317 | 0,026 ^(**) |
| h_{it} | 211,2693 | 0,400 | 259,9067 | 0,075 ^(***) |
| $Njrp_{it}$ | -8,106852 | 0,629 | -33,27437 | 0,009 ^(*) |
| pl_eng_{it} | 0,0000125 | 0,289 | 5,84e-06 | 0,397 |
| pl_Njrp_{it} | 0,0038845 | 0,862 | 0,0514154 | 0,000 ^(*) |
| C | -5489,639 | 0,455 | -7161,124 | 0,118 |
| F test that all $u_i=0$ | F(7, 25)= 1,53 | Prob > F = 0,2014 | F (7, 25) = 6,12 | Prob > F = 0,0003 |
| | F(7,25) = 1,22 | Prob > F = 0,3275 | F(7,25) = 5,01 | Prob > F = 0,0012 |
| Fixed-effects (within) regression | Nombre d'observations = 40 Nombre de groupes = 8 Nombre d'années = 5 | | Nombre d'observations = 40 Nombre de groupes = 8 Nombre d'années = 5 | |

Source : Estimation données d'enquête ; (*) significatif à 1%, (**) significatif à 5%, (***) significatif à 10%

Pour la première sous période (1993-1997), on obtient une probabilité supérieure à 5% donc on accepte l'hypothèse nulle. Il n'y a donc pas pour cette sous période d'effets individuels.

Pour la seconde sous période (1998-2002), la probabilité est inférieure à 5% donc on accepte l'hypothèse alternative. Il y a alors présence d'effets individuels.

Test de Hausman

Comme pour les deux premières spéculations (maïs et mil), ce test permettra de déterminer si le modèle est à effets fixes ou aléatoires. C'est un test de khi deux, mais nous allons utiliser les probabilités.

$$H_0 : \tau_i^{RE} = \tau_i^{FE} \quad \forall i = 1, \dots, 8$$

$$H_1 : \tau_i^{RE} \neq \tau_i^{FE} \quad (\text{effets fixes})$$

A partir du logiciel stata, on effectue le test et on obtient les résultats qui suivent :

Tableau 16 : Test de Hausman pour le sorgho

| Test | 1993 à 1997 | 1998 à 2002 |
|--|--|---------------|
| H ₀ | difference in coefficients not systematic | |
| chi2(4) | $(b-B)'[(V_b-V_B)^{-1}](b-B)$ | |
| chi2(4) | 6,10 | 8,20 |
| Prob>chi2 | 0,1915 | 0,0844 |
| Nombre d'observations = 40 Nombre de groupes = 8 Nombre d'années = 5 | b = consistent under H ₀ and H _a ; obtained from xtreg B = inconsistent under H _a , efficient under H ₀ ; obtained from xtreg | |

Source : Estimation données d'enquête

De 1993 à 1997, la probabilité obtenue est supérieure à 5%, on accepte donc l'hypothèse nulle. L'acceptation de cette hypothèse nous permet donc d'estimer le modèle avec des effets aléatoires.

De 1998 à 2002, au seuil de 5%, on accepte l'hypothèse nulle car la probabilité obtenue est supérieure à 0,05. Mais à 10%, le test montre que l'estimation à effets aléatoires est appropriée.

La présence d'effets fixes dans la seconde sous période nécessite une estimation à effets fixes et pour la première sous période on fera une estimation à effets aléatoires.

Estimation des paramètres

L'estimation des paramètres par la méthode des effets aléatoires permet d'obtenir les résultats qui suivent :

Tableau 17 : Résultats d'estimation (y_{it} = variable dépendante)

| Variables Indépendantes | 1993 à 1997 | | 1998 à 2002 | |
|----------------------------|-------------------------------|------------------------------|-----------------------------------|------------------------------|
| | Coefficients | Probabilités | Coefficients | Probabilités |
| Pl_{it} | 3,766477 | 0,505^(***) | 2,806347 | 0,097^(***) |
| Pl^2_{it} | -0,0034767 | 0,477 | -0,006896 | 0,003 ^(*) |
| trend | -1,250776 | 0,258 | 46,27317 | 0,026 ^(**) |
| h_{it} | -213,4907 | 0,400 | 259,9067 | 0,075 ^(***) |
| $Njrp_{it}$ | -22,17347 | 0,629 | -33,27437 | 0,009 ^(*) |
| pl_eng_{it} | 2,95e-06 | 0,289 | 5,84e-06 | 0,397 |
| pl_Njrp_{it} | 0,0300145 | 0,862 | 0,0514154 | 0,000 ^(*) |
| C | 6114,261 | 0,455 | -7161,124 | 0,118 |
| | Wald chi2(7) = 12,48 | Prob > chi2 = 0,0858 | F(7;25) = 5,01 | Prob > F = 0,0012 |
| | Random-effects GLS regression | | Fixed-effects (within) regression | |

Source : Estimation données d'enquête

(*) significatif à 1%, (**) significatif à 5%, (***) significatif à 10%

Avant l'interprétation des paramètres, on va effectuer le test d'hétéroscédasticité pour apprécier si les erreurs sont homoscedastiques ou pas. Cela permettra de savoir si les estimateurs obtenus sont efficaces.

Test de l'hétéroscédasticité

On aura recours au test de White pour effectuer ce test. On pourra utiliser les probabilités pour rejeter ou accepter les hypothèses. Ces dernières du test se présentent comme suit :

$$H_0 : \sigma_{it}^2 = \sigma^2 \quad \forall i = 1, \dots, 8 \quad t = 1, \dots, 5 \quad (\text{homoscedasticité})$$

$$H_1 : \sigma_{it}^2 \neq \sigma^2 \quad (\text{hétéroscédasticité})$$

Les différents résultats sont matérialisés dans les tableaux ci-dessous.

Tableau 18: De 1993 à 1997 Test de White (Hétéroscédasticité)

| | | | |
|----------------|----------|--------------------|--------|
| Taille (N) | 40 | Probabilité | 0,2041 |
| $LM_{cal}(20)$ | 38,33427 | Khi deux 5%(32) | 46,194 |

Source : Estimation données d'enquête

Tableau 19 : De 1998 à 2002 Test de White (Hétéroscédasticité)

| | | | |
|------------------------|---------|--------------------|--------|
| Taille (N) | 40 | Probabilité | 0,6874 |
| LM _{cal} (20) | 27,6334 | Khi deux 5%(32) | 46,194 |

Source : Estimation données d'enquête

Pour les deux sous périodes on observe que les probabilités sont supérieures à 5%. Cela permet d'accepter l'hypothèse nulle dans chacun des cas. On est dans un cas d'homoscédasticité pour les deux sous périodes. Les estimateurs obtenus sont donc efficaces.

Détermination du niveau optimal de pluviométrie pour le sorgho

Pour obtenir ce niveau, on doit partir de l'expression de l'équation du rendement par rapport aux différentes variables. Cette équation est :

$$y_{it} = u + \theta_1 pl_{it} + \theta_2 pl_{it}^2 + \theta_3 trend + \theta_4 njrp_{it} + \theta_5 (pl_eng)_{it} + \theta_6 (pl_njrp)_{it} + \eta_{it}$$

A l'optimum $\frac{\partial y_{it}}{\partial pl_{it}} = 0$; en dérivant on obtient les résultats suivants :

$$\frac{\partial y_{it}}{\partial pl_{it}} = \theta_1 + 2\theta_2 pl_{it} = 0 \Leftrightarrow pl_{it}^* = \frac{-\theta_1}{2\theta_2} ;$$

Pour l'application on aura une valeur pour chaque sous période (utiliser seulement les coefficients de la deuxième sous période car c'est à ce niveau que la variable pl_{it}^2 est significative). Cela donne :

- Sous période 1 : $pl_{it}^* = \frac{-\theta_1}{2\theta_2} = \frac{-3,766477}{2(-0,006896)} = 273,091430$

- Sous période 2 : $pl_{it}^* = \frac{-\theta_1}{2\theta_2} = \frac{-2,806347}{2(-0,006896)} = 203,476435$

On voit que dans la première sous période la quantité optimale est plus élevée que dans la deuxième, ce qui traduit un besoin plus important d'eau pour la première sous période car

elle est moins arrosée. Pour la deuxième sous période qui est plus humide à cause des pluies additionnelles, la quantité optimale nécessaire est moindre.

CODESRIA - BIBLIOTHEQUE

3.2. PECHE

Ce point expose les résultats empiriques quant à l'impact éventuel de l'ensemencement des nuages sur les rendements de pêche pour les acteurs de la filière.

Résultats empiriques et tests

Pour effectuer les tests de racine unitaire, nous avons recouru à trois tests qui sont les tests ADF, Philips-Perron et celui de Kwiatkowski Philips Schmidt et Shin communément appelé KPSS.

- **Test Augmented Dickey and Fuller (ADF)**

Le test ADF (1979) s'effectue pour tout processus x_t , selon les modèles de base suivants :

$$\text{Modèle 1 : } \Delta x_t = \phi x_{t-1} + \sum_{j=1}^p \alpha_j \Delta x_{t-j} + \mu_t$$

$$\text{Modèle 2 : } \Delta x_t = \phi x_{t-1} + \sum_{j=1}^p \alpha_j \Delta x_{t-j} + c + \mu_t$$

$$\text{Modèle 3 : } \Delta x_t = \phi x_{t-1} + \sum_{j=1}^p \alpha_j \Delta x_{t-j} + c + \beta t + \mu_t$$

De manière générale, ce test de stationnarité est basé sur les hypothèses suivantes :

$$H_0 : \phi = 0 \text{ non stationnaire} \\ H_1 : |\phi| < 1 \text{ stationnaire} \quad \text{Avec } \phi = \phi - 1$$

Soit $C_{(\alpha)}$ la valeur critique au seuil α , si $t_{\phi} > C_{(\alpha)}$ on accepte l'hypothèse nulle qui signifie que la série n'est pas stationnaire, dans le cas contraire on rejette l'hypothèse nulle.

- **Test de Phillips-Perron**

Ce test de Philips-Perron est voisin du test de racine unitaire de Dickey et Fuller. Il est utilisé en présence d'erreurs hétéroscédastiques et/ou autocorrélées. Ce test part des trois modèles de base proposés dans le test ADF. On a :

$$\Delta x_t = \phi x_{t-1} + D_t \text{ Où } D_t \text{ est la partie déterministe et } \phi = 1 - \varphi$$

La statistique de Phillips-Perron est construite à partir de la variance de court terme $\hat{\sigma}^2$ et de long terme s_t^2 du résidu estimé e_t . La statistique utilisée est :

$$pp = \sqrt{k} \frac{\hat{\phi} - 1}{\hat{\sigma}_\phi} + \frac{T(k-1)\hat{\sigma}_\phi}{\sqrt{k}}; \text{ Avec } k = \frac{\hat{\sigma}^2}{s_t^2}$$

Les hypothèses du test sont identiques à celle du test ADF :

$$H_0 : \phi = 0 \text{ non stationnaire} \\ H_1 : |\phi| < 1 \text{ stationnaire} \quad \text{Avec } \phi = \varphi - 1$$

La décision est prise en comparant les valeurs de la statistique de PP aux valeurs critiques de la table de Mc Kinnon.

▪ Test de Kwiatkowski, Philips, Schmidt et Shin (KPSS)

Le test KPSS (1992) est innovateur en comparaison des premiers tests de Dickey-Fuller, ou de type Perron, dans lesquels l'hypothèse nulle suppose la présence d'une racine unitaire. C'est un test qui vient palier la faible puissance⁸ des tests précédents.

L'hypothèse nulle de ce test est celle de la stationnarité (autour d'une constante ou d'une tendance déterministe linéaire) contrairement aux autres tests de racine unitaire.

Pour toute série y_t , elle est composée d'un trend déterministe, d'une marche stochastique et d'un aléa ; on a deux situations (avec ou sans trend) :

$$(1) y_t = r_t + \varepsilon_t \text{ où } \varepsilon_t \sim I(0), r_t = r_{t-1} + \mu_t \text{ et } \mu_t \sim BB(0; \sigma_\mu^2)$$

$$(2) y_t = \beta t + r_t + \varepsilon_t \text{ avec } \varepsilon_t \sim I(0), r_t = r_{t-1} + \mu_t \text{ et } \mu_t \sim BB(0; \sigma_\mu^2)$$

Les hypothèses du test sont les suivantes :

$$H_0 : \sigma_\mu^2 = 0 \text{ (} r_t = \text{constante)}$$

$$H_1 : \sigma_\mu^2 > 0$$

Sous H_0 la série y_t est stationnaire tandis que sous H_1 elle est non stationnaire.

La statistique utilisée pour tester l'hypothèse nulle de stationnarité est une statistique de khi deux qui est un multiplicateur de Lagrange (LM), pour tester $\sigma_\mu^2 = 0$. On considère ε_t stationnaire autour d'un trend linéaire. Si $\beta = 0$, sous l'hypothèse nulle, Y_t est stationnaire autour d'un niveau (r_0) et non plus autour d'un trend linéaire.

⁸ La puissance d'un test est donnée par la probabilité qui conduit à rejeter correctement une hypothèse nulle fautive.

Posons e_t , les aléas tirés de la régression de Y_t sur une constante et un trend déterministe.

La statistique est alors : $LM = \frac{\sum_{t=1}^T S_t^2}{\sigma_\varepsilon^{*2}}$ avec : $S_t = \sum_{i=1}^t e_i$, $t = 1, 2, \dots, T$

Elle représente la somme partielle des aléas et σ_ε^{*2} est la variance estimée des aléas e_t . C'est le cas où les erreurs sont indépendantes et identiquement distribuées (i.i.d).

- ✓ on teste l'hypothèse nulle de stationnarité à niveau au lieu de la stationnarité autour du trend. Pour ce faire, on définit e_t comme les aléas tirés de la régression de Y_t sur une constante uniquement ;
- ✓ si les erreurs ne sont pas indépendantes, identiquement distribuées, la variance de court terme σ_ε^{*2} est remplacée par la variance de long terme σ_{Tl}^{*2} des résidus tel que cela a été déjà noté dans le test PP.

$$\sigma_{Tl}^{*2} = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T e_t^2 + \frac{2}{T} \sum_{s=1}^l \left(1 - \frac{s}{l+1}\right) \sum_{t=s+1}^T e_t e_{t-s}$$

Dans ce cas la statistique utilisée à niveau comme autour d'une tendance est :

$$LM_\mu = \frac{\sum_{t=1}^T S_t^2}{T^2 \sigma_{Tl}^{*2}}$$

Décision

Si la valeur calculée LM est inférieure à la valeur critique dans la table, on accepte l'hypothèse nulle de stationnarité.

Si la valeur calculée est supérieure à la valeur théorique, on rejette l'hypothèse nulle de stationnarité.

Pour l'estimation des paramètres le modèle retenu est :

$$\ln(C_t) = k + \delta \ln f_t - b f_t + \sum_{i=0}^2 \beta_i y_{t-i} + \alpha_1 z_i g_t + \alpha_2 p i r_t + u_t \text{ Avec } i = 1, 2$$

- **Test de racine unitaire : test ADF**

Après avoir effectué le test les résultats suivants ont été obtenus :

Tableau 20 : Test de racine unitaire de Dickey-Fuller Augmenté

| Variables | A Niveau | | | En différence première | | | Ordre d'intégration |
|-------------------|----------|--------------------|---------------------|------------------------|--------------------|---------------------|---------------------|
| | Modèle | ADF _{cal} | Critical Value (CV) | Modèle | ADF _{cal} | Critical Value (CV) | |
| Ln C _t | 2 | -7,8365 | -2,8858 | | | | I(0) |
| f _t | 2 | -5,7673 | -2,8858 | | | | I(0) |
| Ln f _t | 2 | -5,7779 | -2,8858 | | | | I(0) |
| Y _t | 2 | -6,0429 | -2,8860 | | | | I(0) |
| Y _{t-1} | 2 | -6,1157 | -2,8860 | | | | I(0) |
| Y _{t-2} | 2 | -6,0461 | -2,8865 | | | | I(0) |
| Zig _t | 3 | -1,4773 | -3,4519 | 1 | -2,4586 | -1,9438 | I(1) |
| Pir _t | 3 | -0,040 | -3,4519 | 3 | -8,1613 | -3,4519 | I(1) |

NB: ADF_{cal}= Augmented-Dickey-Fuller calculé CV= valeur critique lue sur la table de Mc Kinnon

Les résultats du test ADF effectué avec le logiciel (Eviews 6) montrent que six (6) variables sont intégrées à niveau c'est-à-dire stationnaire à niveau et seules deux variables sont stationnaires en différence première.

Effectuons le test de Phillips-Perron pour observer les résultats.

- **Test de racine unitaire : test Phillips-Perron (PP)**

Les résultats obtenus sont les suivants :

Tableau 21: Test de racine unitaire de Phillips-Perron

| Variables | A Niveau | | | En différence première | | | Ordre d'intégration |
|-------------------|----------|-------------------|---------------------|------------------------|-------------------|---------------------|---------------------|
| | Modèle | PP _{cal} | Critical Value (CV) | Modèle | PP _{cal} | Critical Value (CV) | |
| Ln C _t | 2 | -7,9465 | -2,8858 | | | | I(0) |
| f _t | 2 | -5,8141 | -2,8858 | | | | I(0) |
| Ln f _t | 2 | -5,8198 | -2,8858 | | | | I(0) |
| Y _t | 2 | -3,7181 | -2,8858 | | | | I(0) |
| Y _{t-1} | 2 | -3,6779 | -2,8860 | | | | I(0) |
| Y _{t-2} | 2 | -3,5963 | -2,8862 | | | | I(0) |
| Zig _t | 3 | -1,9002 | -3,4480 | 1 | -6,7036 | -1,9435 | I(1) |
| Pir _t | 3 | -2,8282 | -3,4480 | 1 | -12,3173 | -1,9435 | I(1) |

NB: PP_{cal}= Phillips-Perron calculé CV= valeur critique lue sur la table de Mc Kinnon

Les résultats obtenus par ce test confirment ceux déjà obtenus avec celui ADF : les six premières séries sont intégrées à niveau et les séries Zig et Pir sont intégrées d'ordre 1.

Effectuons le test KPSS pour observer les résultats.

- **Test de Kwiatkowski, Philips, Schmidt et Shin (KPSS)**

Les opérations réalisées avec le logiciel permettent d'obtenir les résultats suivants :

Tableau 22 : Test de racine unitaire KPSS

| Variables | A Niveau | | | En différence première | | | Ordre d'intégration |
|-------------------|----------|-------------------|---------------------|------------------------|-------------------|---------------------|---------------------|
| | Modèle | LM _{cal} | Critical Value (CV) | Modèle | LM _{cal} | Critical Value (CV) | |
| Ln C _t | 2 | 0,1173 | 0,4630 | | | | I(0) |
| f _t | 2 | 0,0676 | 0,4630 | | | | I(0) |
| Ln f _t | 2 | 0,0685 | 0,4630 | | | | I(0) |
| Y _t | 2 | 0,0941 | 0,4630 | | | | I(0) |
| Y _{t-1} | 2 | 0,0824 | 0,4630 | | | | I(0) |
| Y _{t-2} | 2 | 0,0713 | 0,4630 | | | | I(0) |
| Zig _t | 3 | 0,3164 | 0,1460 | 2 | 0,2785 | 0,4630 | I(1) |
| Pir _t | 3 | 0,3637 | 0,1460 | 2 | 0,3648 | 0,4630 | I(1) |

NB: LM_{cal}= Lagrange Multiplier calculé CV= valeur critique lue sur Kwiatkowski-Phillips-Schmidt-Shin (1992,

Table 1)

Les résultats obtenus par ce test confirment ceux obtenus par les précédents tests ; seules les séries Pir_t et Zig_t sont intégrées d'ordre 1.

▪ **Résultats d'estimation**

La régression à partir des différentes séries donne les résultats qui suivent :

Tableau 23 : Résultats d'estimation

| Variables Indépendantes | Coefficients | Probabilités |
|--------------------------------|------------------|--------------------|
| Ln ft | 112,9659 | 0,0000(*) |
| ft | -118,2131 | 0,0000(*) |
| Y _t | -0,117037 | 0,0688(***) |
| Y _{t-1} | 0,175287 | 0,0635(***) |
| Y _{t-2} | -0,090276 | 0,1573 |
| I _t _Y _t | -0.020044 | 0,0942(***) |
| ΔPir _t | -1,056604 | 0,8429 |
| ΔZig _t | 0,426700 | 0,0243(**) |
| C | -9057806 | 0,0000(*) |
| n | 118 | |
| R ² ajusté | 0,999981 | |
| F- statistic | 772285,0 | 0,0000 |
| Durbin-Watson stat | 1,9886 | |

Source : Estimation données d'enquête ; (*) significatif à 1%, (**) significatif à 5%, (***) significatif à 10%

Au seuil de 10%, on observe que la plupart des variables sont significatives car leurs probabilités associées sont inférieures à 0,10.

Les hypothèses du test de significativité de l'ensemble des coefficients sont :

$$H_0 : \delta = b = \beta_i = \alpha_i = 0 \quad \forall i$$

$$H_1 : \text{au moins un des coefficients est } \neq 0$$

Le test de significativité de l'ensemble des coefficients à partir de la statistique de Fisher (F-statistic) révèle la significativité de l'ensemble de ces coefficients car la probabilité associée est nulle. Ce qui permet de dire que tous les coefficients ne sont pas nuls.

En outre, le modèle est adéquat dans son ensemble à cause de la valeur du coefficient d'adéquation (R²).

▪ **Autocorrélation**

Pour tester la présence d'auto corrélation des erreurs, le test effectué est celui de Breusch-Godfrey (Wooldridge, 1991). Ce test permet de tester la présence d'autocorrélation des erreurs quel que soit le nombre de retards.

A partir des résultats du tableau, la valeur du Durbin Watson (1,9886) laisse présager d'une absence de corrélation des erreurs.

$$\ln(C_t) = k + \delta \ln f_t - b f_t + \sum_{i=0}^2 \beta_i y_{t-i} + \alpha_1 z i g_t + \alpha_2 p i r_t + u_t$$

En faisant l'hypothèse de l'existence d'une autocorrélation d'ordre p, on aura l'équation suivante :

$$u_t = c + \varphi_p u_{t-p}$$

Les hypothèses du test de Breusch-Godfrey sont les suivantes :

H_0 : tous les $\varphi_p = 0$ absence d'autocorrélation d'ordre p

H_1 : tous les $\varphi_p \neq 0$ présence d'autocorrélation d'ordre p

La statistique utilisée est un khi deux à p degré de liberté qui est : $LM = nR^2 \sim \chi^2_{(p)}$

Les résultats du test se présentent comme suit :

Tableau 24 : Test de l'autocorrélation à l'ordre 2

| Breusch-Godfrey Serial Correlation LM Test: p = 2 | | | |
|--|----------|---------------------|--------|
| F-statistic | 0.057544 | Prob. F(2,107) | 0.9441 |
| Obs*R-squared (LM) | 0.126784 | Prob. Chi-Square(2) | 0.9386 |

Source : Estimation données d'enquête

Tableau 25 : Test de l'autocorrélation à l'ordre 3

| Breusch-Godfrey Serial Correlation LM Test: p = 3 | | | |
|--|----------|---------------------|--------|
| F-statistic | 0.039691 | Prob. F(3,106) | 0.9894 |
| Obs*R-squared (LM) | 0.132404 | Prob. Chi-Square(3) | 0.9877 |

Source : Estimation données d'enquête

A l'ordre 2 et à l'ordre 3, on observe que les probabilités associées au Multiplicateur de Lagrange sont largement supérieures à 5%. Cela permet d'accepter l'hypothèse nulle absence d'autocorrélation des erreurs.

▪ **Hétéroscédasticité**

Pour vérifier si la structure est hétéroscédastique nous aurons recours au test de White. Les hypothèses du test se présentent de la manière suivante :

$H_0 : \sigma_i(\varepsilon) = \sigma_j(\varepsilon) \forall i \neq j$ (Homoscédasticité)

H_1 : Il existe au moins un couple (i ; j) tel que $\sigma_i(\varepsilon) \neq \sigma_j(\varepsilon)$ (Hétéroscédasticité)

Décision : Au seuil de 5% si Proba (F-statistique) > 0,05, on accepte H_0 et concluons qu'il y a homoscédasticité. Dans le cas contraire, il y a hétéroscédasticité.

Les résultats du test de White sont les suivants :

Tableau 26: Test de White (Hétéroscédasticité)

| | | | |
|--------------------|----------|-------------|----------|
| F-statistic | 9,291757 | Probabilité | 0,000000 |
| Obs*R-squared (LM) | 96,42601 | Probabilité | 0,000000 |

Source : Estimation données d'enquête

La probabilité associée à la statistique calculée LM est nulle et donc inférieure à 5%. On rejette l'hypothèse nulle ; il y a hétéroscédasticité.

Corrigeons la présence d'hétéroscédasticité par la méthode d'estimation robuste. On obtient les résultats suivants :

Tableau 27 : White Heteroskedasticity-Consistent Standard Errors & Covariance

| Variables Indépendantes | Coefficients | Probabilités |
|-------------------------|------------------|--------------------|
| Ln ft | 112,9659 | 0,0000(*) |
| ft | -118,2131 | 0,0000(*) |
| Y_t | -0,117037 | 0,1114 |
| Y_{t-1} | 0,175287 | 0,0576(***) |
| Y_{t-2} | -0,090276 | 0,0895(***) |
| $I_t \cdot Y_t$ | -0,020044 | 0,0773(***) |
| ΔPir_t | -1,056605 | 0,7936 |
| ΔZig_t | 0,426700 | 0,0338(**) |
| C | -9057806 | 0,0000(*) |
| n | 118 | |
| R ² ajusté | 0,999981 | |
| F- statistic | 772285,0 | 0,0000 |
| Durbin-Watson stat | 1,9886 | |

Source : Estimation données d'enquête ; (*) significatif à 1%, (**) significatif à 5%, (***) significatif à 10%

3.3 HYDROELECTRICITE

Les impacts du programme d'ensemencement sur la production énergétique au niveau du barrage de Bagré sont présentés dans ce sous point et permettent d'apporter des éléments de réponse sur l'évolution de la production hydroélectrique.

La variable majeure est le volume d'eau turbiné. Ce volume symbolise aussi le taux de remplissage du barrage car selon les structures responsables de la gestion du barrage, le volume turbiné dépend intrinsèquement du taux de remplissage de la cuvette. Lorsque ce dernier est bas, le turbinage est faible et même interrompu quand la situation est critique.

Résultats empiriques et tests

A partir des séries chronologiques qui ont servi pour les besoins de la recherche, on a procédé dans un premier temps aux tests de racine unitaire des différentes variables du modèle à l'aide des tests ADF, Phillips-Perron et KPSS.

Notre modèle économétrique pour évaluer l'influence de l'action du programme Saaga est le suivant : $\ln E_t = \alpha_0 + \alpha_1 \ln V_t + \alpha_2 \ln T_t + \alpha_3 \ln \eta_t + e_t$

Le rendement η étant une constante ce qui va réduire le modèle à la forme suivante :

$$\ln E_t = \alpha_0 + \alpha_1 \ln V_t + \alpha_2 \ln T_t + e_t$$

Le rendement de la production (environ égal à 1 pour l'énergie hydroélectrique), la hauteur étant inchangée, la densité de l'eau ne variant pas et la constante gravitationnelle (invariable pour une même localité comme son nom l'indique) sont contenus dans la constante α_0 car leurs valeurs sont constantes.

A partir de ce modèle de base l'on a tiré une variante en faisant intervenir une variable muette int_t , qui matérialise l'intervention du programme ou pas. Ainsi,

$\text{int}_t = 1$ s'il y a ensemencement pendant le mois t

$\text{int}_t = 0$ s'il n'y a aucun ensemencement pendant le mois t

En partant de l'hypothèse que cette variable muette agit de manière combinée avec le quantité de pluie tombée et la quantité d'eau turbinée, on obtient le modèle suivant :

$$\ln E_t = \alpha_0 + \alpha_1 \ln V_t + \alpha_2 \ln T_t + \ln Pl_t * \text{int}_t + \ln V_t * \text{int}_t + e_t$$

Où Pl_t est la quantité de pluie tombée au mois t.

▪ **Test de racine unitaire : test ADF**

Les résultats des tests de stationnarité des différentes séries sont récapitulés comme suit :

Le test de stationnarité s'est basé sur les hypothèses suivantes :

$$H_0 : \phi = 0 \text{ non stationnaire}$$

$$H_1 : |\phi| < 0 \text{ stationnaire} \quad \text{Avec } \phi = \varphi - 1$$

Si $t_\phi > C_{(\alpha)}$ on accepte l'hypothèse nulle qui signifie que la série n'est pas stationnaire, dans le cas contraire on rejette l'hypothèse nulle.

Tableau 28 : Test de racine unitaire de Dickey-Fuller Augmenté

| Variables | En Niveau | | | En différence première | | | Ordre d'intégration |
|--------------------------------------|-----------|--------------------|----------------------|------------------------|--------------------|----------------------|---------------------|
| | Modèle | ADF _{cal} | Valeur critique (VC) | Modèle | ADF _{cal} | Valeur critique (VC) | |
| Ln E _t | 2 | -3,1309 | -2,8777 | | | | I(0) |
| Ln V _t | 2 | -2,8728 | -2,8777 | 2 | -4,5297 | -2,8777 | I(1) |
| Ln T _t | 2 | -3,0864 | -2,8777 | | | | I(0) |
| Ln Pl _t *int _t | 2 | -1,4718 | -2,8777 | 2 | -6,0943 | -2,8777 | I(1) |
| Ln Vt* int _t | 2 | -1,4709 | -2,8777 | | -4,9199 | -2,8777 | I(1) |

NB: ADF_{cal}= Augmented-Dickey-Fuller calculé VC= valeur critique lue sur la table de Mc Kinnon

A partir de ces résultats, on a deux variables qui sont stationnaires à niveau et trois qui sont intégrées en différence première.

▪ **Test de racine unitaire : test de Phillips-Perron**

Les hypothèses du test sont identiques à celle du test ADF :

$$H_0 : \phi = 0 \text{ non stationnaire}$$

$$H_1 : |\phi| < 0 \text{ stationnaire} \quad \text{Avec } \phi = \varphi - 1$$

La décision est prise en comparant les valeurs de la statistique de PP aux valeurs critiques de la table de Mc Kinnon.

Les résultats obtenus sont les suivants :

Tableau 29: Test de racine unitaire de Phillips-Perron

| Variables | En Niveau | | | | Ordre d'intégration |
|-------------------------|-----------|----------------|----------------------|------------------|---------------------|
| | Modèle | PP statistique | Valeur critique (VC) | Proba Coef trend | |
| Ln Et | 2 | -12,1443 | -2,8767 | | I(0) |
| Ln Vt | 2 | -14,9705 | -2,8767 | | I(0) |
| Ln Tt | 2 | -9,2313 | -2,8767 | | I(0) |
| Ln Plt*int _t | 3 | -7,0675 | -3,4243 | 0,0239 | I(0) |
| Ln Vt* int _t | 3 | -6,2840 | -3,4243 | 0,0743 | I(0) |

PP= Statistique de Phillips-Perron VC= valeur critique lue sur la table de Mc Kinnon

Le tableau nous montre que toutes les différentes séries sont stationnaires en niveau. On note également que le trend étant significatif pour 2 des 5 séries.

▪ **Test de Kwiatkowski, Philips, Schmidt et Shin (KPSS)**

Effectuons le test KPSS pour voir si les résultats obtenus par les tests ADF et PP seront identiques.

Les résultats du test sont présentés comme suit :

Tableau 30 : Test de racine unitaire KPSS

| Variables | En Niveau | | | | Ordre d'intégration |
|-------------------------|-----------|----------------|----------------------|------------------|---------------------|
| | Modèle | LM statistique | Valeur critique (VC) | Proba Coef trend | |
| Ln Et | 3 | 0,0956 | 0,1460 | 0,0002 | I(0) |
| Ln Vt | 3 | 0,1040 | 0,1460 | 0,0001 | I(0) |
| Ln Tt | 3 | 0,0692 | 0,1460 | 0,0000 | I(0) |
| Ln Plt*int _t | 3 | 0,1433 | 0,1460 | 0,0000 | I(0) |
| Ln Vt* int _t | 3 | 0,1063 | 0,1460 | 0,0743 | I(0) |

NB: LM_{cal}= Lagrange Multiplier calculé VC= valeur critique lue sur Kwiatkowski-Phillips-Schmidt-Shin (1992, Table 1)

Le test KPSS montre que l'ensemble des séries sont stationnaires en niveau.

Ainsi, on va considérer pour l'estimation que les différentes séries sont toutes intégrées à niveau car sur les trois tests de racine unitaire effectués, deux le confirment.

▪ Résultats d'estimation

A partir du logiciel Eviews, par la méthode des moindres carrés ordinaires (MCO), on a effectué la régression sur un échantillon de 192 observations. Les premiers résultats d'estimation sont les suivants :

Tableau 31 : Résultats d'estimation : Variable dépendante Ln Et

| Variables Indépendantes | Coefficients | Probabilités |
|----------------------------|-----------------|-----------------------------|
| Ln Vt | 0,733441 | 0,0000 ^(*) |
| Ln Tt | 0,269307 | 0,0346 ^(**) |
| [Ln (Plt) x int] | 0,598394 | 0,0003^(*) |
| [Ln (Vt) x int] | -0,089470 | 0,0002 ^(*) |
| C | 0,046490 | 0,9093 |
| n | 192 | |
| R ² ajusté | 0,900746 | |
| F- statistic | 434,3400 | 0,000000 |
| Durbin-Watson stat | 1,183768 | |

Source : Données d'enquête ; (*) significatif à 1%, (**) significatif à 5%, (***) significatif à 10%

La probabilité du F-statistic étant nulle, cela signifie que la régression est significative dans son ensemble, donc les coefficients des variables ne sont pas tous nuls.

En choisissant comme seuil de test, 5%, testons les différents coefficients.

$$H_0 : \beta_i = 0 \quad \forall i = 1, \dots, 4$$

$$H_1 : \beta_i \neq 0$$

Si $p < 0,05$ on rejette l'hypothèse nulle, qui signifie que le coefficient est significatif ; dans le cas contraire, on accepte l'hypothèse nulle.

Les coefficients des différents variables ont des probabilités toutes inférieures à 0,05. Cela montre qu'elles sont toutes significatives à ce seuil.

En observant le corrélogramme des résidus (voir annexe 3.1 tableau 52), on observe une corrélation des erreurs d'ordre 1. Nous allons effectuer le test de bruit blanc.

▪ Autocorrélation

Pour tester l'autocorrélation des erreurs, utilisons le test individuel de bruit blanc (THIOMBIANO, 2002). On lève dans ce cas l'hypothèse contraignante de normalité des erreurs. Utilisons la statistique $\sqrt{T} \times \varphi(\varepsilon)$ où $\varphi(\varepsilon)$ est le coefficient d'autocorrélation tel que $\varepsilon_t = \varphi\varepsilon_{t-1} + v_t$.

L'hypothèse à tester est :

$H_0 : \varphi(\varepsilon) = 0$ (Absence d'autocorrélation)

$H_1 : \text{Présence d'autocorrélation}$

Au seuil standard de 5%, on rejette H_0 si $\sqrt{T} \times \varphi(\varepsilon) \notin]-1,96; 1,96[$

La taille de l'échantillon étant de 192 et la régression de ε_t sur ε_{t-1} nous donne l'équation suivante : $\varepsilon_t = 0,408089\varepsilon_{t-1} + 0,000417$.

Ainsi, la statistique est $\sqrt{192} \times 0,408089$ soit 5,654. On observe que $5,654 \notin]-1,96; 1,96[$

On rejette donc au seuil de 5% l'hypothèse nulle, et on conclut à la présence d'autocorrélation.

Cela confirme l'observation faite sur le corrélogramme des résidus.

Corrigeons cette autocorrélation par la méthode de Durbin (THIOMBIANO, 2002).

Par transformation des variables on aura :

$$\ln E_t^* = \ln E_t - \varphi \ln E_{t-1}$$

$$\ln V_t^* = \ln V_t - \varphi \ln V_{t-1}$$

$$\ln T_t^* = \ln T_t - \varphi \ln T_{t-1}$$

$$[\ln(Pl_t) \times \text{int}_t]^* = [\ln(Pl_t) \times \text{int}_t] - \varphi [\ln(Pl_{t-1}) \times \text{int}_{t-1}]$$

$$[\ln(V_t) \times \text{int}_t]^* = [\ln(V_t) \times \text{int}_t] - \varphi [\ln(V_{t-1}) \times \text{int}_{t-1}]$$

Les résultats obtenus ont permis d'éliminer l'autocorrélation des erreurs et sont résumés dans le tableau ci-dessous.

Tableau 32 : Résultats d'estimation : Variable dépendante Ln Et*

| Variables | Coefficients | Probabilités |
|-----------------------|--------------|-----------------------|
| Indépendantes | | |
| Ln Vt* | 0,739400 | 0,0000 ^(*) |
| Ln Tt* | 0,234716 | 0,1083 |
| [Ln (Plt) x int]* | 0,368137 | 0,0071 ^(*) |
| [Ln (Vt) x int]* | -0,055038 | 0,0079 ^(*) |
| C | 0,095558 | 0,8249 |
| R ² ajusté | 0,735840 | |
| F- statistic | 133,3151 | 0,000000 |
| Durbin-Watson stat | 1,761911 | |

Source : Données d'enquête

(*) significatif à 1%, (**) significatif à 5%, (***) significatif à 10%

La nouvelle statistique du test est $\sqrt{191} \times 0,119$ soit 1,644 qui appartient bien à l'intervalle $]-1,96; 1,96[$, ce qui permet d'accepter H_0 et de conclure à l'absence d'autocorrélation.

▪ Hétéroscédasticité

En faisant recours au test de White, on pose les hypothèses comme suit :

$H_0 : \sigma_i(\varepsilon) = \sigma_j(\varepsilon) \forall i \neq j$ (Homoscédasticité)

H_1 : Il existe au moins un couple (i ; j) tel que $\sigma_i(\varepsilon) \neq \sigma_j(\varepsilon)$ (Hétéroscédasticité)

Les résultats du test sont récapitulés dans le tableau suivant :

Tableau 33 : Test de White (Hétéroscédasticité)

| | | | |
|--------------------|----------|-------------|----------|
| F-statistic | 1.739653 | Probabilité | 0.091949 |
| Obs*R-squared (LM) | 13.56792 | Probabilité | 0.093746 |

Source : Estimation données d'enquête

La probabilité de F- statistique 0,09 est supérieure à 0,05, on accepte donc H_0 , ce qui signifie qu'il ya homoscédasticité au seuil de 5%.

3.4 COUVERT VEGETAL

Cette section sert à tester l'hypothèse selon laquelle, l'ensemencement n'aurait pas d'effet sur la productivité du bois de forêt. La réponse à cela est apportée par les résultats d'estimation exposés dans ce sous point.

Résultats empiriques et tests

Pour parvenir aux résultats d'estimation, nous avons eu recours à un modèle dérivé du modèle de base présenté dans le chapitre 3 sur les modèles théoriques. Il se présente comme suit : $V = [D(x)]^\varphi \times A^Z$ où A^Z est une constante car elle représente la superficie qui n'est pas variable au niveau de nos forêts pour la période d'étude considérée (1998 à 2002).

Le modèle estimé est :

$$\ln(v_{it}) = \ln pl_{it} + btl_{it} - pl_{it} + \ln(btl_{it}) + \ln(dens_{it}) + \ln(pl_{it} - njrp) + c$$

La variable v_{it} est le volume de bois de la localité i à la période t en termes de productivité en $dm^3/ha/an$; btl_{it} exprime la taille du cheptel; pl_{it} la pluviométrie; $dens_{it}$ la densité de population; $njrp$ le nombre de jours pour la répartition des pluies dans une saison (répartition temporelle).

Nous allons effectuer les différents tests sur les deux périodes : celle avant intervention du programme (1993-1997) et celle après l'intervention (1998-2002).

❖ Présence d'effets individuels

En effectuant le test de spécification (Hurlin, 2000), qui est un test de la présence d'effets individuels, on peut déterminer s'il existe des effets propres à chaque zone forestière de l'échantillon. En d'autres termes, il s'agit de voir si à travers le modèle étudié, il existe des effets particuliers dus à la position géographique des individus qui sont représentés ici par chaque forêt dans les différentes provinces. Les hypothèses sont comme suit :

$$H_0 : u_i = 0 \quad \forall i = 1, \dots, 8$$

$$H_1 : u_i \neq 0$$

Sur le plan économique, les tests de spécification reviennent à déterminer si l'on est en droit de supposer que le modèle théorique étudié est parfaitement identique pour toutes les forêts des provinces, ou au contraire s'il existe des spécificités propres à chaque localité.

Ce test s'effectue par une régression en panel à effets fixes.

La statistique utilisée est une statistique de Fisher à $N-1$, $NT-N-K$ degré de liberté.

On obtient les résultats suivants :

Tableau 34 : Estimation pour le test d'effets individuels (\ln_{vit} = variable dépendante)

| Variables Indépendantes | 1993 à 1997 | | 1998 à 2002 | |
|---|--|-----------------------------|--|-----------------------------|
| | Coefficients | Probabilités | Coefficients | Probabilités |
| $\ln_{pl_{it}}$ | 1,754213 | 0,000 ^(*) | 1,762826 | 0,000 ^(*) |
| $Pl_{it_btl_{it}}$ | 1,36e-10 | 0,001 ^(*) | 8,59e-11 | 0,037 ^(**) |
| $\ln_{btl_{it}}$ | 0,0104666 | 0,843 | -0,0861537 | 0,115 |
| $\ln_{dens_{it}}$ | -0,0051173 | 0,828 | -0,0303107 | 0,446 |
| $\ln_{pl_{it_Njrp_{it}}}$ | 0,0117445 | 0,374 | 0,0050152 | 0,440 |
| C | -5,415145 | 0,000 ^(*) | -4,25714 | 0,000 ^(*) |
| F test that all $u_i=0$ | F(7;27) = 1,80 | Prob > F = 0,1292 | F(7;27) = 5,35 | Prob > F = 0,0006 |
| | F(5,27) = 12047,16 | Prob > F = 0,0000 | F(5,27) = 21086,25 | Prob > chi2 = 0,0001 |
| Fixed-effects (within) regression | Nombre d'observations = 40 Nombre de groupes = 8 Nombre d'années = 5 | | Nombre d'observations = 40 Nombre de groupes = 8 Nombre d'années = 5 | |

Source : Estimation données d'enquête

(*) significatif à 1%, (**) significatif à 5%, (***) significatif à 10%

De 1993 à 1997, l'estimation donne les résultats du test de l'ensemble des coefficients u_i qui est un test de Fisher. On voit que $prob(F) = 0,1292 > 0,05$, ce qui permet d'accepter l'hypothèse H_0 au seuil de 5%. On peut conclure qu'il n'existe aucun u_i non nul.

Cela permet de dire que sur la période de 1993 à 1997, il n'y a pas d'effets individuels liés à chacune des zones forestières, qui affectent le niveau de productivité du bois.

Par contre, sur la période 1998 à 2002, on a $prob(F) = 0,0006 < 0,05$. Dans ce cas, on peut rejeter l'hypothèse nulle et conclure de la présence d'effets individuels. On peut donc supposer qu'il existe des effets individuels liés à la position géographique de chacune des forêts au niveau de l'échantillon retenu.

❖ Test de Hausman

Les hypothèses du test sont les suivantes :

$$H_0 : \phi_{RE} = \phi_{FE} \forall i = 1, \dots, 8 \quad \text{Où } \phi \text{ représente la matrice des coefficients des différentes}$$

$$H_1 : \phi_{RE} \neq \phi_{FE}$$

variables avec : ϕ_{RE} , lorsque les coefficients sont estimés par un modèle à effets aléatoires ;

ϕ_{FE} , lorsque les coefficients sont estimés par un modèle à effets fixes.

Les résultats des estimations sont les suivants :

Tableau 35 : Test de Hausman pour le couvert végétal

| Test | 1993 à 1997 | 1998 à 2002 |
|--|--|---------------|
| H ₀ | différence des coefficients non systématiques | |
| chi2(4) | (b-B)'[(V _b -V _B) ⁻¹](b-B) | |
| chi2(4) | 6,49 | 5,27 |
| Prob>chi2 | 0,1651 | 0,2609 |
| Nombre d'observations = 40 Nombre de groupes = 8 Nombre d'années = 5 | b = consistant sous H ₀ and H ₁ ; obtained de xtreg B = inconsistant sous H ₁ , efficient sous H ₀ ; obtenu par régression xtreg | |

Source : Estimation données d'enquête

De 1993 à 1997, le $\chi^2_{calculé} = 6,49$;

De 1998 à 2002 le $\chi^2_{calculé} = 5,27$.

A l'issue du test de Hausman, le χ^2 donné par la table à 5% à 4 degrés de liberté est de $\chi^2_{5\%}(4) = 9,488$. On a donc pour les deux périodes $\chi^2_{calculé} < \chi^2_{5\%}(4)$, ce qui permet de dire que l'hypothèse nulle est acceptée. Ce résultat signifie qu'on rejette l'hypothèse alternative.

Ce test permet de conclure sur le fait que les coefficients du modèle à effets aléatoires et ceux du modèle à effets fixes sont sensiblement égaux, et par conséquent, le modèle à effets aléatoires peut être utilisé pour l'estimation pour les deux périodes. Mais pour la seconde sous période, la présence d'effets individuels nous amène à opter pour un modèle à effets fixes.

L'utilisation du modèle à effets aléatoires nous donne les résultats suivants :

Tableau 36 : Résultats d'estimation (\ln_{vit} = variable dépendante)

| Variables Indépendantes | 1993 à 1997 | | 1998 à 2002 | |
|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------|-----------------------------------|------------------------|
| | Coefficients | Probabilités | Coefficients | Probabilités |
| $\ln_{pl_{it}}$ | 1,751101 | 0,000 | 1,762826 | 0,000 |
| $Pl_{it_btl_{it}}$ | 1,08e-10 | 0,002 | 8,59e-11 | 0,037 |
| $\ln_{btl_{it}}$ | -0,0494272 | 0,006 | -0,0861537 | 0,115 |
| $\ln_{dens_{it}}$ | -0,0042485 | 0,135 | -0,0303107 | 0,446 |
| $\ln_{pl_{it}}_{_Njrp_{it}}$ | 0,0185131 | 0,084 | 0,0050152 | 0,440 |
| C | -4,665242 | 0,000 | -4,25714 | 0,000 |
| | Wald chi2(5) = 69684,49 | Prob > chi2 = 0,0000 | F(5;27) = 21086,25 | Prob > chi2= 0,0001 |
| | Random-effects GLS regression | | Fixed-effects (within) regression | |

Source : Estimation données d'enquête

(*) significatif à 1%, (**) significatif à 5%, (***) significatif à 10%

Mais ces résultats peuvent présenter des variances différentes surtout parce que nous avons des données qui sont aussi réparties dans l'espace.

▪ Hétéroscédasticité

Il est nécessaire de soumettre ces résultats au test de l'hétéroscédasticité (test de White, 1980) pour apprécier l'efficacité des coefficients obtenus car nous avons des données de panels où l'hétéroscédasticité est très souvent rencontrée.

Dans ce test, on doit vérifier si la variance des erreurs de chaque individu est constante, c'est-à-dire si la variance des erreurs entre les trois forêts qui sont dans les provinces du Ganzourgou, du Kadiogo et de l'Oubritenga est la même. Si elle est la même, on sera dans un cas d'homoscédasticité, ce qui rend les coefficients efficaces, mais en situation d'hétéroscédasticité cela rend les coefficients non pertinents car les hypothèses de Gauss Markov ne seront pas toutes vérifiées (Wooldridge, 2002).

Ces hypothèses selon le théorème de Gauss-Markov sont :

- l'espérance du terme de l'erreur est nulle $E(\varepsilon_i) = 0$
- les variances du terme de l'erreur sont identiques $V(\varepsilon_i) = \sigma_\varepsilon^2$
- les erreurs sont statistiquement indépendantes $Cov(\varepsilon_i; \varepsilon_j) = 0$
- il n'y a pas de relation entre l'erreur et le régresseur $Cov(\varepsilon_i; x_i) = 0$

Le modèle de base n'est pas linéaire, mais il a été linéarisé par différentes transformations pour les estimations.

Nous utiliserons le test de White qui permet de vérifier si le carré des résidus est expliqué avec une combinaison non linéaire des différentes variables explicatives. La procédure est la suivante (Wooldridge, 2002) : l'hypothèse nulle d'homoscédasticité n'est vérifiée que lorsque tous les coefficients de cette régression sont nuls. Cela revient à dire que les différentes variables n'expliquent pas le carré du terme de l'erreur, il y a à ce moment homoscédasticité ; en d'autres termes, la valeur de la probabilité est supérieure au seuil de confiance α .

Dans le cas contraire, si la valeur de la probabilité est inférieure au seuil α , au moins une des variables explique le carré du terme de l'erreur : il y a hétéroscédasticité que l'on doit corriger.

La statistique utilisée est celle de Fisher car c'est un test de la régression entière ou la statistique LM (Lagrange Multiplier) qui suit la loi de chi deux : $W_h = LM = NR_\varepsilon^2 \rightarrow \chi^2(p)$

On peut également utiliser les probabilités pour conclure sur la présence ou non d'hétéroscédasticité.

Ainsi, les hypothèses du test sont les suivantes : si la variance des erreurs de chaque individu est constante dans le temps :

On aura $H_0 : \sigma_{it}^2 = \sigma^2 \quad \forall i = 1, \dots, 8 \quad t = 1, \dots, 5$

$$H_1 : \sigma_{it}^2 \neq \sigma^2$$

Avec l'estimation de nos paramètres, le logiciel Stata nous donne les résultats du test de White qui sont présentés dans le tableau ci-dessous :

Tableau 37 : De 1993 à 1997 Test de White (Hétéroscédasticité)

| | | | |
|----------------|----------|-----------------|--------|
| Taille (N) | 40 | Probabilité | 0,0118 |
| $LM_{cal}(19)$ | 35,59203 | Khi deux 5%(19) | 30,144 |

Source : Estimation données d'enquête

Tableau 38 : De 1998 à 2002 Test de White (Hétéroscédasticité)

| | | | |
|----------------|---------|------------------|--------|
| Taille (N) | 40 | Probabilité | 0,1207 |
| $LM_{cal}(19)$ | 26,3509 | Khi deux 5% (19) | 30,144 |

Source : Estimation données d'enquête

➤ De 1993 à 1997

Au seuil de 5%, la probabilité que nous obtenons avec le test de White est largement inférieure à 0,05, ce qui conduit à rejeter l'hypothèse nulle, cela signifie qu'il y a hétéroscédasticité. Ce résultat est le même avec le LM car à 19 degrés de liberté, et à 5%, on a $LM_{5\%}(19) = 35,59203$. On obtient donc $LM_{cal}(19) > LM_{5\%}(19)$ ce qui permet de rejeter l'hypothèse nulle.

Ainsi, on conclut en disant qu'il y a hétéroscédasticité.

➤ De 1998 à 2002

Au seuil de 5%, la probabilité que nous obtenons avec le test de White est supérieure à 0,05 ce qui conduit à accepter l'hypothèse nulle, ce qui signifie qu'il y a homoscedasticité. Ce résultat est le même avec le LM car à 19 degrés de liberté et à 5%, on a $LM_{5\%}(19) = 26,3509$. On obtient donc $LM_{cal}(19) < LM_{5\%}(19)$, ce qui permet d'accepter l'hypothèse nulle. Ainsi, on conclut en disant qu'il ya homoscedasticité.

L'hétéroscédasticité présente dans les résultats de la première période est une hétéroscédasticité intra individus (au sein de la forêt elle-même) et non inter individus car dans le cas de cette période, nous avons plus haut vérifié qu'il n'existait pas d'effet individuel. Cela signifie que l'hétéroscédasticité existante se situe au niveau de chaque forêt dans le temps.

➤ **Correction de l'hétéroscédasticité pour 1993-1997**

Corrigeons l'hétéroscédasticité en calculant les variances robustes d'Eicker-White (1967,1980). Cette méthode nous donne le tableau suivant ci-dessous :

Tableau 39 : Estimation robuste de la première sous période (1993-1997)

| Variables | Coefficients | Probabilités |
|---|--------------|-----------------------|
| Indépendantes | | |
| Ln_Pl _{it} | 1,751101 | 0,000 ^(*) |
| Pl _{it} _bl _{it} | 1,08e-10 | 0,009 ^(*) |
| Ln_bl _{it} | -0,0494272 | 0,017 ^(**) |
| Ln_dens _{it} | -0,0042485 | 0,103 |
| Ln_pl _{it} _Njrp _{it} | 0,0185131 | 0,208 |
| C | -4,665242 | 0,000 ^(*) |
| Wald chi2 (5) | 5,06e+06 | 0,000 |
| n | 40 | |

Source : Estimation données d'enquête

(*) significatif à 1%, (**) significatif à 5%, (***) significatif à 10%

▪ **Autocorrélation**

- **Autocorrélation intra-individus**

Effectuons à présent le test d'autocorrélation intra-individus. On cherche donc à vérifier si les erreurs sont autocorrélées, c'est-à-dire $E(e_{it} \cdot e_{is}) \neq 0 \quad \forall t \neq s$ de forme autorégressive d'ordre 1 AR(1) selon l'équation :

$$e_{it} = \varphi e_{it-1} + z_{it} \text{ pour chaque individu.}$$

Ainsi, les hypothèses du test sont :

$$H_0 : \varphi = 0, \text{ absence d'autocorrélation } \forall t = 1, \dots, 5 \text{ pour chaque individu}$$

$$H_1 : \varphi \neq 0, \text{ présence d'autocorrélation}$$

Le test est un test de Fisher de l'ensemble de la régression, et les résultats sont consignés dans les tableaux ci-dessous :

➤ **De 1993 à 1997**

Tableau 40 : Test d'autocorrélation par le Wald (**Wooldridge test for autocorrelation in panel data**)

| H ₀ | (Absence d'autocorrélation D'ordre 1) | Valeurs de références lues sur la table |
|----------------|---------------------------------------|---|
| F (1; 7) | 2,637 | 5,591 |
| Prob > F | 0,1484 | 0,05 |

Source : Estimation données d'enquête

On obtient $2,637 < 5,591$, donc $F(1;7)_{cal} < F_{lue}(1;7)$. Ceci permet d'accepter l'hypothèse nulle.

De même, on voit que la valeur de la probabilité est supérieure 0,05 soit 5%, ce qui signifie qu'on accepte l'hypothèse nulle au seuil de 5%. Il y a donc absence d'autocorrélation des erreurs intra individus d'ordre 1 au seuil de 5%.

➤ **De 1998 à 2002**

Tableau 41 : Test d'autocorrélation par le Wald (**Wooldridge test for autocorrelation in panel data**)

| H ₀ | (Absence d'autocorrélation D'ordre 1) | Valeurs de références lues sur la table |
|----------------|---------------------------------------|---|
| F (1; 7) | 5,740 | 5,591 |
| Prob > F | 0,0478 | 0,05 |

Source : Estimation données d'enquête

Dans ce cas, on a $5,740 > 5,591$, donc $F(1;7)_{cal} > F_{lue}(1;7)$. Ceci permet de rejeter l'hypothèse nulle. Cela est confirmé par la valeur de la probabilité qui est inférieure à 0,05 soit 5%, ce qui signifie qu'on rejette l'hypothèse nulle au seuil de 5%. Il y a donc présence d'autocorrélation des erreurs intra individus d'ordre 1 au seuil de 5%.

A la suite des différents tests effectués, on peut récapituler les résultats dans le tableau suivant :

Tableau 42 : Récapitulatif des tests effectués

| De 1993 à 1997 | De 1998 à 2002 |
|------------------------------|-------------------------------|
| Absence d'effets individuels | Présence d'effets individuels |
| Hétéroscédasticité | Homoscédasticité |
| Absence d'autocorrélation | Présence d'autocorrélation |

Source : Résultats de tests

Suite à ces différents résultats de tests, les estimations ont été faites pour corriger les différents problèmes.

Pour corriger l'hétéroscédasticité, nous avons utilisé l'estimation robuste. Pour le second cas, nous avons eu recours à l'estimation par les moindres carrés généralisés (MCG) tout en spécifiant l'absence d'hétéroscédasticité et la présence de l'autocorrélation qui est corrigé ; car en ce moment, les estimateurs obtenus par les moindres carrés ordinaires ne sont pas pertinents (Wooldridge, 2002). On obtient les résultats suivants :

Tableau 43 : Résultats d'estimation : Variable dépendante Ln V_{it}

| Variables Indépendantes | 1993 à 1997 | | 1998 à 2002 | |
|-------------------------------------|--|--------------|--|--------------|
| | Coefficients | Probabilités | Coefficients | Probabilités |
| Ln_Pl _{it} | 1,751101 | 0,000(*) | 1,782379 | 0,000(*) |
| Pl _{it} _Btl _{it} | 1,08 e-08 | 0,009(*) | 5,69 e-11 | 0,098(***) |
| Ln_Btl _{it} | -0,0494272 | 0,017(**) | -0,0413454 | 0,022(**) |
| Ln_Dens _{it} | -0,0042485 | 0,103 | -0,0046821 | 0,010(*) |
| Ln_Pl _{it} _Njrp | 0,0185131 | 0,208 | 0,0065093 | 0,267 |
| Constante | -4,665242 | 0,000(*) | -4,825417 | 0,000(*) |
| Wald chi2(4) | 5,06 e+06 | 0,0000 | 109104,13 | 0,0000 |
| | Nombre d'observations = 40 Nombre de groupes = 8 Nombre d'années = 5 | | Nombre d'observations = 40 Nombre de groupes = 8 Nombre d'années = 5 | |

Source : estimations des données d'enquêtes

(*) significatif à 1%, (**) significatif à 5%, (***) significatif à 10%

A partir de ces différents résultats économétriques, on peut tirer des résultats et les interpréter et les analyser afin de répondre aux objectifs de cette recherche. Les différentes interprétations permettront de rejeter ou d'accepter les hypothèses de travail énoncées.

CODESRIA - BIBLIOTHEQUE

CHAPITRE 4 : ET INTERPRETATION DES RESULTATS ET ANALYSE ECONOMIQUE, FINANCIERE ET SOCIALE

Ce dernier grand point de cette recherche sera essentiellement marqué par l'interprétation économique que l'on peut faire des résultats d'estimation obtenus à la section précédente. Par la suite, on fera une analyse économique et financière de ces résultats pour apprécier la rentabilité sociale du programme sous chacun des angles.

4.1 Interprétation des résultats pour l'agriculture

4.1.1 Maïs

Les résultats des estimations faites montrent que l'effet de la pluviométrie sur les rendements de maïs varie faiblement sur les deux sous périodes. En effet, dans la première sous période (1993 à 1997), le coefficient obtenu est environ de 1,048. Le modèle étant un double log, on dira qu'une augmentation de la pluviométrie de 1% permet une amélioration des rendements de maïs de 1,048%.

De 1998 à 2002, le coefficient obtenu est de 1,063. Ceci permet de dire qu'une augmentation de la pluviométrie de 1% engendre une croissance des rendements de maïs de 1,063%.

On voit à travers cela que la pluviométrie a un effet faible mais positif plus marqué sur les rendements de maïs pendant dans la deuxième sous période.

Cet effet net positif de la pluviométrie ($1,063 - 1,048 = 0,015$) de 0,015% permet de soutenir l'hypothèse que la pluviométrie agit positivement sur les rendements de maïs à partir de 1998 parce qu'elle est en quantité plus suffisante par rapport à la période 1993-1997.

Cette assertion vient montrer que le changement de productivité à partir de ce point de rupture (années 1998) est probablement lié à l'ensemencement des nuages qui consistait à améliorer le niveau de la pluviométrie. L'absence d'effets individuels permet d'extrapoler ce résultat comme une moyenne pour les différentes provinces qui sont dans la zone d'étude.

Toutefois, l'on peut relativiser ce résultat car bien qu'étant positif, l'effet net reste très inférieur à 1% d'augmentation des rendements de maïs.

4.1.2 Mil

Les paramètres d'estimation pour le mil ont permis d'obtenir un coefficient de 483,4362 kg pour la sous période 1993-1997 et de 819,0593 kg pour la sous période 1998-2002. Le modèle étant un semi logarithme on peut interpréter ces coefficients en disant que :

- dans la sous période 1993-1997, une augmentation de la pluviométrie de 1% contribue à accroître les rendements de mil 0,483 tonne à l'hectare ;
- dans la sous période 1998-2002, une augmentation de la pluviométrie de 1% contribue à accroître les rendements de mil de 0,819 tonne à l'hectare.

On observe dans ce cas un effet positif du passage de la première sous période à la seconde sous période. L'augmentation supplémentaire des rendements est pratiquement le double soit $(0,819-0,483)$ 0,336 tonne à l'hectare imputable à une amélioration du niveau de la pluviométrie. Ainsi, on note qu'à partir de l'année de l'application de la technique d'ensemencement des nuages il y a eu un effet positif sur le niveau des rendements du mil.

4.1.3 Sorgho

Les résultats obtenus dans le cas du sorgho montrent des effets tendant à la baisse. En effet, dans le cas de la première sous période on enregistre un coefficient pour la pluviométrie de 3,76. On peut l'interpréter en disant qu'un accroissement de la pluviométrie d'un millimètre entraîne un accroissement sur les rendements de sorgho de 3,76 kg à l'hectare.

Pour la seconde sous période, le coefficient obtenu est de 2,80 ; ceci permet de dire que l'accroissement de la pluviométrie d'un millimètre entraîne un accroissement sur les rendements de 2,80 kg à l'hectare.

On voit que l'effet de la pluviométrie sur les rendements est positif pour les deux sous périodes, mais on note qu'il y a une baisse de la première à la deuxième sous période. Cette baisse d'environ 1 kilogramme pourrait signifier que l'ensemencement qui a eu lieu à partir de la seconde sous période n'a pas contribué à améliorer les rendements de sorgho. Cette

spéculation (sorgho) n'a donc pas été sensible à la hausse au changement du régime pluviométrique car c'est une baisse qui a été constatée.

Cette baisse peut trouver éventuellement son explication dans l'analyse du coefficient de p^2 . Cette variable matérialise l'effet secondaire de la pluviométrie sur les rendements. Les coefficients obtenus pour les deux sous périodes sont respectivement de -0,0035 et -0,0036 pour 1993-1997 et 1998-2002. Ils sont de valeurs faibles mais ils sont tout de même négatifs. Ceci peut être interprété en disant que davantage de pluie (effet secondaire) ne contribue pas à améliorer les rendements de sorgho et même que ce coefficient devient légèrement plus négatif en 1998-2002 ; d'où le fait que l'amélioration des pluies qui a pu se produire grâce à l'ensemencement n'a pas produit les effets escomptés pour le sorgho.

En effet, le sorgho est une spéculiation qui renferme plusieurs variétés. Ces dernières ont toutes en commun une plus grande résistance à la sécheresse que le mil et le maïs. En général, ses racines profondes lui donnent une capacité assez forte de résister au climat sahélien. Grâce à sa photosynthèse de type C4 et à ses racines profondes et vigoureuses pouvant atteindre jusqu'à 1,30 mètre de profondeur (Chopart, 1980), le sorgho consomme efficacement l'eau et résiste très bien aux déficits hydriques intenses et fortuits. **Aussi, pour une même surface de culture, le sorgho consomme 2 fois moins d'eau que le maïs** (EnerGreen Genetics, 2010).

En raison de sa résistance aux longues périodes de chaleur et de sécheresse, elle apparaît moins adaptée aux zones humides, bien arrosées. En bonnes conditions, le tallage commence quinze jours environ après le semis. La croissance du sorgho est réduite lorsque la température ambiante est inférieure à 20° C (Sene, 1995), la température optimale pour la croissance végétative se situe souvent vers 33-34°C. Le développement floral et la formation des grains se déroulent normalement jusqu'à 40-43°C ce qui du reste est élevé (Chantereau et Nicou, 1991).

Les besoins en eau du sorgho augmentent pendant le cycle pour atteindre un maximum à la floraison (environ 6 à 7 mm/Jour). Le sorgho craint cependant l'excès d'eau; de même une période trop pluvieuse pendant la maturation peut réduire la qualité de la production (Sene,

1995)⁹. La consommation moyenne d'eau par le sorgho en culture pluviale est estimée à 300 mm pour la campagne hivernale, ce qui correspond approximativement à la quantité optimale déterminée pour la première sous période (293mm). Par contre, la deuxième sous période étant plus humide, il est logique que sa consommation moyenne baisse, ce qui justifie la consommation optimale déterminée qui est passée à 204 mm.

Cette situation dénote d'une semence qui évolue mieux dans les savanes moyennement arrosées comparativement aux régions plus arrosées, c'est-à-dire plus humides, en témoigne le signe du coefficient de variable température. En effet, ce signe est positif pour la deuxième sous période traduisant une amélioration des rendements avec des températures plus élevées. On peut alors penser que cette baisse de rendement observée par la baisse des coefficients comme due au changement de régime pluviométrique passant d'un état déficitaire à un état normal, voire abondant.

4.1.4 Analyse des résultats

Dans cette sous section, on a tenté de mettre en exergue par la méthode du changement de productivité les effets du changement du régime pluviométrique imputable à l'ensemencement des nuages. En divisant les échantillons en deux périodes (avant ensemencement et après ensemencement), l'évolution des rendements des différentes spéculations en fonction de la pluviométrie est l'indicateur de base choisi pour appréhender cet effet.

Les résultats ne sont pas entièrement homogènes. En effet, les variations de cet indicateur ont permis de constater que le changement de régime pluviométrique a eu des effets positifs sur les rendements de deux spéculations (maïs, mil) tandis que pour la troisième (sorgho) les résultats obtenus étaient négatifs. Pour le cas du sorgho, même si on émet l'hypothèse que cela est lié à la nature de la spéculation, il apparaît alors que l'effet du changement du régime de pluie par l'ensemencement des nuages peut perturber certaines cultures.

⁹ Il faut donc une pluviométrie bien répartie située entre 500 et 600 mm pour une variété de cycle court, 650 à 800 mm pour une variété de cycle moyen.

En somme, il n'est donc pas possible de rejeter intégralement l'hypothèse que le changement du régime pluviométrique imputable à l'ensemencement contribue à baisser les rendements agricoles de manière générale. On pourrait dire qu'il contribue pour certaines cultures sans pour autant avoir les mêmes effets sur d'autres.

Au regard des résultats obtenus, on retient que l'effet n'est pas seulement positif, mais qu'il peut être aussi négatif suivant le type de culture.

4.1.5 Contraintes liées à l'analyse

L'analyse des effets du changement du régime pluviométrique sur les rendements céréaliers a pris en compte les variables utilisées ci-dessus dans les estimations (pluviométrie, répartition dans le temps de la pluie, engrais, etc.). Ces variables sont des facteurs qui influent sur le niveau des rendements ; mais on peut leur associer d'autres, telles que l'érosion hydrique ou les techniques de conservation des eaux et des sols (CES).

L'érosion hydrique qui contribue à la dégradation des terres est perçue comme un facteur limitant pour l'amélioration des rendements agricoles. En effet, plus le volume de la pluviométrie est important, plus l'érosion engendrée par l'impact des gouttes d'eau sur le sol et un ruissellement plus important contribuent à dégrader les surfaces cultivables par la perte d'éléments nutritifs. On s'attend donc à une persistance de ce mécanisme lorsqu'il pleut davantage.

Cette composante n'a pas été prise en compte dans les estimations car les données existantes sur l'érosion hydrique sont ponctuelles, peu fiables et en quantités très faibles. Ces données existantes répondent à des besoins spontanés d'études et n'ont pas fait l'objet de suivi, de sorte que ce paramètre soit difficilement possible à intégrer pour les estimations.

Toutefois, cela ne biaise pas les résultats de cette recherche car sur tout le bassin, les superficies suivies par les techniciens de l'agriculture ont bénéficié des techniques culturales antiérosives (zaï, digues à pierres filtrantes et cordons pierreux, ...) appliquées avec une

bonne maîtrise. Cette pratique vient compenser l'effet accentué de l'érosion hydrique, d'où l'idée que les deux effets se compensent, permettant de valider les résultats obtenus.

CODESRIA - BIBLIOTHEQUE

4.2 Interprétation des résultats pour la pêche

Les résultats fournis par les estimations permettent de constater que la régression est significative à 5% dans son ensemble car la probabilité de la statistique de Fisher (F- statistic) est nulle. Il en est de même pour la majeure partie des coefficients qui sont significatifs à 10%.

Le coefficient de la variable croisée qui est aussi notre principale variable d'analyse (it_yt) est significatif ($p = 0,07$) à 10%. Mais, il faut noter dans un premier temps que l'effort de pêche a deux effets contradictoires au vu des signes des coefficients estimés.

En effet, dans le modèle initial, l'effort de pêche intervient de manière double. Ces deux effets opposés s'expliquent par la théorie économique. Le fait est que dans un premier temps l'effort de pêche, exprimé ici en nombre de sorties, permet d'accroître les rendements de pêche lorsqu'il y a un nombre plus élevé de sorties. Mais dans un second temps, cet effort de pêche contribue de manière négative sur le niveau des captures car en devenant excessif (surpêche), il contribue à une exploitation abusive et donc à la raréfaction de la ressource. Cette situation est effective même s'il y a une disparité des instruments de pêche entre les pêcheurs car ce sont ceux disposant de moyens assez sophistiqués qui ont un impact plus marqué.

La variable d'intérêt it_yt est la variable matérialisant l'intervention du programme par ensemencement des nuages. Cette variable est combinée avec le niveau de l'eau de la retenue, car l'ensemencement ne se manifeste pas de manière isolée mais à travers le régime pluviométrique qui conditionne le niveau de l'eau dans le barrage. On observe que son coefficient estimé (-0,02) est sensiblement nulle. Ceci permet de dire que l'ensemencement des nuages n'a pas eu d'effet réel sur le niveau des captures et par conséquent aucun effet positif attendu sur les revenus des acteurs de la filière.

Et en poursuivant l'analyse du signe de ce coefficient estimé, il paraît quelque peu atypique. On peut l'interpréter en disant que l'intervention par ensemencement des nuages a entraîné

une baisse de 0,02% des captures. On peut attribuer cette baisse au niveau des eaux très abondantes. En effet, il faut tout d'abord noter que les eaux du bassin de Bagré coulent vers le sud dans le bassin de la Volta au Ghana. Lorsque le niveau des eaux est très abondant (notamment en hivernage), la cuvette du barrage ne peut retenir l'ensemble des eaux ; les évacuateurs sont alors ouverts pour permettre l'évacuation du trop plein occasionnant le passage de quantités importantes de poisson en direction du Ghana. Cette situation contribue à réduire le volume des pêches, mais comme on l'a souligné plus haut, cette réduction est relativement faible.

En somme, on peut dire que l'hypothèse selon laquelle l'ensemencement des nuages a un effet négatif sur les rendements de la pêche est acceptée dans une certaine mesure au vu des résultats obtenus par les estimations.

CODESRIA - BIBLIOTHEQUE

4.3 Interprétation des résultats pour l'hydroélectricité

Les différents résultats obtenus par l'estimation permettent de constater que les coefficients des variables, volume turbiné, effet combiné de la pluviométrie-ensemencement des nuages et effet combiné volume turbiné-programme Saaga, sont tous significatifs au seuil de 5%. La variable, temps de turbinage, n'est pas significative à ce même seuil.

Le modèle initial étant un double log, cela signifie que les coefficients correspondent directement à des élasticités. Mais, pour ce qui est des variables combinées à la variable binaire ensemencement des nuages $[\ln(Pl_t) \times int_t]^*$ et $[\ln(V_t) \times int_t]^*$, leurs coefficients ne sont pas des élasticités directes car à ce niveau, le double log n'est plus fonctionnel. On pourra ainsi dire que :

- le coefficient du volume turbiné étant de 0,7394 cela signifie qu'une augmentation du volume turbiné de 1% accroît la production énergétique d'environ 0,74%, soit un effet inélastique mais assez important. En effet, par extrapolation, si ce volume turbiné double (100%), cela implique un accroissement de la production énergétique de 74% ;
- l'effet de l'ensemencement des nuages par le biais de la pluviométrie est positif sur la production énergétique comme le montre son coefficient de 0.368137. Ainsi, un des objectifs recherchés à travers l'intervention par l'ensemencement des nuages est atteint car l'impact sur le rendement hydroélectrique est positif grâce à la pluviométrie.

Dérivons l'effet marginal par la méthode suivante :

$$\ln y = \alpha x \Leftrightarrow \alpha = \frac{d \ln y}{dx} \Leftrightarrow \alpha = \frac{dy}{y} \times \frac{1}{dx} = \frac{dy}{dx} \times \frac{1}{y}$$

$$\alpha = \frac{dy}{dx} \times \frac{1}{y} \Leftrightarrow \frac{dy}{dx} = \alpha y$$

Ainsi, en posant $\ln y = \ln E_t^*$; $\alpha = 0,37$ et $x = [\ln(Pl_t) \times i_t]^*$ l'effet marginal moyen sera donc :

$$\frac{dy}{dx} = \alpha \bar{y} = \frac{\partial E}{\partial [\ln(Pl_t) \times i_t]} = 0,37 \times \bar{E}_t$$

On peut dire que d'un mois à un autre, l'action du programme sur la pluviométrie fait croître la production énergétique de $0,37 \times \bar{E}_t$ mégawattheure.

- quant à l'effet combiné du volume turbiné et de l'ensemencement des nuages, il fait décroître la production, car son coefficient est négatif (-0,055038). De manière similaire on montre que l'effet marginal de cette variable est négatif, il c'est-à-dire qu'il y a réduction de la production énergétique de $0,05 \times \bar{E}_t$. Cette baisse est très faible, mais au-delà de l'ampleur de la baisse c'est son effet de réduction qui est notable.

En synthèse, on peut dire que l'effet de la quantité d'eau turbinée (\ln_{V_t}) de même que l'action de l'ensemencement des nuages combinée à la pluviométrie [$\ln(Pl_t)_{int_t}$] qui en découle, ont des effets positifs sur la quantité d'hydroélectricité produite, ce qui confirme la théorie économique. En effet, tous les travaux empiriques, ainsi que la théorie ont montré que l'intervention par ensemencement des nuages peut contribuer à améliorer la pluviométrie et par conséquent augmenter aussi la production hydroélectrique.

Ce que l'on peut observer à ce niveau, comme résultat non moins important, est l'effet négatif de l'action combinée du volume turbiné et de l'ensemencement des nuages [$\ln(V_t)_{int_t}$]. Cela paraît contraire à la théorie car chacune de ces deux variables prises individuellement sont perçues comme facteurs améliorant le rendement énergétique. Mais cette situation, que l'on peut qualifier d'atypique, peut s'expliquer quand l'ensemencement des nuages engendre une très forte pluviométrie en même temps qu'il y a une augmentation du volume turbiné ; cela peut être source de risque pour la production hydroélectrique compte tenu de l'ampleur et de la force de ce phénomène. A ce moment, le processus de production est interrompu au profit d'une évacuation du trop plein qui est prioritaire car l'équilibre de la cuvette (digue) est fortement menacé.

En effet, selon le responsable de la production à ce niveau, les hivernages nécessitent une surveillance permanente (24h/24h) afin de parer aux situations de crues. Pour lui, dans de telles circonstances l'édifice est menacé, et la seule protection possible est l'évacuation du trop plein.

Le volume turbiné à lui seul contribue à accroître la production mais si le volume croît en même temps que l'effet de l'ensemencement est très marqué par de très grande quantité d'eau, les infrastructures ne sont pas à même de donner un rendement optimum compte tenu des conditions climatiques. Mais l'excédent d'eau est en ce moment évacué pour maintenir l'édifice en équilibre. Toutefois, il faut relativiser cela car l'effet est très négligeable sur la production comme le montre son coefficient qui est de 0,05.

On peut retenir de cela qu'avec une hausse de $0,37 \times \bar{E}_t$ cumulée à une baisse de $0,05 \times \bar{E}_t$ il ressort que l'effet marginal final net reste positif sur la production énergétique, soit $0,32 \times \bar{E}_t$ en moyenne par mois où l'ensemencement est effectif.

La production moyenne mensuelle sur l'ensemble de l'échantillon de l'étude est de 4,2MWh. On obtient un effet marginal de $0,32 \times 4,2$, soit 1,344 MWh de production additionnelle par mois, imputable à l'effet du programme. Ainsi, sur six mois d'ensemencement on estime alors par campagne à :

$$1,344 \times 6 = 8,067 \text{ MWh.}$$

Une telle augmentation est substantielle pour le Burkina Faso qui enregistre d'année en année une forte hausse de sa demande énergétique due notamment à sa croissance démographique de 3% (INSD, 2008).

4.4. Interprétation des résultats pour le couvert végétal

La régression d'ensemble est significative car la probabilité de la statistique de khi deux est nulle pour les deux sous périodes.

Après les différents tests, l'on peut constater que la majeure partie des variables sont significatives. Seule la variable représentant le niveau de pluviométrie suivant la répartition dans le temps ($\ln_Pl_{it_Njrp}$) n'est pas significative sur les deux périodes.

La variable d'intérêt \ln_Pl_{it} est celle qui nous permet d'apprécier l'effet de l'ensemencement sur la productivité du bois par forêt et par année. En effet, l'impact du programme se manifeste principalement sur le niveau de la pluviométrie, c'est pourquoi cette variable est considérée comme variable d'intérêt pouvant influencer la productivité de bois de forêt.

Le coefficient obtenu représente donc l'élasticité. On pourra de ce fait dire que :

- pour la période 1993 à 1997, une augmentation de la pluviométrie de 1% entraîne un accroissement de la productivité de bois de 1,75% par hectare et par an sans l'action du programme.
- avec ensemencement des nuages (de 1998 à 2002), l'augmentation de la pluviométrie de 1% entraîne un accroissement de la productivité de bois de 1,78% par hectare et par an.

Nous dirons alors, que l'effet net de l'ensemencement des nuages sur la productivité du bois des forêts est qu'il apporte une productivité supplémentaire de 0,03 % par hectare et par année.

Les estimations permettent de constater que l'effet du « Programme Saaga » sur la productivité du bois au niveau des forêts est faible, mais positif. Ce résultat est conforme à la théorie, car davantage d'eau constitue un facteur favorable à la croissance des végétaux surtout en pays sahélien.

Le résultat obtenu permet de rejeter l'hypothèse selon laquelle l'ensemencement a un effet neutre sur la productivité du bois de forêt.

L'effet est réellement faible et peut s'expliquer par le rythme lent de croissance des arbres de grande taille car il faut noter que seuls les arbres dont les troncs ont une circonférence de plus de 20 centimètres sont pris en compte. Cela revient à dire qu'on fait abstraction du « petit bois ». Il faut également souligner que l'étude a été réalisée sur deux périodes de 5 ans chacune dont une est marquée par l'ensemencement. En cinq (5) années, l'effet sur les arbres de grande taille peut ne pas être très net compte tenu du temps et du cycle de croissance de ce type d'arbre.

En outre, il y a également le facteur anthropique qui est très important dans la limitation de la productivité du bois au niveau forestier. Il est matérialisé dans notre modèle par la variable densité de populations.

Comme nos estimations le montrent, on voit que l'effet densité de population agit négativement sur la productivité du bois. Cet effet est matérialisé ici par la variable Ln_Dens_{it} . Ceci est conforme à la théorie quand on sait que la pression humaine sur le ligneux est très forte, notamment pour le bois de chauffe et ce, malgré la protection des forêts. Pour les deux périodes, on a des coefficients de - 0,004 qui montrent que l'effet est négatif même s'il n'est pas élevé. Ce coefficient peut s'interpréter en disant qu'une augmentation de la densité de 1% contribue à la réduction de la productivité de bois de 0,004%. On peut penser que ce coefficient est en réalité plus élevé quand on sait que dans les recensements de populations par zones rurales il y a souvent des marges d'erreurs non négligeables. En effet, l'instruction étant limitée, les populations enquêtées déclarent souvent un nombre limité d'habitants, ce qui sous évalue le niveau réel de la population de la localité. Mais l'on retient que ce résultat obtenu confirme la théorie sur le fait que l'effet des populations sur le couvert végétal est effectif en matière de déforestation.

Cette action négative sur la productivité du bois est aussi le fait du cheptel (Ln_Btl_{it}) car comme les résultats d'estimation le prouvent, le bétail à lui seul réduit de 0,04% sur les deux périodes. En effet, l'élevage étant pour la plupart de type extensif, les troupeaux contribuent de manière non négligeable à la déforestation.

Toutefois, l'action de ce cheptel combinée à la pluviométrie révèle un effet positif. La variable $Pl_{it_Bt_{it}}$ mesurant cet effet donne un coefficient de $1,08 \times 10^{-8}$ de 1993 à 1997 et un coefficient de $5,69 \times 10^{-11}$ pour la période de 1998 à 2002. Cet effet vient compenser les pertes occasionnées par l'effet individuel du cheptel. Cette action positive peut se justifier par le fait que dans ces zones, le cheptel de taille importante, génère par ses excréments des engrais dont la pluie va favoriser l'infiltration dans les sols et nourrissant par la même occasion les végétaux. Les arbres exploitent alors ces différents éléments organiques pour leur croissance.

La répartition des pluies dans le temps est un facteur important pour l'équilibre de la croissance des végétaux, c'est pourquoi selon la théorie, une bonne répartition des pluies joue positivement en faveur de la productivité du bois. En effet, le milieu naturel, dans sa composition, son fonctionnement et sa productivité dépend intrinsèquement de l'abondance et de la répartition des pluies (ONF, 2009). Toutefois, La variable $Ln_Pl_{it_Njrp}$ qui matérialise l'effet de la pluviométrie à travers sa répartition sur la productivité du bois, montre que cet effet est positif (coefficient positif sur les deux périodes) mais elle n'est pas significative statistiquement

A partir des résultats obtenus, commentés et analysés, il est approprié de faire ressortir des points qui permettront aux autorités de faire les ajustements nécessaires pour le programme. C'est pourquoi les recommandations constituent un point essentiel qui donnera les axes éventuels dans lesquels le programme pourrait être orienté.

4.5 Autres types de contraintes

Il convient de souligner un aspect important qui n'a pu être pris en compte dans nos travaux. Il s'agit des phénomènes extrêmes tels que les orages, les pluies très fortes ou même des tornades. Ces questions n'ont pas pu être traitées compte tenu de leur délicatesse et de la difficulté des météorologues à attester l'existence d'un lien étroit avec l'ensemencement des nuages. Il n'est jusque là aucun rapport scientifique qui ait pu affirmer la véracité d'un effet causal de l'ensemencement des nuages sur les phénomènes climatiques extrêmes. C'est pourquoi, nous avons émis l'hypothèse ceteris paribus de sorte à geler ce facteur très délicat à appréhender puisque qu'étant de source inconnue ou incertaine.

4.6 ESTIMATION DE LA RENTABILITE ECONOMIQUE ET FINANCIERE DU PROGRAMME

Cette partie a pour objectif de présenter à partir d'estimations, des éléments de réponse sur la rentabilité du programme d'ensemencement des nuages au Burkina Faso. Cet essai est basé sur des estimations compte tenu du fait que les données réelles sur les coûts du programme ne sont pas disponibles. Dans un premier temps, on appréciera la rentabilité économique qu'un programme peut générer et par la suite, on vérifiera si le programme est financièrement bénéfique. Enfin, une analyse des effets connexes sur la rentabilité sera faite.

4.6.1 Analyse économique

L'étude de faisabilité économique comprend deux grands points que sont les coûts du programme, la rentabilité économique. Dans cette partie, on ne fera pas cas des impacts sociaux environnementaux car ce qui est recherché est l'aspect économique « *stricto sensu* ». Les éléments sociaux feront l'objet d'une autre section.

4.6.1.1 Les coûts du programme

Compte tenu de la nature du programme (caractère régional puis national) et de la nature des activités (ensemencement des nuages), on estime le coût d'un tel projet considérable. Selon l'étude déjà réalisée en 2003, le programme régional APENS avait été évalué, pour une durée de cinq ans, à plus de quarante deux milliards de francs CFA. Il comprenait entre autre la mise en place d'une coordination régionale et de neuf coordinations nationales pour

chacun des pays membres du CILSS. Ce coût estimatif incorporait également celui des équipements et d'un programme de Master spécialisé en physique des nuages.

Il faut noter que ce sont les burkinabè qui avaient contribué majoritairement à l'élaboration de ce programme sous régional compte tenu de l'expérience que le pays disposait déjà par rapport aux autres Etats membres du CILSS. C'est pourquoi, en partant des résultats obtenus dans cette étude, on a essayé d'estimer les coûts qui ont été supportés par le Burkina Faso les pendant cinq premières années de programme (1998 à 2002).

En ajustant les différentes rubriques déjà élaborées dans le cadre du programme APENS, on peut ajouter, en remplacement d'autres rubriques dans le cas sous régional, une rubrique pour le cas du Burkina Faso intitulée : Evaluation de la rentabilité économique annuelle et ce, de la 1^{ière} à la 5^{ième} année. Cela se justifie car, après les opérations annuelles menées, il est nécessaire d'apprécier l'incidence sur les rendements agricoles de l'année en cours ou encore l'évolution des besoins en eau. Cela constitue à chaque fois un bilan intermédiaire qui permet d'ajuster les actions menées d'une année à une autre.

Ainsi, on peut présenter un tableau récapitulatif des coûts comme suit :

Tableau 44: Coût estimatif du fonctionnement du programme « Saaga » en millions de FCFA

| Activités | 1998 | 1999 | 2000 | 2001 | 2002 |
|---|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| Infrastructure, logistique et fonctionnement de la coordination | 43 | 37 | 37 | 37 | 37 |
| Elaboration par la coordination d'une méthodologie d'évaluation | 12 | - | - | - | - |
| Elaboration et mise en œuvre des programmes de formation/action | 49 | 24 | 24 | 12 | 6 |
| Signature des protocoles d'entente scientifique avec des partenaires scientifiques pour la mise en œuvre du programme | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 |
| Dotation en équipement d'opérations, de mesure et de traitement et de facteurs de ressources de base | 1300 | 1278 | 1278 | 1000 | 980 |
| Mise en place et gestion de données nationales | - | 12 | 3,3 | 3,3 | 3,3 |
| Elaboration et mise en œuvre des programmes de recherche et développement | - | 12,3 | 12,3 | 12,3 | 12,3 |
| Rencontre nationale de concertation sur le programme | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 |
| <i>Evaluation de la rentabilité économique annuelle du programme</i> | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 |
| Totaux annuels | 1430 | 1389,3 | 1380,6 | 1168,6 | 1064,6 |
| Budget total | 6433,1 | | | | |

Source : Etude APENS

Il faut noter que ces coûts bien qu'étant déterminés pour tout le programme sont imputables au seul bassin du Nakambé car à cette période c'est la seule partie du pays qui était concerné par le programme.

4.6.1.2 Rentabilité économique du programme

Conformément aux hypothèses de recherche, les axes de l'évaluation de la rentabilité économique seront basés sur l'agriculture, l'hydroélectricité, la pêche et d'une certaine manière le couvert forestier pour l'élevage.

La rentabilité économique de l'ensemencement peut donc être appréciée sur ces secteurs auxquels on doit ajouter celui de l'approvisionnement en eau.

✓ *Le Secteur agricole*

L'agriculture est pratiquée dans tout le Nakambé et génère des revenus non négligeables pour les populations. On prendra le cas des cultures vivrières pour lesquelles les effets marginaux de l'utilisation de cette innovation environnementale ont été évalués dans les parties précédentes.

Ainsi, à partir des statistiques agrégées pour les huit provinces du bassin faisant l'objet de l'étude, on peut estimer le gain obtenu grâce à l'amélioration des rendements de maïs (0,015%) et du mil (0,336t/ha). On pourra donner une estimation des pertes enregistrées au niveau de la baisse des rendements du sorgho.

Il faut noter que ces gains ou pertes sont imputables à l'action de l'ensemencement car les effets nets obtenus sont issus des estimations économétriques effectuées précédemment.

Les résultats obtenus pour les différentes spéculations sont présentés dans trois tableaux.

Dans le cas du maïs, on a les résultats suivants :

Tableau 45: Estimation des gains obtenus dans la culture de maïs dans le Nakambé grâce à l'ensemencement

| Années | 1998 | 1999 | 2000 | 2001 | 2002 |
|--|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| Rendement moyen en Kg/ha | 3082,85 | 3129,10 | 3176,03 | 3223,67 | 3272,03 |
| Gain annuel moyen en terme de Rendement en % | 0,015% | 0,015% | 0,015% | 0,015% | 0,015% |
| Gain net moyen par année en termes de rendement en Kg/ha | 46,8 | 46,25 | 46,93 | 47,64 | 48,36 |
| Superficie cultivée de la zone d'étude en hectares | 7254 | 9363 | 6089 | 9980,45 | 8611,68 |
| Prix moyen annuel au producteur en FCFA/Kg | 105 | 80 | 65 | 99 | 120 |
| Flux financier généré en FCFA | 35 646 156 | 34 643 100 | 18 574 190 | 47 071 395 | 49 975 301 |
| Flux total généré pour le bassin en FCFA | 185 910 142 | | | | |

Source : données prix SONAGESS, Rendement DGPER

NB : *Flux financier généré = (Gain net * superficie cultivé * prix annuel au producteur)*

Ainsi, sur cinq ans, le gain enregistré au niveau de la production de maïs pour les huit provinces est estimé à près de 186 millions de FCFA.

Pour le mil, les résultats de l'estimation des gains sont présentés dans le tableau ci après :

Tableau 46: Estimation des gains obtenus dans la culture de mil dans le Nakambé grâce à l'ensemencement

| Années | 1998 | 1999 | 2000 | 2001 | 2002 |
|---|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| Rendement moyen en Kg/ha | 55789,22 | 56125,22 | 56461,22 | 56797,22 | 57133,22 |
| Gain net annuel moyen en termes de rendement en Kg/ha | 336 | 336 | 336 | 336 | 336 |
| Superficie cultivée de la zone d'étude en hectares | 5883 | 6039 | 4132 | 6118 | 6286 |
| Prix moyen annuel au producteur en FCFA/Kg | 130 | 100 | 77 | 120 | 135 |
| Flux financier généré en FCFA | 256 969 440 | 202 910 400 | 106 903 104 | 246 677 760 | 285 132 960 |
| Flux total généré pour le bassin en FCFA | 1 098 593 664 | | | | |

Source : données prix SONAGESS, Rendement DGPER

Sur les cinq années de pratique de l'ensemencement, les gains estimés que le mil génère sont plus importants que ceux du maïs car ils sont de l'ordre de 1,1 milliard de FCFA.

Toutefois, comme précédemment exposé, la culture du sorgho a enregistré une baisse de rendement imputable à cette pratique de l'ordre de 0,96 Kg/ha (2,80-3,76). L'estimation des pertes en valeur monétaire se présente comme suit :

Tableau 47: Estimation des gains obtenus dans la culture de sorgho dans le Nakambé grâce à l'ensemencement

| Années | 1998 | 1999 | 2000 | 2001 | 2002 |
|--|-------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Rendement moyen en Kg/ha | 43986,86 | 43985,90 | 43984,94 | 43983,98 | 43982,02 |
| Pertes nettes annuelles moyennes en termes de rendement en Kg/ha | -0,96 | -0,96 | -0,96 | -0,96 | -0,96 |
| Superficie cultivée de la zone d'étude en hectares | 7002 | 7537 | 6063 | 7638 | 8213 |
| Prix moyen annuel au producteur en FCFA/Kg | 116 | 91 | 70 | 107 | 126 |
| Flux financier perdu en FCFA | -779 743 | -658 433 | -407 434 | -784 576 | -993 445 |
| Flux total perdu pour le bassin en FCFA | -3 623 631 | | | | |

Source : données prix SONAGESS, Rendement DGPER

Les résultats obtenus pour le sorgho sont très faibles car les pertes estimées pour les cinq années n'atteignent pas quatre millions.

En somme, pour les trois spéculations vivrières on enregistre un flux financier positif de **1.280.880.175 FCFA**. On peut donc dire que globalement, le secteur agricole vivrier enregistre un bénéfice grâce au recours à cette innovation environnementale comme un facteur de production afin de faire face au manque d'eau.

✓ **L'hydroélectricité et pêche**

L'hydroélectricité est considérée comme une énergie propre et inépuisable, contrairement au pétrole ou au gaz naturel. Malgré des coûts d'investissement généralement élevés, les coûts de maintenance sont raisonnables, les installations sont prévues pour durer longtemps, et l'énergie de l'eau est gratuite et renouvelable si elle est bien gérée.

Sur la base des résultats économétriques obtenus, on est parvenu à montrer que le recours à l'ensemencement des nuages génère en moyenne un supplément de 8,067 Mégawatheure par campagne, c'est-à-dire par année. Sur cinq années d'utilisation de cette technique, cela revient à un surplus de 40,335 Mégawatheure.

Pour évaluer le surplus monétaire, on tient compte du fait que les investissements des installations sont amortis avec un coût de production n'excédant pas les 0,1 euro, soit environ 65 FCFA le kilowattheure. Ainsi, le gain enregistré se détermine comme suit :

$$\text{Gain} = 40,335 \cdot 10^3 \times 65 = 2621775$$

Le gain obtenu sur les cinq années est négligeable car il est inférieur à trois millions de Francs CFA.

Pour le domaine de la pêche, les estimations économétriques avaient donné des résultats négatifs de l'impact de l'ensemencement des nuages sur le niveau des captures de l'ordre de 0,02% en moyenne sur les cinq années. La valorisation monétaire de cette baisse peut se présenter de la manière suivante :

Tableau 48: Estimation des pertes enregistrées dans la pêche à Bagré imputable à l'ensemencement

| Années | 1998 | 1999 | 2000 | 2001 | 2002 |
|--|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| Production annuelle en Kg | 720 000 | 705 600 | 691 488 | 677 659 | 664 106 |
| Gain annuel moyen en terme de Rendement en % | -0,02% | -0,02% | -0,02% | -0,02% | -0,02% |
| Pertes nettes annuelles moyennes en Kg | -14694 | -14 400 | -14112 | -13829 | -13 553 |
| Prix moyen annuel au producteur en FCFA/Kg | 457 | 429 | 404 | 440 | 450 |
| Flux financier généré en FCFA | -6 715 158 | -6 177 600 | -5 701 248 | -6 084 760 | -6 098 850 |
| Flux total généré en FCFA | -30 777 616 | | | | |

Source : données prix, INSD

Au niveau de la pêche, les estimations des pertes financières dues à la baisse des captures causée par le recours à l'ensemencement des nuages, sont plus importantes que les gains enregistrés pour l'hydroélectricité.

Ainsi, en agrégeant les valeurs monétaires provenant du recours à cette technique au niveau du barrage de Bagré (pêche et l'hydroélectricité), le résultat obtenu est négatif :

$$\text{Valeur monétaire (hydroélectricité + pêche)} = 2621775 - 30777616 = -28155841 \text{ FCFA}$$

Ces estimations donnent pour l'impact sur les activités menées sur le barrage en cinq années une moins value nette de **28 155 841 FCFA**.

✓ **Le Couvert forestier**

Le couvert forestier est très important au plan économique pour son rôle dans la chaîne alimentaire. Au niveau des populations, il intervient pour les produits de cueillette, mais lorsque le couvert forestier est bon, il est aussi un élément clé pour l'alimentation du bétail et donc pour l'élevage.

Le secteur de l'élevage est après l'agriculture, le plus important pour le Burkina Faso. Il contribue au PIB pour 12% (MEF, 2009) et rencontre d'énormes difficultés liées à la pénurie d'eau. Le type d'élevage le plus pratiqué est l'élevage extensif qu'on localise surtout dans les zones où la pluviométrie n'excède pas 300mm d'eau par an. Le cheptel est très sensible aux chocs causés par la variation inter annuelle de la pluviométrie se matérialisant par un déficit

fouurrager important et un tarissement des points d'eau. L'augmentation des précipitations par ensemencement peut conduire à réduire la perte de bétail dû au manque d'eau et à disposer de plus grandes zones de pâturage. L'élevage au Burkina Faso contribue pour environ 20% des recettes d'exportations et 26% des revenus des populations rurales. Une amélioration des atouts compétitifs de ce secteur pourrait lui permettre d'être au côté de l'agriculture, une source importante de croissance économique et de réduction de la pauvreté en zone rurale. C'est pourquoi, un bon pâturage est un élément clé.

Il existe un important déséquilibre entre le cheptel et les ressources disponibles. Par exemple, le Sahel burkinabè dispose selon les résultats de la deuxième enquête nationale sur les effectifs du cheptel (MRA, 2004) d'environ 1 500 000 UBT. Si l'on évalue la capacité de charge de la région globalement à 8ha/UBT (c'est-à-dire un hectare par mois de saison sèche et par UBT), le besoin en parcours naturel pour satisfaire l'alimentation du cheptel serait de douze millions (12.000.000) hectares. La superficie totale du Sahel est de trois millions six cent mille (3.600.000) hectares, ce qui nous amène à un déficit de huit million quatre cent mille (8.400.000) hectares.

En effet, la capacité de charge maximale est évaluée à 8 bovins/km² de pâturage au Nord (sahel) alors qu'elle peut aller jusqu'à 20 bovins/km² de pâturage plus au sud. Cette situation explique les mouvements de migration des éleveurs et de leur bétail vers le Sud à la recherche de zones favorables (pâturages). Il faut noter que ces migrations incontrôlées accentuent la dégradation de l'environnement.

Les estimations économétriques ont donné une amélioration de la productivité de bois de 0,03% grâce à une meilleure pluviométrie. L'évaluation de cette dernière empiriquement est de l'ordre de 10% en moyenne annuelle obtenue grâce à l'ensemencement des nuages (APENS, 2003). Pour ce qui est spécifique à l'alimentation du bétail, c'est essentiellement le pâturage à travers la biomasse du milieu naturel. Scientifiquement, il est établi l'existence d'une relation entre la biomasse végétale et la pluviométrie dans les pays sahéliens. Selon ces travaux, on a des valeurs de 2,16kg/ha/mm (Grouzis et al., 1981), ce qui permet de faire les estimations suivantes :

Tableau 49: Estimation des gains obtenus d'un meilleur pâturage imputable à l'ensemencement

| Années | 1998 | 1999 | 2000 | 2001 | 2002 |
|--|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| 1 Amélioration de la pluviométrie | 10% | 10% | 10% | 10% | 10% |
| 2 Pluviométrie annuelle supplémentaire moyenne nette dans la région | 70 | 70 | 70 | 70 | 70 |
| 3 Superficie de la région en ha | 30 501 | 30 501 | 30 501 | 30 501 | 30 501 |
| 4 Pâturage supplémentaire en Kg (2,16*2*3) | 4 611 751,2 | 4 611 751,2 | 4 611 751,2 | 4 611 751,2 | 4 611 751,2 |
| 5 Besoin en herbe sèche par saison par bovin en kg | 4500 | 4500 | 4500 | 4500 | 4500 |
| 6 Bétail supplémentaire nourri (4/5) | 1 025 | 1 025 | 1 025 | 1 025 | 1 025 |
| 7 Flux financier supplémentaire attendu pour un coût unitaire de 140000 FCFA (140000*6) | 143 500 000 | 143 500 000 | 143 500 000 | 143 500 000 | 143 500 000 |
| Total du flux financier supplémentaire attendu en FCFA | 717 500 000 | | | | |

Source : Direction Générale de la Prévision et des Statistiques de l'Élevage

Ces estimations montrent que l'élevage par le biais du couvert végétal paraît être l'un des secteurs qui bénéficie le plus de l'amélioration de la pluviométrie avec plus de sept cent millions sur les cinq années.

De plus, avec les difficultés d'approvisionnement en bois de chauffe au niveau des villes, la régénérescence forestière peut contribuer à améliorer cette situation et réduire les coûts d'exploitation.

✓ **L'approvisionnement en eau potable**

Un autre secteur important, est celui de la disponibilité de ressources en eau suffisantes, particulièrement pour les populations. En effet, ce point fut l'une des raisons majeures qui a poussé les autorités nationales à mettre sur pied « l'opération » puis le « programme Saaga ». L'amélioration de l'approvisionnement des retenues d'eau grâce à l'ensemencement des nuages est perçue comme un palliatif pour les besoins des populations.

Selon les travaux réalisés en 2003 pour la mise en place du programme régional APENS, on a établi la situation suivante pour certains pays de la zone CILSS :

Tableau 50: Demande globale en eau pour les populations

| Pays | Demande globale en eau en 2000/2005 | Demande globale en eau en 2025/2030 | Accroissement absolu de la demande en eau |
|--------------|---|---|--|
| Burkina Faso | 334,7 *10 ⁶ m ³ /an (total) | 876 *10 ⁶ m ³ /an (total) | 541,4 *10 ⁶ m ³ /an |
| Cap Vert | 2,3 *10 ⁶ m ³ /an (total) | 84738 m ³ /j (total) | 28,63 *10 ⁶ m ³ /an |
| Gambie | 9, 3 *10 ⁶ m ³ /an (total) | 186613 m ³ /j (total) | 58,82 *10 ⁶ m ³ /an |

Source : APENS, 2003

Si on fait l'hypothèse faible que l'ensemencement permet d'accroître le niveau des retenues de 5% chaque année ; alors, pour une retenue d'eau contenant en moyenne par an 1 milliard de mètres cubes d'eau (Bagré a une capacité de 1,7 milliard de mètres cubes), on peut espérer chaque année un volume supplémentaire de $(1*10^9)*0,05= 5*10^7$ soit 50 millions de mètres cubes d'eau supplémentaire par an. Ainsi, pour le Burkina Faso, cela permettra de combler annuellement 9% du gap de l'accroissement absolu de la demande en eau.

En supposant que sur ces 50 millions de mètres cubes, il y a une déperdition de 70% (évaporation, fuite dans les canalisations, etc.) et que le prix du mètre cube est évalué à 188 FCFA (prix le plus bas), on estime le gain moyen annuel à : $(15*10^6)*188 = 2,82 10^9$ milliards de FCFA. Avec cette hypothèse faible, cela permet d'espérer un gain de près de trois (3) milliards de FCFA par année pour ce qui est de l'approvisionnement en eau potable.

En outre, on peut prolonger cette analyse en ce qui concerne le surplus en eau en tenant compte du fait que le programme couvre l'ensemble du territoire. En effet, à l'échelle nationale, l'ensemble du territoire connaît en année moyenne un remplissage de ses barrages de 8 milliards de mètres cube. En supposant que l'ensemencement permette d'accroître ce volume de 5%, on aurait alors un gain supplémentaire en eau de $5%*8$ milliards soit 400 millions de mètres cubes.

Cette estimation montre que lorsque les conditions climatiques sont réunies, le recours à l'ensemencement peut permettre de répondre à la demande en eau pour les populations dans une proportion non négligeable. Cette activité peut constituer une alternative très intéressante pour les pays du sahel.

C'est pourquoi, du point de vue social (l'eau est synonyme de vie) et quel que soit le prix à payer, sa disponibilité est prépondérante pour la survie.

4.6.2 Analyse Bénéfices/Coûts

A partir de différentes estimations faites pour les différents sous secteurs économiques, on peut comparer les coûts et les gains enregistrés et apprécier la rentabilité financière du recours à cette innovation environnementale.

On établira pour ce faire un tableau d'exploitation qui va incorporer par année les estimations du coût du programme, les flux financiers attendus par secteur ainsi que les marges brutes. On obtient le tableau suivant :

Tableau 51: Analyse comparative bénéfices/coûts

| | Rubriques | 1998 | 1999 | 2000 | 2001 | 2002 | Total |
|----------|---|---------------------------|---------------------------|---------------------------|--------------------------|--------------------------|---------------------------|
| A | Investissements (coûts du progr.) | -1 430 000 000 | -1 389 300 000 | -1 380 600 000 | -1 168 600 000 | -1 064 600 000 | -6 433 100 000 |
| B | Culture du maïs | 35 646 156 | 34 643 100 | 18 574 190 | 47 071 395 | 49 975 301 | 185 910 142 |
| C | Culture du mil | 256 969 440 | 202 910 400 | 106 903 104 | 246 677 760 | 285 132 960 | 1 098 593 664 |
| D | Culture du sorgho | -779 743 | -658 433 | -407 434 | -784 576 | -993 445 | -3 623 631 |
| E | Hydroélectricité | 524 355 | 524 355 | 524 355 | 524 355 | 524 355 | 2 621 775 |
| F | Pêche | -6 715 158 | -6 177 600 | -5 701 248 | -6 084 760 | -6 098 850 | -30 777 616 |
| G | Couvert forestier (pâturage) | 143 500 000 | 143 500 000 | 143 500 000 | 143 500 000 | 143 500 000 | 717 500 000 |
| H | Marge Brute partielle | -1 000 854 950 | -1 014 558 178 | -1 117 207 033 | -737 695 826 | -592 559 679 | -4 462 875 666 |
| I | Approvisionne ment en eau | 2 820 000 000 | 2 820 000 000 | 2 820 000 000 | 2 820 000 000 | 2 820 000 000 | 14 100 000 000 |
| J | Marge Brute | 1 819 145 050 | 1 805 441 822 | 1 702 792 967 | 2 082 304 174 | 2 227 440 321 | 9 637 123 334 |

NB: $H = (A + B + C + D + E + F + G)$; $J = (H + I)$

Le premier commentaire que l'on peut faire de ce tableau de comparaison est que les marges brutes partielles sont toutes négatives quelles que soient les années. Bien que ces marges tendent à se réduire au fil des années, elles restent fortement négatives ce qui a priori tend à montrer une appréciation financière du programme négative. Il faut noter que

cela intervient lorsqu'on ne tient pas compte d'un élément souvent marginalisé à savoir la contribution à l'approvisionnement en eau. Cet aspect est souvent négligé comme bénéfice parce que difficile à évaluer.

De fait, lorsqu'on intègre l'approvisionnement en eau que peut générer le programme par des estimations minimales, on obtient des marges brutes positives telles que présentées dans la colonne j.

A partir de cela, on peut dire que **le recours à cette innovation environnementale n'est pas financièrement rentable dans certaines conditions et peut l'être dans d'autres**. Cette conclusion vient confirmer la position d'un tel programme au niveau de la matrice des adoptions des innovations environnementales (figure 6) selon laquelle l'ensemencement des nuages est un programme à coût élevé engendrant des pertes de revenus et générant des bénéfices quelquefois intangibles (indirects) qui profitent à l'ensemble de la société.

Dans ce cas de figure, l'approvisionnement en eau constitue un gain. Ce gain difficilement tangible, engendre une succession d'effets positifs tels que l'amélioration des conditions de vie.

Une telle conclusion quant à la nature du programme est logique, car dans la vision de l'économie de marché (capitalisme), le recours à l'ensemencement des nuages peut ne pas être un programme viable dans le contexte burkinabè car il est souvent perçu comme non rentable en témoigne l'Etat qui a baissé ses contributions au fil des ans depuis quelques années : **c'est la vision néoclassique**. C'est ce qui est rencontré aux Etats-Unis, où de tels programmes sont financés par des multinationales et ce, à but lucratif.

Dans le cas burkinabè, le maintien de ce programme s'explique par le fait que l'on se trouve d'une certaine manière dans **la logique keynésienne** où c'est l'Etat qui est le seul bailleur avec des objectifs plus tournés vers le social et les services rendus à la collectivité. En guise d'illustration, l'approvisionnement en eau pour les populations, la réduction des conflits entre agriculture et éleveurs, le renforcement du maraîchage et autres cultures favorables,

sont autant de motifs qui conduisent les autorités nationales à soutenir ce programme qui est plus rentable du point de vue social sans chercher à recouvrer les milliards investis.

Le programme Saaga a connu ces dernières années une baisse de sa part de financement dans le budget de l'Etat. Cette réduction peut s'expliquer par les différents chantiers dans lesquels sont engagés le gouvernement et le coût important que ce programme engendre et les bénéfices qui paraissent intangibles pour les populations. Ainsi, bien qu'étant un pays en voie de développement le Burkina Faso doit faire face à la mondialisation qui est conduite par un courant néoclassique et faire des choix cruciaux sur des gros investissements à but collectifs. Et pour ce faire, l'Etat éprouvera certainement des difficultés à venir de plus en plus grandes pour soutenir sa vision keynésienne avec de tels programmes onéreux et peu rentables financièrement mais socialement rentables.

4.6.3 Analyse des points connexes sur la rentabilité

4.5.3.1 Aspects économiques

Il serait difficile de faire une analyse bénéfices-coûts car, les moyens investis depuis l'existence du programme ne sont pas connus. Mais, on peut retenir comme recommandation majeure que ce programme mérite d'être maintenu pour fonctionner au gré des besoins quels que soient les coûts engendrés pour son fonctionnement. Cela se justifie si on fait une analyse selon la valeur d'usage d'un bien utilisé, approche mise en avant par les classiques.

La valeur d'usage est perçue comme l'utilité procurée par un bien et la valeur d'échange comme la valeur relative à chaque bien proposé sur le marché ou encore l'effort fourni pour l'obtention de ce bien. Adam Smith¹⁰ (1776) s'attache surtout à la valeur d'échange comme mesure réelle de la valeur d'un bien. Son analyse était fondée uniquement sur les coûts de production d'un bien et non sur la nature de la demande. Ricardo (1821) va dans le même sens en énonçant que « la valeur d'échange d'un produit n'est pas fonction de son utilité. La

¹⁰ Pour Adam Smith, il n'existe pas de connexion entre ces deux types de valeurs : l'une (valeur d'échange) que l'on peut appréhender par l'approche cardinale, et l'autre (valeur d'usage) appréhendable par l'approche ordinale.

preuve est que des produits très utiles comme l'eau n'ont aucune valeur d'échange. C'est davantage la rareté qui détermine cette dernière ».

Si c'est la rareté qui détermine la valeur de l'eau, on peut penser que dans le cas de notre étude, le recours à l'ensemencement est justifié malgré sa caractéristique d'"investissement lourd". L'analyse microéconomique repose sur l'idée que la valeur d'un bien est fondée sur l'utilité que nous apporte la consommation d'une unité supplémentaire de celui-ci, c'est-à-dire sur son utilité marginale. Ainsi, le financement d'un tel programme répond à cette approche : quelle est l'utilité retirée par l'obtention d'une quantité d'eau supplémentaire ?

Un autre aspect économique que l'on peut aborder est la question de pauvreté au sens économique. L'ensemencement peut jouer un rôle très important dans la réduction de la pauvreté. A travers l'accroissement de la sécurité alimentaire au niveau des populations grâce à de meilleurs rendements agricoles et un élevage plus rémunérateur, le niveau de vie des populations concernées connaîtra certainement une amélioration. En outre, la chasse et la pêche contribuent au renforcement de la sécurité alimentaire ; le développement de ces activités grâce à de meilleures ressources en eau ne peut qu'améliorer le niveau de vie des populations.

En effet, au-delà des gains économiques obtenus, les aspects sociaux retirés sont énormes : il y a les conflits sociaux liés au manque d'eau (agriculteurs-éleveurs) qui sont légion, les besoins en eau pour l'alimentation en eau potable et la production industrielle sont sans cesse croissants, etc. Dans une situation où le pays est un pays sahélien et exposé par rapport à l'avancée du désert (rareté du bien), l'on est prêt à dépenser d'importantes sommes d'argent pour obtenir une petite quantité d'eau car son utilité engendrée (économique et sociale) est énorme. En somme, l'eau étant à la base du fonctionnement de presque tous les secteurs économiques et sociaux est donc vitale pour notre économie nationale.

4.5.3.2 Aspects environnementaux et sanitaires

L'ensemencement des nuages se fait à base de substances chimiques qui sont composées d'iodure d'argent et d'autres composants chimiques. Médicalement, l'iodure d'argent

contient des composantes qui peuvent causer l'incapacité temporaire ou des blessures résiduelles chez les êtres humains et chez les mammifères en général avec une exposition intense ou continue mais non de manière chronique. Cependant, plusieurs études écologiques détaillées ont indiqué des impacts négligeables sur l'environnement et sur la santé des populations (Harris Edwards D. 1981 & Howell Wallace E .1977). La toxicité de l'argent et de ses composants s'est révélée faible dans ces différents travaux. Les résultats témoignent de faibles quantités d'argent obtenus des nuagesensemencés qui sont 100 fois moins concentrés que les émissions industrielles à travers le monde.

En 1978, David Klein à travers les accumulations des eaux de surface, de sol, de végétation, en quantités insuffisantes n'ont pas pu mettre en évidence les effets secondaires des impacts environnementaux. Mais plus tard, une évaluation environnemental de l'Etat de Californie (PES, 1995), plus précisément dans la Sierra Nevada, et en 2004 un panel d'experts indépendants en Australie ont confirmé ces résultats obtenus précédemment selon les lesquels les effets des composants de l'argent étaient en quantités négligeables.

Si l'on prend les cas des Etats-Unis, très actifs dans le domaine et dotés de matériels sophistiqués, les résultats des analyses obtenues sont intéressants. En effet, les investigations sur les impacts préjudiciables des produits chimiques utilisés pour l'ensemencement des nuages n'ont indiqué aucun effet néfaste perceptible sur la santé publique et sur l'environnement. Cela s'explique par les très faibles quantités des produits d'ensemencement utilisés de sorte que leur présence dans les précipitations s'est révélée être très négligeable dans la concentration. A titre d'illustration, l'argent présente dans l'eau de pluie ou la neige s'est avérée présente dans la chaîne à hauteur de 10 à 100 nanogrammes/litre. Cette faible concentration d'argent est largement en deçà du niveau autorisé pour la santé publique aux Etats Unis qui est de 50 microgrammes par litre. Pour le cas de l'iode, sa présence dans les échantillons d'eau de pluie recueillie à l'issue de l'ensemencement des nuages s'avère bien inférieure dans la concentration que pour le sel iodé de table utilisé par les populations.

Quant aux analyses effectuées dans ce pays sur la teneur en NPK, elles ont conduit à des résultats satisfaisants par rapport aux normes, car ceux-ci étaient également faibles.

Il faut noter que dans certaines régions, les constats sont différents. En effet, dans le parc national de Kosciuszko (biosphère naturelle australienne), des problèmes ont été rencontrés suite à l'introduction d'une telle technique. Formellement, certaines espèces animales, notamment l'opossum pygméen, ont présenté des réactions négatives qui se sont révélées être liées à l'iodure d'argent et ses composantes. C'est pourquoi l'ensemencement des nuages a été interdit en Australie dans certaines zones marquées par la présence de ces espèces protégées.

Tous ces éléments en composés argentés font l'objet de débats entre scientifiques car les conclusions des différentes études divergent avec une tendance plus forte pour des effets négligeables sur la santé. Pour certains, l'ensemencement des nuages doit être mené dans les zones à densité de population très faible pour éviter les problèmes. Mais en général, les conclusions des experts vont presque toutes dans le même sens, à savoir des conséquences sur les êtres humains négligeables.

Un point positif que l'on peut développer est l'effet secondaire obtenu à travers le caractère propre de pollution hydroélectrique généré. La production d'origine thermique occasionne alors une pollution importante de l'air avec des gaz tels que le dioxyde de carbone, le monoxyde de carbone et encore d'autres gaz. Ainsi, grâce à l'ensemencement, on pourrait développer la production hydroélectrique qui non seulement a un caractère propre (non polluant) mais a également un coût moindre que celle d'origine thermique. Elle pourrait donc se substituer quelque peu à la production thermique avec un gain important en matière économique et environnemental.

4.5.3.3 Aspect social

D'une part, une question habituelle revient souvent dans toutes les couches des populations : **est ce que l'ensemencement des nuages en faveur d'une région ne se fait pas au détriment d'une réduction pluviométrique pour une autre ?**

Les recherches ont permis d'apporter un « **non** » catégorique comme réponse à cette question. Les nuages ensencés dans une localité ne causent aucune réduction perceptible

des précipitations qui se produisent normalement dans les zones voisines. Hors, pour toute l'humidité atmosphérique circulant sans interruption sur n'importe quelle région, la condensation normale prélève 20% de toute l'humidité pour la formation des nuages de pluie. En général, pour un nuage de pluie, 20% de cette humidité peut être transformée à son tour en précipitations. Et sur ces 20% de pluie potentielle, l'ensemencement des nuages quant à lui, favorise une transformation en pluie qu'on peut estimer à 20%. En résumé, c'est $100(0,20 \times 0,20 \times 0,20) = 0,008$ soit 0,8% de la vapeur d'eau des nuages initiaux qui est prélevé à cause de l'ensemencement.

Par conséquent, la proportion d'humidité atmosphérique transformée en eau de pluie sur terre par l'action d'un tel programme est très faible. De plus, l'humidité atmosphérique des nuages est continuellement renouvelée grâce au processus d'évapotranspiration des forêts et à l'évaporation des cours d'eau. Certaines opérations d'ensemencement des nuages ont même indiqué une légère hausse des précipitations dans les zones voisines des zones cibles à une distance de 150 Km. Ainsi, l'intervention de tels programmes ne favorise point une localité au dépend d'une autre.

D'autre part, les relations conflictuelles entre agriculteurs et éleveurs qui constituent dans le sahel un problème social assez important. En effet, l'élevage étant de type extensif, les éleveurs effectuent de grands déplacements sans cesse à la recherche de pâturage pour le bétail. Ces mouvements occasionnent des dégâts au niveau des cultures qui réduisent le volume des récoltes et créent un climat de tension avec les agriculteurs. De plus, la rareté de l'eau entraîne souvent des tensions entre ces deux groupes qui revendiquent chacun le droit à l'utilisation de la ressource à sa guise, ce qui cause un problème de gestion de la ressource qui est rare. Mais grâce à l'ensemencement des nuages qui couvre tout le pays depuis 2005, l'amélioration des ressources en eau permettra de meilleurs rapports sociaux nécessaires au bon développement du secteur agropastoral. A cela, on peut ajouter la réduction des distances parcourues par les femmes à la recherche de l'eau grâce à une plus grande disponibilité de la ressource.

En conclusion, les questions relatives à la qualité de l'eau et à l'environnement permettent d'avoir des opinions optimistes quant au bien fondé du recours à un tel programme. A ce

jour, au Burkina Faso comme dans les différents pays qui recourent à cette méthode, les résultats des analyses des eaux sont toujours conformes aux normes recommandées par l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS). Par mesure de prudence, on peut juger cette situation comme un résultat de court terme, ce qui ne permet pas de tirer des conclusions définitives quant aux effets sur la santé des populations et leur environnement. Les retombées économiques sont globalement positives. C'est pourquoi parmi les recommandations, on peut suggérer que les analyses réalisées nécessitent d'être maintenues à moyen et long terme (ce qui est fait pour les cas du Burkina avec le LNSP) afin de tirer des résultats encore plus pertinents sur la qualité des eaux.

CODESRIA - BIBLIOTHEQUE

CONCLUSION GENERALE

Cette recherche, qualifiée d'exploratoire, a permis de traiter de quelques éléments concernant les questions socioéconomiques en matière de changement climatique. C'est pourquoi, les recommandations apportées par ces travaux constituent des portes d'accès pour d'autres approfondissements.

Ces travaux de recherche ont été menés dans le but d'apporter des éléments de réponses sur les aspects économiques que peuvent impliquer l'utilisation d'une telle méthode (modification artificielle du temps).

Partant des différents résultats obtenus suivant les secteurs, on peut avoir des motifs réels de satisfaction. Dans l'ensemble, on est parvenu à obtenir ce qui suit :

- ✓ en agriculture, les résultats sont globalement positifs sans toutefois occulter les cas où les résultats obtenus ne sont pas probants ;
- ✓ dans le secteur des pêches, on enregistre un effet neutre sur les rendements et par conséquent une situation inchangée pour les acteurs de la filière ;
- ✓ pour l'énergie, les résultats sont satisfaisants avec une disponibilité plus importante de la matière première ;
- ✓ et la productivité du bois de forêt qui s'améliore grâce au changement du régime pluviométrique.

Toutefois, les retombées ne sont pas toutes positives comme c'est le cas en agriculture et dans une certaine mesure dans la production hydroélectrique. Cela montre qu'il y a des aspects qui se révèlent parfois négatifs.

La méthode d'ensemencement des nuages est un processus très technique et qui demande des investissements importants. La technologie de pointe, les facteurs utilisés et tout le personnel associé sont autant d'éléments qui nécessitent un investissement conséquent. Les retombées économiques sont nombreuses pour le pays mais c'est un programme soutenu financièrement par le seul budget de l'Etat, ce qui représente une charge importante.

L'ensemble des travaux a porté sur la modification artificielle du temps qui est un élément se rapportant aux changements climatiques. Cette recherche a eu pour principal objectif de voir quels étaient les impacts de cette modification artificielle sur certains secteurs de l'économie nationale. Ce cas précis de changement climatique est l'augmentation des précipitations par ensemencement des nuages. Cette technologie utilisée de manière récurrente depuis plus d'une dizaine d'années s'est révélée être très coûteuse et incertaine quant à l'atteinte des objectifs poursuivis.

En effet, en lançant d'abord l'opération Saaga (phase ponctuelle), puis le programme Saaga (phase expérimentale) jusqu'à la pérennisation de l'activité, les questions ont toujours été posées sur la capacité d'une telle méthode à répondre convenablement pour palier les besoins en eau de notre pays. Les besoins en eau ciblés par les autorités consistaient au remplissage des retenues d'eau, plus d'eau pour l'agriculture et le bétail et un apport pour renforcer la végétation face à l'avancée du désert et soutenir la production industrielle.

Ces préoccupations des pouvoirs publics et les multiples interrogations des contribuables burkinabè ont guidé nos travaux. Mais tout d'abord, il a fallu mettre en évidence le changement du régime pluviométrique imputable à l'ensemencement. Par analyse du niveau des isohyètes aussi bien pour le Burkina Faso que pour le Mali et le Niger, on a pu constater une remontée des isohyètes du Burkina Faso depuis le début des années 2000 pendant que les deux autres pays pâtissaient toujours des effets sévères de la baisse de la pluviométrie. Cette observation est venue renforcée les résultats de nos travaux précédents (DEA) où nous avons constaté une augmentation de la pluviométrie de 9% imputable à l'ensemencement à partir de 1998 jusqu'en 2003.

Une fois ce résultat obtenu, cette recherche s'est articulée autour de quatre objectifs spécifiques qui ont servi de base aux hypothèses :

- ✓ l'impact du programme d'ensemencement sur les cultures céréalières de la région ;
- ✓ les éventuelles retombées sur le volume des pêches au niveau du barrage ;
- ✓ l'impact sur la production hydroélectrique ;
- ✓ l'évolution du couvert végétal de la région ;

et dans une certaine mesure la disponibilité en eau de boisson.

La zone de l'étude a été celle du bassin du Nakambé, plus grand bénéficiaire du programme. La méthodologie utilisée a été celle du changement de productivité pour mettre en exergue les éventuels changements de production (en agriculture, dans la pêche, en hydroélectricité et pour le bois de forêt) suite à l'introduction de cette technologie. Les données utilisées sont essentiellement des données secondaires provenant des structures nationales spécialisées pour chacune des questions traitées.

Les résultats des analyses ont permis d'avoir des résultats assez probants du point de vue économique.

En matière agricole, le changement du régime pluviométrique a permis de constater des améliorations de rendements sur certaines cultures céréalières, notamment le mil et le maïs. Toutefois, les effets attendus n'ont pas été tous positifs car les résultats obtenus ont montré des effets de baisse de rendements pour le sorgho. Dans l'analyse de ce cas, l'explication plausible est l'hypothèse que cela pouvait se justifier par la nature de la spéculation qui dans ce cas de figure (sorgho) est une spéculation propre aux savanes qui sont moyennement arrosées.

Dans le domaine de la pêche, les résultats obtenus ont confirmé l'hypothèse de départ. En effet, les estimations ont montré des effets légèrement négatifs voire nuls (-0,02%) de l'ensemencement des nuages sur le niveau des captures. Cet état de fait n'a pour conséquence aucun changement sur les revenus des acteurs qui évoluent dans le secteur.

La question énergétique a produit des résultats globaux positifs. Cela s'est traduit par l'amélioration de la production hydroélectrique suite à l'ensemencement tout en n'occultant pas des effets négatifs qui pourraient être causés en cas de pluies trop abondantes. Toutefois, ces effets négatifs demeurent faibles face à un effet positif plus important, ce qui fait résulter un accroissement net de la production de 8,067 MWh par campagne annuelle (six mois d'ensemencement). Même si cette production additionnelle demeure relativement faible comparée à la production annuelle du barrage, on retient que l'impact est tout de même positif.

La dernière préoccupation s'est penchée sur la productivité du bois de forêt. Au Burkina Faso, les forêts rencontrées sont des forêts claires, caractérisées par des arbres de taille modeste (8 à 15 m), au feuillage léger avec un sous-bois constitué d'une strate herbacée. Cependant, ces forêts sont sources de revenus pour un grand nombre de riverains. Les résultats enregistrés par cette recherche ont permis de constater un accroissement de la productivité du bois de forêt de l'ordre de 0,03%. Cet effet reste positif, mais sa faiblesse témoigne de la forte pression anthropique et de celle du cheptel exercée sur la ressource ligneuse comme l'ont attesté les résultats obtenus.

En somme, l'expérience entreprise ne révèle pas des résultats positifs de très grande ampleur, mais dans l'ensemble ils sont positifs. Cette technologie assez onéreuse et exigeante dans la qualification du personnel mérite une attention particulière. Son maintien, pour un fonctionnement au gré des besoins, serait un choix adéquat parce que ne serait ce que sur le plan social, l'impact de quantité d'eau supplémentaire est source d'équilibre entre les populations.

Au titre des recommandations, on peut souhaiter qu'un tel programme mérite d'être soutenu financièrement par une participation conjointe des grandes sociétés dont les activités sont étroitement tributaires des ressources en eau. En effet, aux Etats-Unis comme en Chine, on observe que ces programmes sont exclusivement à l'initiative des grands groupes qui investissent pour les besoins de leurs activités. Dans notre cas de figure, la contribution de plusieurs de ces sociétés pour soutenir les efforts de l'Etat, pourrait être une alternative viable. On peut suggérer la SOFITEX, les sociétés industrielles, les compagnies minières qui toutes utilisent de grandes quantités d'eau pour mener les activités quotidiennes.

Les travaux effectués dans ce cadre sont loin d'épuiser les questions sur les impacts économiques qu'une économie pourrait en tirer. En effet, au niveau agricole, la recherche pourrait être approfondie pour apprécier les effets sur les marchés suivant l'élasticité de la demande ou encore sur d'autres types de cultures telles que les cultures de rente (coton, sésame, ...). En matière de productivité des ligneux, les voies de recherche existent

également tel l'effet sur le niveau de vie des populations (revenus, complément alimentaire, etc.).

Tout cela revient à évaluer les effets indirects du programme.

Cette thématique n'étant pas très explorée par les économistes, nous escomptons que les résultats de cette recherche pourront apporter un plus à la théorie économique liée au changement climatique. En outre, nous espérons qu'ils constitueront un support pour les pays en voie de développement du CILSS qui ont opté pour la pratique de l'ensemencement des nuages tels que le Sénégal et le Mali qui l'utilisent déjà.

A l'échelle macroéconomique, le projet APENS (Augmentation des Précipitations par Ensemencement des Nuages dans le Sahel) du CILSS à caractère régional et qui est à un stade avancé dans sa mise en place, pourrait être un bénéficiaire.

CODESRIA - BIBLIOTHÈQUE

BIBLIOGRAPHIE

- ASAFU-ADJAYE J. 2003, «Biodiversity loss and economic growth: a cross-country analysis», *Contemporary Economic Policy*, 21 (2): 173-185.
- ASCE, American Society of Civil Engineers 2006, *Guidelines for Cloud Seeding to Augment Precipitation*, Second Edition, Virginia USA.
- BARK, L. Dean, 1978, «A Study of the Effects of Altering the Precipitation Pattern on the Economy and Environment of Kansas», *Kansas Agricultural Experiment Station, Department Report 5-425*, Kansas October 1.
- BREUIL, C. 1996, « Revue du secteur des pêches et de l'aquaculture: Mali » *FAO Circulaire sur les pêches*. No. 923. Rome, FAO. 47p.
- BULLER O., L. Dean BARK and R. VANDERLIP, July 1981, «Effect of Weather Modification on Supply and Total Revenue of a Region», *Western Journal of Agricultural Economics*, Oklahoma, USA.
- CALIFORNIA ENERGY COMMISSION (CEC), 2007, «Optimizing cloud seeding for water and energy in California, California», *California Energy Commission, Public Interest Energy Research Program (PIER)*, USA.
- CHANTEREAU J. et NICOU R., 1991, *Le sorgho*. Editions Maisonneuse et Larose, Paris. 159 p.
- QUIRION P., CHAISE L., FERLA J., HONORE A., MOUKHLI R. 2005 « L'impact du changement climatique sur l'agriculture en Afrique », *Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Atelier Changements Climatiques 48p*, Paris, France.

- CHANGNON S. & HOLLINGER S.E. 1992, «The potential use of summer rainfall enhancement in Illinois: a field experiment to define responses of crop yields to increased rainfall», *Journal of Applied Meteorology*, Kansas, USA.
- CNRS, 2006, « 5défis pour la biodiversité » *Centre National de la Recherche Scientifique France le journal*;/ N° 196- Mai 2006/Biodiversité, Paris, France.
- DARBY M. & KARNI E., (1973), « Free competition and the optimal amount of fraud », *Journal of Law and Economics*, 16, pp. 67-88.
- DAKOTA AGRICULTURAL DEPARTMENT et al., 1973, «Effects of Additional Precipitation on Agricultural Production, the Environment, the Economy and Human Society in South Dakota», *South Dakota Agricultural Experiment Station*, Final Report, June 30, Denver, USA.
- FAO/DFID, 2006, Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture : « Evaluation de la contribution du secteur des pêches à l'économie nationale en Afrique de l'Ouest et du Centre », *programme pour des moyens d'existence durables dans la pêche (PMEDE/RT)*, Rome, Italie.
- FIDA, Novembre 2008, « Le changement climatique : un enjeu pour le développement », *Fonds International de Développement Agricole*, Rome, Italie.
- GIZ, 2010, « water loss reduction, Eschborn /Germany ». *Coopération Internationale Allemande*.
- GARCIA P., CHANGNON S. & PINAR M. 1989, «Economic Effects of precipitation enhancement in the Corn Belt», *Climate and Meteorology Section, Illinois State Water Survey, Champaign, Illinois*, Washington DC, USA.

- GASMI Nacer et GROLLEAU Gilles, « Spécificités des innovations environnementales : une application aux systèmes agro-alimentaires », *Cairn info, De Boeck Université/ Innovations*, 2003/2 – n° 18 pages 73 à 89, Genève, Suisse.
- GRIFFITH D.A., Girdzus J., Alan D. Lisonbee 1994, «Summertime cloud seeding programs in Central America designed to enhance hydroelectric generation» By Don A. North American Weather Consultants Salt Lake City, Utah, *Journal of Weather Modification U.S.A.*
- GRIFFITH D.A., M. E. SOLAK & José MONCADA, 1998, «A Cloud Seeding Program to Enhance Hydroelectric Power Production from the El Cajon Drainage, Honduras, Tegucigalpa, Honduras», *Journal of Weather Modification, C.A.*
- GROLLEAU Gilles, 2000, « L'écoproduit agro-alimentaire : de la compréhension des concepts à la complexité de la réalité », *Annales des Mines – Responsabilité et Environnement*, 18 : 27-44, Paris France.
- GROLLEAU Gilles, 2001, « Le management environnemental de l'exploitation agricole peut-il être une stratégie "win-win-win" ? », *Econome appliquée*, Tome LIV (4) : 157-168, Genève, Suisse.
- HARRIS, EDWARD R., 1981, *Environmental Assessment and Finding of No Significant Impact. U.S. Department of the Interior, Colorado, USA Sierra Cooperative Pilot Project.*
- HOWELL, WALLACE E., 1977, «Environmental Impacts of Precipitation Management: Results and Inferences from Project Sky water». *American Meteorology Society, Bull, USA.*
- HULME Mike, 1996, «Climate Change and Southern Africa: an Exploration of some Potential Impacts and Implications in the SADC Region». *Rapport commandé par le FMN International et coordonné par la section de la recherche climatique, UEA, Norwich, Royaume-Uni, 104 p.*

- HULME Mike, 2003, «Abrupt climate change: can society cope?» *Tyndall Centre for Climate Change Research and School of Environmental Science, University of East Anglia, Norwich NR4 7TJ, UK published online 22 July.*
- HURLIN C., 2000, *L'Econométrie des Données de Panel Modèles Linéaires Simples, Ecole doctorale, Edocif, Paris, France.*
- IFPRI 2007, *International Food Policy Research Institute, «The Role of Agriculture in Development Implications for Sub-Saharan Africa», Washington USA.*
- INSD 2008, *Institut National de la Statistique et de la Démographie, Annuaire statistique, édition 2008, année parution 2009, Ouagadougou.*
- JURY R. Mark 2001, *Economic Impacts of Climate Variability in South Africa and Development of Resource Prediction Models, South Africa.*
- KEMP, R., ARUNDEL, A., 1998, *Survey Indicators for Environmental Innovation, Idea Report 8, STEP Group, Norway.*
- KEYES Conrad G. & al. 2006, *Guidelines for Cloud Seeding to Augment Precipitation American Society of civil Engineers, Virginia, USA.*
- KLEIN Donald A., 1978, *Environmental Impacts of Artificial Ice Nucleating Agents, Dowden, Hutchinson & Ross, Inc., Stroudsburg, 256 pp, New York, USA.*
- LUXORION, 2005, *L'eau, l'or bleu; Revue Scientifique spécialisée dans le domaine de l'eau.*
- MERRILL Ann., Todd. ADAMS & D. COLE, 2005, «Utah cloud seeding program increased runoff/cost analyses»; *Utah department of natural resources, division of water Resources May 2005, Utah, USA.*

- METEOROLOGIE NATIONALE, 2006, *Changements climatiques et sécurité alimentaire*, Ouagadougou, Burkina Faso.
- MIDA / CSBE – Burkina, Avril 2005, Situation économique du Burkina Faso, Ouagadougou.
- MIETTON M., 1986, *Méthodes et efficacité de la lutte contre l'érosion hydrique au Burkina Faso*, Savoie, France.
- MINISTERE DE L'AGRICULTURE, DE L'ALIMENTATION ET DES AFFAIRES RURALES(2009), « La pratique de gestion optimale : Aperçu » ; Ontario, Canada.
- MINTEN B., J.C RANDRIANARISOA, L. RNADRIANARISON, Novembre 2003, *Agriculture, pauvreté rurale et politiques économiques à Madagascar*, Madagascar.
- ONF 2009, Office National des Forêts, Paris, France.
- OUEDRAOGO Kimsé, 2001, « L'étude prospective du secteur forestier en Afrique (FOSA) : Burkina Faso», *FAO forestry 2001*, Ouagadougou.
- OUIMINGA, 2005, Mémoire de DEA, *Impact du programme "saaga" dans la région du centre: situation hydrologique*, Ouagadougou, Burkina Faso.
- PES *Parsons Engineering Science, Inc.*, 1995, «Environmental Assessment for the Pacific Gas and Electric Company and the U.S. Forest Service, Stanislaus National Forest».
- ROGERS Mark, 1998, «The definition and measurement of productivity», *Melbourne Institute of Applied Economic and Social Research*, Australia.
- SENE louis, 1995, *Réponse de la variété de sorgho ce 145-66 à l'alimentation en.eau : effets du stress hydrique sur le rendement et la qualité des semences*, mémoire de fin d'études pour l'obtention du diplôme d'ingénieur des travaux agricoles, Sénégal.

- SHIPPEY K. & al. (2004) «Environmental challenges to operationalisation of South African rainfall enhancement», *Water Institute of South Africa (WISA), Cape Town.*
- SMITH Adam, 1776, *Recherches sur la nature et les causes de la richesse des nations.*
- STAUFFER N. E. & K. WILLIAMS, 2000, «Utah cloud seeding program increased runoff/cost analyses»; *Utah department of natural resources, division of water, Utah, USA.*
- SWANSON E. R., HUFF F. A. and CHANGNON S. A., «Potential benefits of weather modification for Illinois agriculture 1972, Illinois», *Illinois Agricultural Economics, 1972 Agricultural & Applied Economics Association, USA.*
- THIOMBIANO T. 2002, *Econométrie des modèles dynamiques ; édition l'Harmattan, Paris, France.*
- VANZYL J., 1993, «Drought and the economy, Indicator SA, Zululand, South Africa».
- WHETE J., 2009, « Systèmes énergétiques : Vulnérabilité – Adaptation – Résilience (VAR) », *Helio International, Burkina Faso.*
- WOOLDRIDGE J.M., 2002, *Introductory Econometrics: A Modern Approach 2nd edition, South Western, USA.*
- World Resources Institute (WRI), The World Conservation Union (WCU) and United Nations Environment Program (UNEP), 1992, *Global Biodiversity Strategy.* Washington, D.C.

ANNEXES 1

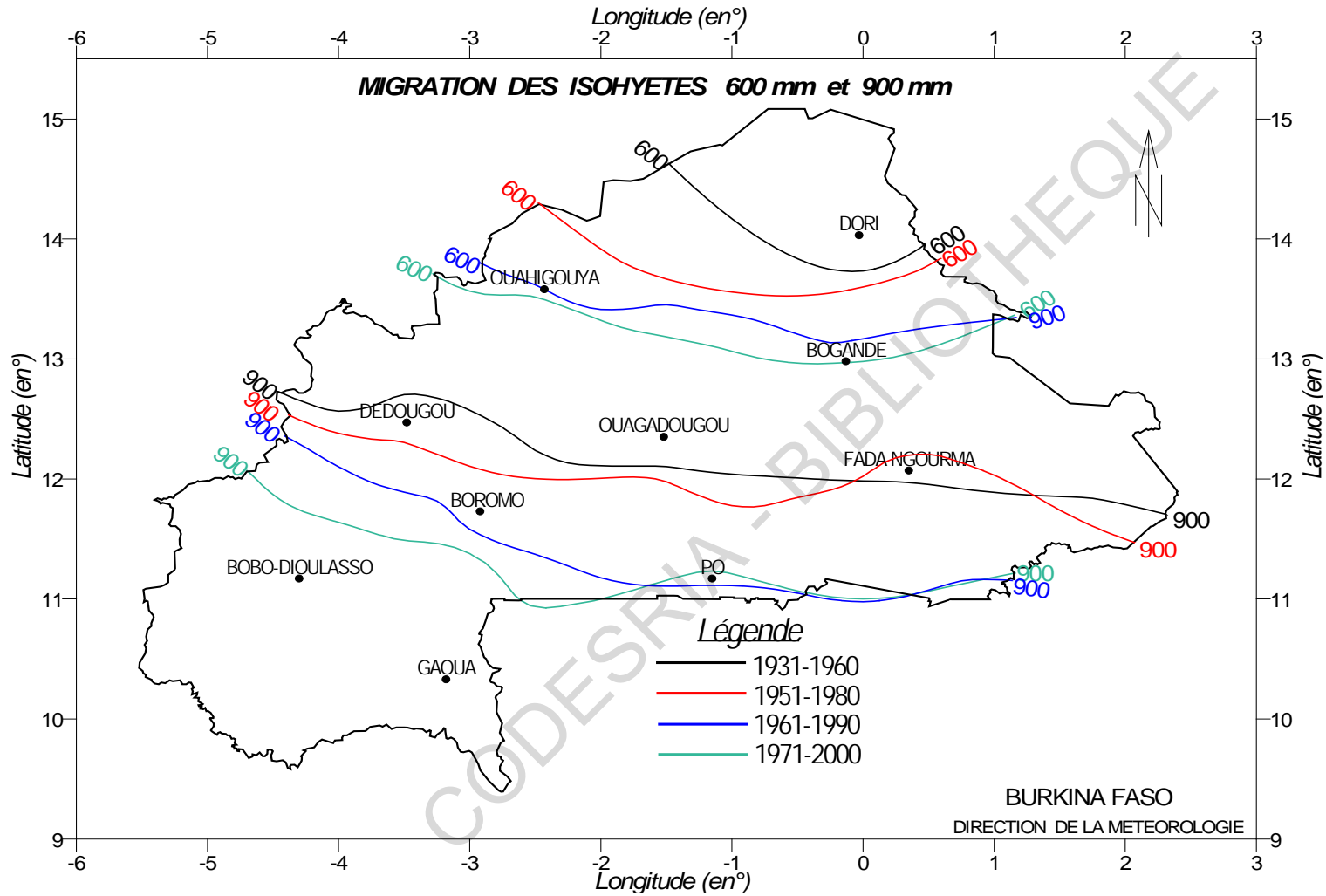


Figure 10 : Evolution des isohyètes par période décennale jusqu'en 2000

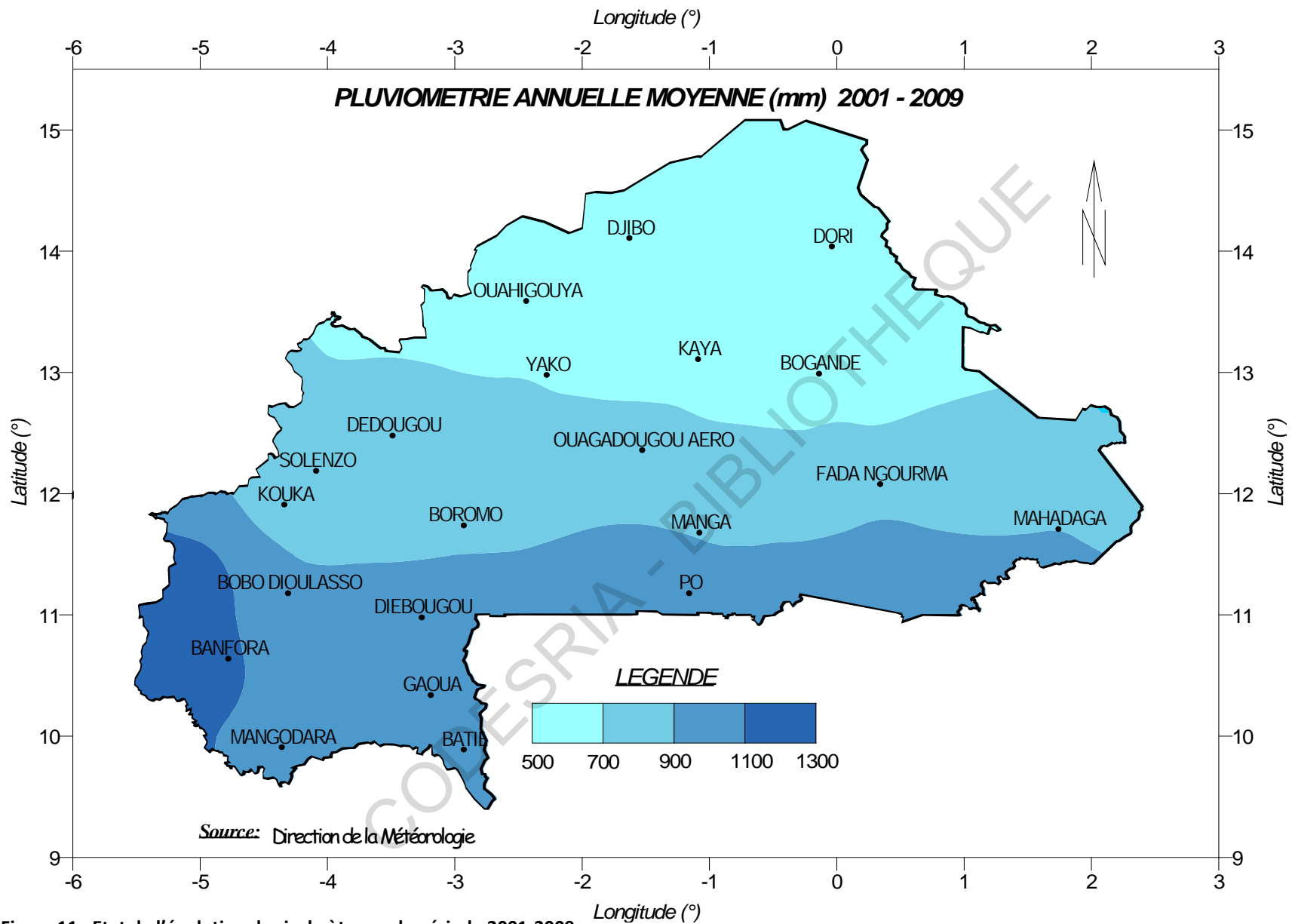


Figure 11 : Etat de l'évolution des isohyètes sur la période 2001-2009

Figure 12 : Générateurs au sol utilisés pour ense mencer

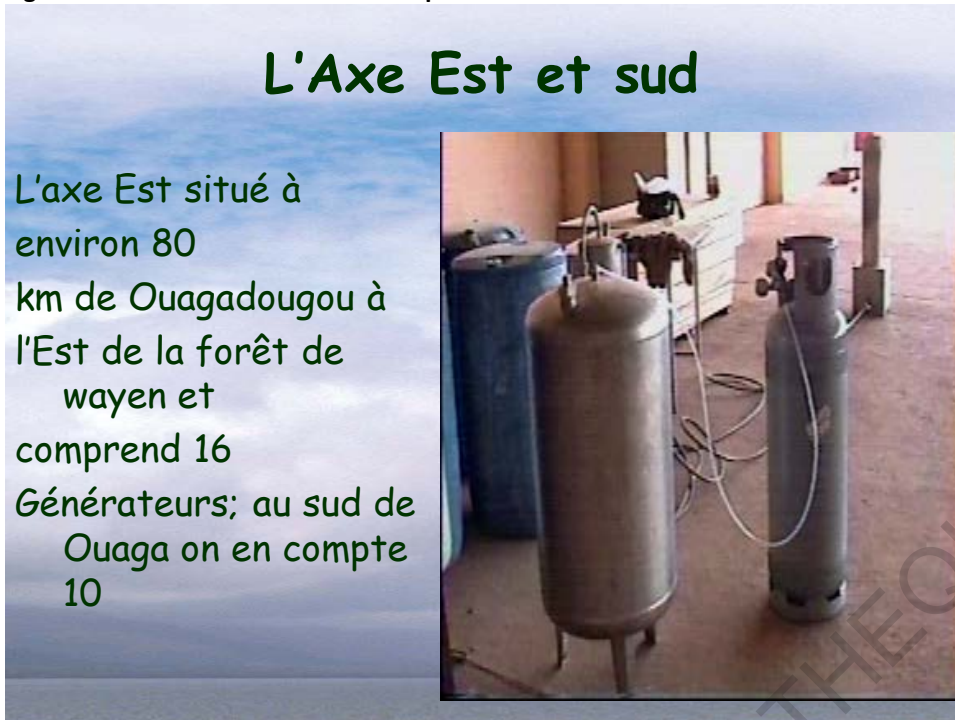
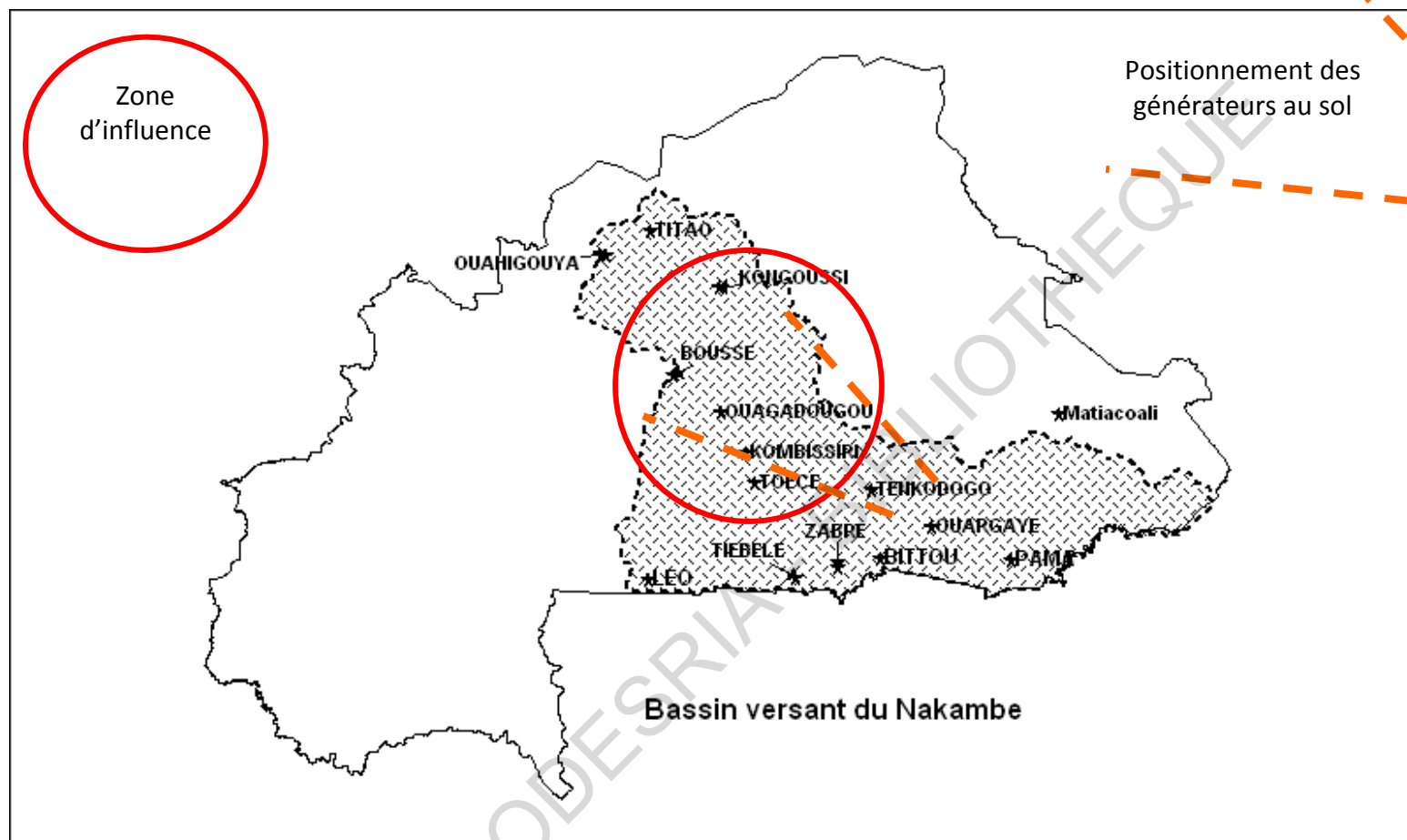


Figure 13 : Type d'avion utilisé pour l'ensemencement par voie aérienne

Figure 14 : Disposition des générateurs au sol autour de la zone cible



ANNEXES 2

➤ 2.1 CAS DU MAÏS

Test sur la présence d'effets individuels

De 1993 à 1997

| | | | |
|-----------------------------------|--------------------|---|--------|
| Fixed-effects (within) regression | Number of obs | = | 40 |
| Group variable (i): province | Number of groups | = | 8 |
| R-sq: within = 0.4451 | Obs per group: min | = | 5 |
| between = 0.0075 | avg | = | 5.0 |
| overall = 0.0838 | max | = | 5 |
| | F(5,27) | = | 4.33 |
| corr(u_i, Xb) = -0.7191 | Prob > F | = | 0.0051 |

| ln_y | Coef. | Std. Err. | t | P> t | [95% Conf. Interval] |
|---------|-----------|-----------|-------|-------|----------------------|
| ln_pl | 1.047973 | .5228082 | 2.00 | 0.055 | -.0247404 2.120687 |
| trend | -.1945925 | .0620189 | -3.14 | 0.004 | -.3218447 -.0673403 |
| ln_h | 25.73805 | 11.25369 | 2.29 | 0.030 | 2.647395 48.82871 |
| ln_njrp | -.3024624 | .4726147 | -0.64 | 0.528 | -1.272188 .667263 |
| ln_eng | .2646886 | .266421 | 0.99 | 0.329 | -.2819622 .8113395 |
| cons | -86.83009 | 39.84435 | -2.18 | 0.038 | -168.5839 -5.076235 |

| | |
|---------|---|
| sigma_u | .54493276 |
| sigma_e | .39205725 |
| rho | .65892539 (fraction of variance due to u_i) |

F test that all u_i=0: F(7, 27)= 2.01 Prob > F = 0.0902

De 1998 à 2002

| | | | |
|-----------------------------------|--------------------|---|--------|
| Fixed-effects (within) regression | Number of obs | = | 40 |
| Group variable (i): province | Number of groups | = | 8 |
| R-sq: within = 0.3434 | Obs per group: min | = | 5 |
| between = 0.5649 | avg | = | 5.0 |
| overall = 0.3906 | max | = | 5 |
| | F(5,27) | = | 2.82 |
| corr(u_i, Xb) = -0.6764 | Prob > F | = | 0.0354 |

| ln_y | Coef. | Std. Err. | t | P> t | [95% Conf. Interval] |
|---------|-----------|-----------|-------|-------|----------------------|
| ln_pl | 1.875251 | .5570305 | 3.37 | 0.002 | .7323187 3.018183 |
| trend | .0523007 | .0540484 | 0.97 | 0.342 | -.0585975 .1631989 |
| ln_h | -16.02511 | 9.851216 | -1.63 | 0.115 | -36.23814 4.187915 |
| ln_njrp | -.8689305 | .5212164 | -1.67 | 0.107 | -1.938378 .2005171 |
| ln_eng | .0602424 | .0965873 | 0.62 | 0.538 | -.1379385 .2584233 |
| cons | 51.27921 | 33.09577 | 1.55 | 0.133 | -16.62771 119.1861 |

| | |
|---------|---|
| sigma_u | .29704948 |
| sigma_e | .33606079 |
| rho | .43861457 (fraction of variance due to u_i) |

F test that all u_i=0: F (7, 27) = 1.92 Prob > F = 0.1050

Test de Hausman

De 1993 à 1997

| | ---- Coefficients ---- | | | |
|--------|------------------------|-----------|---------------------|-----------------------------|
| | (b) fixe | (B) . | (b-B) Difference | sqrt(diag(V_b-V_B)) S.E. |
| ln_pl | 1.047973 | .4735158 | .5744576 | .1894171 |
| trend | -.1945925 | -.133611 | -.0609815 | .0244752 |
| ln_h | 25.73805 | -3.240064 | 28.97812 | 9.534638 |
| _njrp | -.3024624 | -.1683321 | -.1341302 | .2355146 |
| ln_eng | .2646886 | .0971568 | .1675319 | .2500092 |

b = consistent under Ho and Ha; obtained from xtreg
B = inconsistent under Ha, efficient under Ho; obtained from xtreg
Test: Ho: difference in coefficients not systematic
 $\chi^2(5) = (b-B)'[(V_b-V_B)^{-1}](b-B)$
= 9.35
Prob>chi2 = 0.0958

De 1998 à 2002

| | ---- Coefficients ---- | | | |
|---------|------------------------|-----------|---------------------|-----------------------------|
| | (b) fixe | (B) . | (b-B) Difference | sqrt(diag(V_b-V_B)) S.E. |
| ln_pl | 1.875251 | 1.062841 | .8124097 | .3332193 |
| trend | .0523007 | .05773 | -.0054293 | .0300113 |
| ln_h | -16.02511 | -11.79143 | -4.233681 | 8.723634 |
| ln_njrp | -.8689305 | -.4027422 | -.4661883 | .3849808 |
| ln_eng | .0602424 | .0213022 | .0389402 | .0594206 |

b = consistent under Ho and Ha; obtained from xtreg
B = inconsistent under Ha, efficient under Ho; obtained from xtreg
Test: Ho: difference in coefficients not systematic
 $\chi^2(5) = (b-B)'[(V_b-V_B)^{-1}](b-B)$
= 67.62
Prob>chi2 = 0.0000

Correction hétéroscédasticité (maïs) sous période 2 : estimation robuste

De 1998 à 2002

```

Fixed-effects (within) regression      Number of obs      =      40
Group variable (i): province          Number of groups   =      8
R-sq:  within = 0.4749                Obs per group: min =      5
      between = 0.0271                  avg =              5.0
      overall = 0.1807                  max =              5
                                          F(5,27) =          4.88
corr(u_i, Xb) = -0.5439                Prob > F =          0.0026

```

| y | Coef. | Std. Err. | t | P> t | [95% Conf. Interval] | |
|-----------|-----------|-----------------------------------|-------|-------|----------------------|----------|
| ln_pl | 881.2723 | 238.9485 | 3.69 | 0.001 | 390.9905 | 1371.554 |
| trend | 61.80616 | 21.15476 | 2.92 | 0.007 | 18.40017 | 105.2121 |
| ln_h | 3978.632 | 3890.644 | 1.02 | 0.316 | -4004.31 | 11961.57 |
| ln_njrp | -.217782 | 208.1411 | -0.00 | 0.999 | -427.2881 | 426.8526 |
| ln_pl_eng | -9.545662 | 8.349482 | -1.14 | 0.263 | -26.67738 | 7.586059 |
| cons | -18145.35 | 13081.53 | -1.39 | 0.177 | -44986.42 | 8695.729 |
| sigma_u | 166.10934 | | | | | |
| sigma_e | 132.76608 | | | | | |
| rho | .61019095 | (fraction of variance due to u_i) | | | | |

F test that all u_i=0: F(7, 27) = 4.06 Prob > F = 0.0037

Test de Hausman

De 1993 à 1997

| | ---- Coefficients ---- | | | |
|-----------|------------------------|-----------|---------------------|-----------------------------|
| | (b) fixe | (B) | (b-B) Difference | sqrt(diag(V_b-V_B)) S.E. |
| ln_pl | 483.4362 | 211.6859 | 271.7502 | . |
| trend | -55.28149 | -29.69168 | -25.58982 | . |
| ln_h | 16501.98 | 2619.935 | 13882.05 | 3779.084 |
| ln_njrp | -265.0468 | -202.5663 | -62.48045 | 81.59484 |
| ln_pl_eng | -10.86788 | -7.526997 | -3.340879 | 4.390117 |

b = consistent under Ho and Ha; obtained from xtreg
 B = inconsistent under Ha, efficient under Ho; obtained from xtreg
 Test: Ho: difference in coefficients not systematic
 $\chi^2(5) = (b-B)'[(V_b-V_B)^{-1}](b-B)$
 = 12.28
Prob>chi2 = 0.0312

➤ 2.3 CAS DU SORGHO

Test sur la présence d'effets individuels

De 1993 à 1997

```

Fixed-effects (within) regression      Number of obs      =      40
Group variable (i): province          Number of groups   =       8
R-sq:  within = 0.2550                Obs per group: min =       5
      between = 0.3389                  avg =             5.0
      overall = 0.0041                  max =             5
                                          F(7,25)           =      1.22
corr(u_i, Xb) = -0.7720                Prob > F           =      0.3275

```

| y | Coef. | Std. Err. | t | P> t | [95% Conf. Interval] | |
|---------|-----------|-----------------------------------|-------|-------|----------------------|--|
| pl | 1.593046 | 2.355671 | 0.68 | 0.505 | -3.25855 6.444642 | |
| pl2 | -.0011868 | .0016453 | -0.72 | 0.477 | -.0045754 .0022018 | |
| trend | -42.37385 | 36.60584 | -1.16 | 0.258 | -117.765 33.01729 | |
| h | 211.2693 | 246.5083 | 0.86 | 0.400 | -296.424 718.9626 | |
| njrp | -8.106852 | 16.56645 | -0.49 | 0.629 | -42.22608 26.01238 | |
| pl_eng | .0000125 | .0000116 | 1.08 | 0.289 | -.0000113 .0000364 | |
| pl_njrp | .0038845 | .0221746 | 0.18 | 0.862 | -.041785 .0495539 | |
| cons | -5489.639 | 7237.627 | -0.76 | 0.455 | -20395.81 9416.534 | |
| sigma_u | 312.83995 | | | | | |
| sigma_e | 237.75621 | | | | | |
| rho | .63387845 | (fraction of variance due to u_i) | | | | |

F test that all u_i=0: F(7, 25)= 1.53 Prob > F = 0.2014

De 1998 à 2002

```

Fixed-effects (within) regression      Number of obs      =      40
Group variable (i): province          Number of groups   =       8
R-sq:  within = 0.5837                Obs per group: min =       5
      between = 0.1792                  avg =             5.0
      overall = 0.0307                  max =             5
                                          F(7,25)           =      5.01
corr(u_i, Xb) = -0.5885                Prob > F           =      0.0012

```

| y | Coef. | Std. Err. | t | P> t | [95% Conf. Interval] | |
|---------|-----------|-----------------------------------|-------|-------|----------------------|--|
| pl | 2.806347 | 1.626774 | 1.73 | 0.097 | -.5440565 6.15675 | |
| pl2 | -.0036896 | .0011055 | -3.34 | 0.003 | -.0059663 -.0014128 | |
| trend | 46.27317 | 19.60992 | 2.36 | 0.026 | 5.885779 86.66056 | |
| h | 259.9067 | 139.9997 | 1.86 | 0.075 | -28.42813 548.2416 | |
| njrp | -33.27437 | 11.82869 | -2.81 | 0.009 | -57.63603 -8.912724 | |
| pl_eng | 5.84e-06 | 6.77e-06 | 0.86 | 0.397 | -8.11e-06 .0000198 | |
| pl_njrp | .0514154 | .0124397 | 4.13 | 0.000 | .0257953 .0770355 | |
| cons | -7161.124 | 4417.32 | -1.62 | 0.118 | -16258.76 1936.517 | |
| sigma_u | 224.24389 | | | | | |
| sigma_e | 116.52287 | | | | | |
| rho | .78739489 | (fraction of variance due to u_i) | | | | |

F test that all u_i=0: F(7, 25) = 6.12 Prob > F = 0.0003

Test de Hausman

De 1993 à 1997

| | ---- Coefficients ---- | | | |
|---------|------------------------|-----------|---------------------|-----------------------------|
| | (b) fixe | (B) . | (b-B) Difference | sqrt(diag(V_b-V_B)) S.E. |
| pl | 1.593046 | 3.766477 | -2.173431 | 1.092766 |
| pl2 | -.0011868 | -.0034767 | .0022899 | .0009631 |
| trend | -42.37385 | -1.250776 | -41.12307 | 11.44041 |
| h | 211.2693 | -213.4907 | 424.7599 | 221.0631 |
| njrp | -8.106852 | -22.17347 | 14.06662 | 9.960328 |
| pl_eng | .0000125 | 2.95e-06 | 9.59e-06 | 9.01e-06 |
| pl_njrp | .0038845 | .0300145 | -.0261301 | .014657 |

b = consistent under Ho and Ha; obtained from xtreg
 B = inconsistent under Ha, efficient under Ho; obtained from xtreg
 Test: Ho: difference in coefficients not systematic

$$\begin{aligned} \text{chi2}(4) &= (b-B)'[(V_b-V_B)^{-1}](b-B) \\ &= 6.10 \\ \text{Prob>chi2} &= 0.1915 \end{aligned}$$

De 1998 à 2002

| | ---- Coefficients ---- | | | |
|---------|------------------------|-----------|---------------------|-----------------------------|
| | (b) fixe | (B) . | (b-B) Difference | sqrt(diag(V_b-V_B)) S.E. |
| pl | 2.806347 | 2.780725 | .0256215 | .6613217 |
| pl2 | -.0036896 | -.0035802 | -.0001094 | .0003655 |
| trend | 46.27317 | 37.21801 | 9.055156 | 6.802907 |
| h | 259.9067 | 95.80511 | 164.1016 | 92.89264 |
| njrp | -33.27437 | -36.71536 | 3.44098 | 5.880499 |
| pl_eng | 5.84e-06 | 4.68e-06 | 1.16e-06 | 3.04e-06 |
| pl_njrp | .0514154 | .0515891 | -.0001737 | .0043379 |

b = consistent under Ho and Ha; obtained from xtreg
 B = inconsistent under Ha, efficient under Ho; obtained from xtreg
 Test: Ho: difference in coefficients not systematic

$$\begin{aligned} \text{chi2}(4) &= (b-B)'[(V_b-V_B)^{-1}](b-B) \\ &= 8.20 \\ \text{Prob>chi2} &= 0.0844 \end{aligned}$$

Estimation des paramètres

De 1993 à 1997

Random-effects GLS regression
 Group variable (i): province
 R-sq: within = 0.1040
 between = 0.7444
 overall = 0.2806

Number of obs = 40
 Number of groups = 8
 Obs per group: min = 5
 avg = 5.0
 max = 5

Random effects u_i ~ Gaussian
 corr(u_i, X) = 0 (assumed)

Wald chi2(7) = 12.48
 Prob > chi2 = 0.0858

| y | Coef. | Std. Err. | z | P> z | [95% Conf. Interval] | |
|---------|-----------|-----------|-------|-------|----------------------|-----------|
| pl | 3.766477 | 2.086876 | 1.80 | 0.051 | -.3237237 | 7.856679 |
| pl2 | -.0034767 | .0013339 | -2.61 | 0.009 | -.0060912 | -.0008622 |
| trend | -1.250776 | 34.77218 | -0.04 | 0.971 | -69.40299 | 66.90144 |
| h | -213.4907 | 109.0753 | -1.96 | 0.050 | -427.2743 | .2930333 |
| njrp | -22.17347 | 13.23779 | -1.68 | 0.094 | -48.11906 | 3.772109 |
| pl_eng | 2.95e-06 | 7.25e-06 | 0.41 | 0.684 | -.0000113 | .0000172 |
| pl_njrp | .0300145 | .0166399 | 1.80 | 0.071 | -.002599 | .0626281 |
| cons | 6114.261 | 3346.746 | 1.83 | 0.068 | -445.2413 | 12673.76 |

De 1998 à 2002

Random-effects GLS regression
 Group variable (i): province
 R-sq: within = 0.5565
 between = 0.0062
 overall = 0.1701

Number of obs = 40
 Number of groups = 8
 Obs per group: min = 5
 avg = 5.0
 max = 5

Random effects u_i ~ Gaussian
 corr(u_i, X) = 0 (assumed)

Wald chi2(7) = 30.94
 Prob > chi2 = 0.0001

| y | Coef. | Std. Err. | z | P> z | [95% Conf. Interval] | |
|---------|-----------|-----------|-------|-------|----------------------|-----------|
| pl | 2.780725 | 1.486286 | 1.87 | 0.049 | -.132342 | 5.693792 |
| pl2 | -.0035802 | .0010433 | -3.43 | 0.001 | -.005625 | -.0015353 |
| trend | 37.21801 | 18.3921 | 2.02 | 0.043 | 1.170152 | 73.26587 |
| h | 95.80511 | 104.742 | 0.91 | 0.360 | -109.4854 | 301.0956 |
| njrp | -36.71536 | 10.26342 | -3.58 | 0.000 | -56.83128 | -16.59943 |
| pl_eng | 4.68e-06 | 6.05e-06 | 0.77 | 0.440 | -7.18e-06 | .0000165 |
| pl_njrp | .0515891 | .0116589 | 4.42 | 0.000 | .0287381 | .0744401 |
| cons | -2223.97 | 3223.063 | -0.69 | 0.490 | -8541.058 | 4093.117 |

ANNEXES 3

3.1 HYDROELECTRICITE

Tableau 52 : Corrélogramme des résidus

| Autocorrelation | | Partial Correlation | | rang | AC | PAC | Q-Stat | Prob | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--|-----|---------------------|-----|------|--------|--------|--------|-------|-----------------|--|---------------------|--|------|----|-----|--------|------|---|-----|---|-----|---|-------|-------|--------|-------|---|---|---|---|---|-------|--------|--------|-------|---|---|---|---|---|-------|-------|--------|-------|---|---|---|---|---|--------|--------|--------|-------|---|---|---|---|---|--------|-------|--------|-------|---|---|---|---|---|--------|--------|--------|-------|---|---|---|---|---|--------|-------|--------|-------|---|---|---|---|---|--------|--------|--------|-------|---|---|---|---|---|--------|--------|--------|-------|---|---|---|---|----|--------|-------|--------|-------|
| Date: 07/08/11 Time: 12:53 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Sample: 1993:01 2008:12 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Included observations: 192 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| <table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">Autocorrelation</th> <th colspan="2">Partial Correlation</th> <th>rang</th> <th>AC</th> <th>PAC</th> <th>Q-Stat</th> <th>Prob</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>.</td> <td>***</td> <td>.</td> <td>***</td> <td>1</td> <td>0.408</td> <td>0.408</td> <td>32.466</td> <td>0.000</td> </tr> <tr> <td>.</td> <td>.</td> <td>*</td> <td>.</td> <td>2</td> <td>0.012</td> <td>-0.186</td> <td>32.492</td> <td>0.000</td> </tr> <tr> <td>.</td> <td>.</td> <td>.</td> <td>*</td> <td>3</td> <td>0.016</td> <td>0.107</td> <td>32.541</td> <td>0.000</td> </tr> <tr> <td>.</td> <td>.</td> <td>*</td> <td>.</td> <td>4</td> <td>-0.002</td> <td>-0.064</td> <td>32.542</td> <td>0.000</td> </tr> <tr> <td>.</td> <td>.</td> <td>.</td> <td>.</td> <td>5</td> <td>-0.002</td> <td>0.035</td> <td>32.543</td> <td>0.000</td> </tr> <tr> <td>.</td> <td>.</td> <td>.</td> <td>.</td> <td>6</td> <td>-0.006</td> <td>-0.026</td> <td>32.549</td> <td>0.000</td> </tr> <tr> <td>.</td> <td>.</td> <td>.</td> <td>.</td> <td>7</td> <td>-0.008</td> <td>0.008</td> <td>32.563</td> <td>0.000</td> </tr> <tr> <td>.</td> <td>.</td> <td>.</td> <td>.</td> <td>8</td> <td>-0.007</td> <td>-0.010</td> <td>32.573</td> <td>0.000</td> </tr> <tr> <td>*</td> <td>.</td> <td>*</td> <td>.</td> <td>9</td> <td>-0.060</td> <td>-0.067</td> <td>33.294</td> <td>0.000</td> </tr> <tr> <td>.</td> <td>.</td> <td>.</td> <td>.</td> <td>10</td> <td>-0.056</td> <td>0.001</td> <td>33.930</td> <td>0.000</td> </tr> </tbody> </table> | | | | | | | | | Autocorrelation | | Partial Correlation | | rang | AC | PAC | Q-Stat | Prob | . | *** | . | *** | 1 | 0.408 | 0.408 | 32.466 | 0.000 | . | . | * | . | 2 | 0.012 | -0.186 | 32.492 | 0.000 | . | . | . | * | 3 | 0.016 | 0.107 | 32.541 | 0.000 | . | . | * | . | 4 | -0.002 | -0.064 | 32.542 | 0.000 | . | . | . | . | 5 | -0.002 | 0.035 | 32.543 | 0.000 | . | . | . | . | 6 | -0.006 | -0.026 | 32.549 | 0.000 | . | . | . | . | 7 | -0.008 | 0.008 | 32.563 | 0.000 | . | . | . | . | 8 | -0.007 | -0.010 | 32.573 | 0.000 | * | . | * | . | 9 | -0.060 | -0.067 | 33.294 | 0.000 | . | . | . | . | 10 | -0.056 | 0.001 | 33.930 | 0.000 |
| Autocorrelation | | Partial Correlation | | rang | AC | PAC | Q-Stat | Prob | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| . | *** | . | *** | 1 | 0.408 | 0.408 | 32.466 | 0.000 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| . | . | * | . | 2 | 0.012 | -0.186 | 32.492 | 0.000 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| . | . | . | * | 3 | 0.016 | 0.107 | 32.541 | 0.000 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| . | . | * | . | 4 | -0.002 | -0.064 | 32.542 | 0.000 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| . | . | . | . | 5 | -0.002 | 0.035 | 32.543 | 0.000 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| . | . | . | . | 6 | -0.006 | -0.026 | 32.549 | 0.000 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| . | . | . | . | 7 | -0.008 | 0.008 | 32.563 | 0.000 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| . | . | . | . | 8 | -0.007 | -0.010 | 32.573 | 0.000 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| * | . | * | . | 9 | -0.060 | -0.067 | 33.294 | 0.000 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| . | . | . | . | 10 | -0.056 | 0.001 | 33.930 | 0.000 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

Source : estimation des données

3.2 PÊCHE

| Breusch-Godfrey Serial Correlation LM Test: $p = 2$ | | | | |
|---|-------------|-----------------------|-------------|--------|
| F-statistic | 0.057544 | Prob. F(2,107) | 0.9441 | |
| Obs*R-squared | 0.126784 | Prob. Chi-Square(2) | 0.9386 | |
| Test Equation: | | | | |
| Dependent Variable: RESID | | | | |
| Method: Least Squares | | | | |
| Date: 01/06/11 Time: 18:41 | | | | |
| Sample: 1994M03 2003M12 | | | | |
| Included observations: 118 | | | | |
| Presample missing value lagged residuals set to zero. | | | | |
| | Coefficient | Std. Error | t-Statistic | Prob. |
| LN_FT1 | 60.09346 | 5393.298 | 0.011142 | 0.9911 |
| FT1 | -0.005773 | 0.398283 | -0.014496 | 0.9885 |
| YT | -0.003008 | 0.064859 | -0.046384 | 0.9631 |
| YT_1 | 0.004193 | 0.095139 | 0.044073 | 0.9649 |
| YT_2 | -0.001415 | 0.064106 | -0.022079 | 0.9824 |
| IT_YT | 4.66E-05 | 0.025266 | 0.001843 | 0.9985 |
| ZIG | 0.007655 | 0.190179 | 0.040249 | 0.9680 |
| PIR | -0.228146 | 5.414122 | -0.042139 | 0.9665 |
| C | -493.0220 | 45913.35 | -0.010738 | 0.9915 |
| RESID(-1) | 0.005928 | 0.098073 | 0.060449 | 0.9519 |
| RESID(-2) | 0.033776 | 0.100647 | 0.335590 | 0.7378 |
| R-squared | 0.001074 | Mean dependent var | 1.12E-09 | |
| Adjusted R-squared | -0.092283 | S.D. dependent var | 90.27777 | |
| S.E. of regression | 94.35142 | Akaike info criterion | 12.02051 | |

| | | | |
|-------------------|-----------|----------------------|----------|
| Sum squared resid | 952534.3 | Schwarz criterion | 12.27880 |
| Log likelihood | -698.2104 | Hannan-Quinn criter. | 12.12539 |
| F-statistic | 0.011509 | Durbin-Watson stat | 1.997546 |
| Prob(F-statistic) | 1.000000 | | |

| | | | | |
|---|-------------|-----------------------|-------------|--------|
| Breusch-Godfrey Serial Correlation LM Test: $p = 3$ | | | | |
| F-statistic | 0.039691 | Prob. F(3,106) | 0.9894 | |
| Obs*R-squared | 0.132404 | Prob. Chi-Square(3) | 0.9877 | |
| Test Equation: | | | | |
| Dependent Variable: RESID | | | | |
| Method: Least Squares | | | | |
| Date: 01/06/11 Time: 18:47 | | | | |
| Sample: 1994M03 2003M12 | | | | |
| Included observations: 118 | | | | |
| Presample missing value lagged residuals set to zero. | | | | |
| | Coefficient | Std. Error | t-Statistic | Prob. |
| LN_FT1 | 14.58343 | 5456.230 | 0.002673 | 0.9979 |
| FT1 | -0.002260 | 0.403187 | -0.005606 | 0.9955 |
| YT | -0.002786 | 0.065238 | -0.042700 | 0.9660 |
| YT_1 | 0.004109 | 0.095592 | 0.042987 | 0.9658 |
| YT_2 | -0.001570 | 0.064443 | -0.024357 | 0.9806 |
| IT_YT | 2.31E-05 | 0.025386 | 0.000911 | 0.9993 |
| ZIG | 0.006600 | 0.191644 | 0.034439 | 0.9726 |
| PIR | -0.190948 | 5.464576 | -0.034943 | 0.9722 |
| C | -107.7041 | 46445.62 | -0.002319 | 0.9982 |
| RESID(-1) | 0.005999 | 0.098537 | 0.060877 | 0.9516 |
| RESID(-2) | 0.033467 | 0.101211 | 0.330665 | 0.7416 |
| RESID(-3) | -0.007068 | 0.099411 | -0.071095 | 0.9435 |
| R-squared | 0.001122 | Mean dependent var | 1.12E-09 | |
| Adjusted R-squared | -0.102535 | S.D. dependent var | 90.27777 | |
| S.E. of regression | 94.79316 | Akaike info criterion | 12.03742 | |
| Sum squared resid | 952488.9 | Schwarz criterion | 12.31918 | |
| Log likelihood | -698.2075 | Hannan-Quinn criter. | 12.15182 | |
| F-statistic | 0.010825 | Durbin-Watson stat | 1.998677 | |
| Prob(F-statistic) | 1.000000 | | | |

➤ **De 1998 à 2002**

Fixed-effects (within) regression
 Group variable (i): id
 R-sq: within = 0.9997
 between = 0.9856
 overall = 0.9914
 corr(u_i , Xb) = 0.0483
 Number of obs = 40
 Number of groups = 8
 Obs per group: min = 5
 avg = 5.0
 max = 5
 F(5,27) = 21086.25
 Prob > F = 0.0000

| ln_v _{it} | Coef. | Std. Err. | t | P> t | [95% Conf. Interval] | |
|-------------------------------------|-----------|-----------|-------|-------|----------------------|-----------|
| ln_pl _{it} | 1.762826 | .0208116 | 84.70 | 0.000 | 1.720124 | 1.805528 |
| pli _t _btl _{it} | 8.59e-11 | 3.92e-11 | 2.19 | 0.037 | 5.53e-12 | 1.66e-10 |
| ln_btl _{it} | -.0861537 | .0529301 | -1.63 | 0.115 | -.1947573 | .02245 |
| ln_dens _{it} | .0303107 | .0392215 | 0.77 | 0.446 | -.0501653 | .1107866 |
| ln_pli _t _njrp | .0050152 | .0063974 | 0.78 | 0.440 | -.0081113 | .0181416 |
| cons | -4.25714 | .6606094 | -6.44 | 0.000 | -5.612598 | -2.901681 |

F test that all $u_i=0$: F(7, 27) = 5.35 Prob > F = 0.0006

4.2 Test de Hausman

➤ **De 1993 à 1997**

| | ---- Coefficients ---- | | | |
|--------------------------------------|------------------------|-----------|---------------------|-----------------------------|
| | (b) fixe | (B) | (b-B) Difference | sqrt(diag(V_b-V_B)) S.E. |
| ln_pl _{it} | 1.754213 | 1.751101 | .003112 | .014395 |
| pli _{it} _btl _{it} | 1.36e-10 | 1.08e-10 | 2.85e-11 | 1.49e-11 |
| ln_btl _{it} | .0104666 | -.0494272 | .0598938 | .0490564 |
| ln_dens _{it} | -.0051173 | -.0042485 | -.0008688 | .0231992 |
| ln_pl _{it} _njrp | .0117445 | .0185131 | -.0067686 | .0073572 |

b = consistent under Ho and Ha; obtained from xtreg
 B = inconsistent under Ha, efficient under Ho; obtained from xtreg

Test: Ho: difference in coefficients not systematic

$$\begin{aligned} \text{chi2}(4) &= (b-B)'[(V_b-V_B)^{-1}](b-B) \\ &= 6.49 \\ \text{Prob}>\text{chi2} &= 0.1651 \end{aligned}$$

➤ **De 1998 à 2002**

| | (b) fixe | (B) . | (b-B) Difference | sqrt(diag(V_b-V_B)) S.E. |
|-------------------------------------|-------------|-----------|---------------------|-----------------------------|
| ln_pl _{it} | 1.762826 | 1.774903 | -.0120771 | .0070963 |
| pl _{it} _btl _{it} | 8.59e-11 | 6.97e-11 | 1.63e-11 | 1.30e-11 |
| ln_btl _{it} | -.0861537 | -.0477258 | -.0384279 | .0490089 |
| ln_dens _{it} | .0303107 | -.0043409 | .0346516 | .03914 |
| ln_pl _{it} _njrp | .0050152 | .0049952 | .00002 | .0032145 |

b = consistent under Ho and Ha; obtained from xtreg
 B = inconsistent under Ha, efficient under Ho; obtained from xtreg

Test: Ho: difference in coefficients not systematic

$$\begin{aligned} \text{chi2}(4) &= (\mathbf{b}-\mathbf{B})' [(\mathbf{V}_b-\mathbf{V}_B)^{-1}] (\mathbf{b}-\mathbf{B}) \\ &= 5.27 \\ \text{Prob}>\text{chi2} &= 0.2609 \end{aligned}$$

4.3 Résultats d'estimation

➤ **De 1993 à 1997**

Random-effects GLS regression
 Group variable (i): id
 R-sq: within = 0.9995
 between = 0.9996
 overall = 0.9995
 Random effects u_i ~ Gaussian
 corr(u_i, X) = 0 (assumed)

Number of obs = 40
 Number of groups = 8
 Obs per group: min = 5
 avg = 5.0
 max = 5
 Wald chi2(5) = 69684.49
 Prob > chi2 = 0.0000

| ln_v _{it} | Coef. | Std. Err. | z | P> z | [95% Conf. Interval] |
|-------------------------------------|-----------|-----------|--------|-------|----------------------|
| ln_pl _{it} | 1.751101 | .0244817 | 71.53 | 0.000 | 1.703117 1.799084 |
| pl _{it} _btl _{it} | 1.08e-10 | 3.55e-11 | 3.03 | 0.002 | 3.81e-11 1.77e-10 |
| ln_btl _{it} | -.0494272 | .0179209 | -2.76 | 0.006 | -.0845515 -.0143028 |
| ln_dens _{it} | -.0042485 | .0028439 | -1.49 | 0.135 | -.0098225 .0013255 |
| ln_pl _{it} _njrp | .0185131 | .0107244 | 1.73 | 0.084 | -.0025062 .0395325 |
| cons | -4.665242 | .3404189 | -13.70 | 0.000 | -5.332451 -3.998033 |

➤ **De 1998 à 2002**

Random-effects GLS regression
 Group variable (i): id
 R-sq: within = 0.9997
 between = 0.9998
 overall = 0.9997
 Random effects $u_i \sim$ Gaussian
 corr(u_i , X) = 0 (assumed)

Number of obs = 40
 Number of groups = 8
 Obs per group: min = 5
 avg = 5.0
 max = 5
 Wald chi2(5) = 121724.02
 Prob > chi2 = 0.0000

| ln_v _{it} | Coef. | Std. Err. | z | P> z | [95% Conf. Interval] | |
|-------------------------------------|-----------|-----------|--------|-------|----------------------|-----------|
| ln_pl _{it} | 1.774903 | .0195644 | 90.72 | 0.000 | 1.736558 | 1.813249 |
| pl _{it} _btl _{it} | 6.97e-11 | 3.70e-11 | 1.88 | 0.060 | -2.80e-12 | 1.42e-10 |
| ln_btl _{it} | -.0477258 | .0199932 | -2.39 | 0.017 | -.0869117 | -.0085398 |
| ln_dens _{it} | -.0043409 | .0025284 | -1.72 | 0.086 | -.0092964 | .0006146 |
| lnpl _{it} _njrp | .0049952 | .0055312 | 0.90 | 0.366 | -.0058458 | .0158362 |
| cons | -4.682673 | .3724648 | -12.57 | 0.000 | -5.412691 | -3.952656 |

Correction hétéroscédasticité sous période 2

Random-effects GLS regression
 Group variable (i): id
 R-sq: within = 0.9995
 between = 0.9996
 overall = 0.9995
 Random effects $u_i \sim$ Gaussian
 corr(u_i , X) = 0 (assumed)

Number of obs = 40
 Number of groups = 8
 Obs per group: min = 5
 avg = 5.0
 max = 5
 Wald chi2 (5) = 5.06e+06
 Prob > chi2 = 0.0000

| ln_v _{it} | Coef. | Robust Std. Err. | z | P> z | [95% Conf. Interval] | |
|-------------------------------------|-----------|------------------|--------|-------|----------------------|-----------|
| ln_pl _{it} | 1.751101 | .047776 | 36.65 | 0.000 | 1.657461 | 1.84474 |
| pl _{it} _btl _{it} | 1.08e-10 | 4.09e-11 | 2.63 | 0.009 | 2.75e-11 | 1.88e-10 |
| ln_btl _{it} | -.0494272 | .0207649 | -2.38 | 0.017 | -.0901256 | -.0087288 |
| ln_dens _{it} | -.0042485 | .0026024 | -1.63 | 0.103 | -.0093492 | .0008522 |
| ln_pl _{it} _njrp | .0185131 | .014709 | 1.26 | 0.208 | -.0103159 | .0473422 |
| cons | -4.665242 | .4634549 | -10.07 | 0.000 | -5.573597 | -3.756887 |

4.4 Résultats d'estimation GLS de 1998-2002

Coefficients: generalized least squares

Panels: homoskedastic

Correlation: common AR(1) coefficient for all panels (0.4270)

| | | | | | |
|----------------------------|---|---------|------------------|---|-----------|
| Estimated covariances | = | 1 | Number of obs | = | 40 |
| Estimated autocorrelations | = | 1 | Number of groups | = | 8 |
| Estimated coefficients | = | 6 | Time periods | = | 5 |
| Log likelihood | = | 149.914 | Wald chi2(4) | = | 109104.13 |
| | | | Prob > chi2 | = | 0.0000 |

| ln_v _{it} | Coef. | Std. Err. | z | P> z | [95% Conf. Interval] | |
|---------------------------|-----------|-----------|--------|-------|----------------------|-----------|
| ln_pl _{it} | 1.782379 | .0185069 | 96.31 | 0.000 | 1.746106 | 1.818651 |
| plit_btl _{it} | 5.69e-11 | 3.44e-11 | 1.65 | 0.098 | -1.06e-11 | 1.24e-10 |
| ln_btl _{it} | -.0413454 | .0179993 | -2.30 | 0.022 | -.0766234 | -.0060675 |
| ln_dens _{it} | -.0046821 | .0018142 | -2.58 | 0.010 | -.008238 | -.0011263 |
| ln_pl _{it} _njrp | .0065093 | .0058601 | 1.11 | 0.267 | -.0049763 | .017995 |
| cons | -4.825417 | .3356386 | -14.38 | 0.000 | -5.483257 | -4.167578 |

CODESRIA - BIBLIOTHEQUE