

**DYNAMIQUE DES RESSOURCES ET DE L'UTILISATION
DES COMBUSTIBLES LIGNEUX:
analyse et modélisation dans le cas du Sénégal**

THESE N° 1104 (1992)

PRESENTÉE AU DÉPARTEMENT DE GENIE CIVIL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE FÉDÉRALE DE LAUSANNE

POUR L'OBTENTION DU GRADE DE DOCTEUR ES SCIENCES TECHNIQUES

PAR

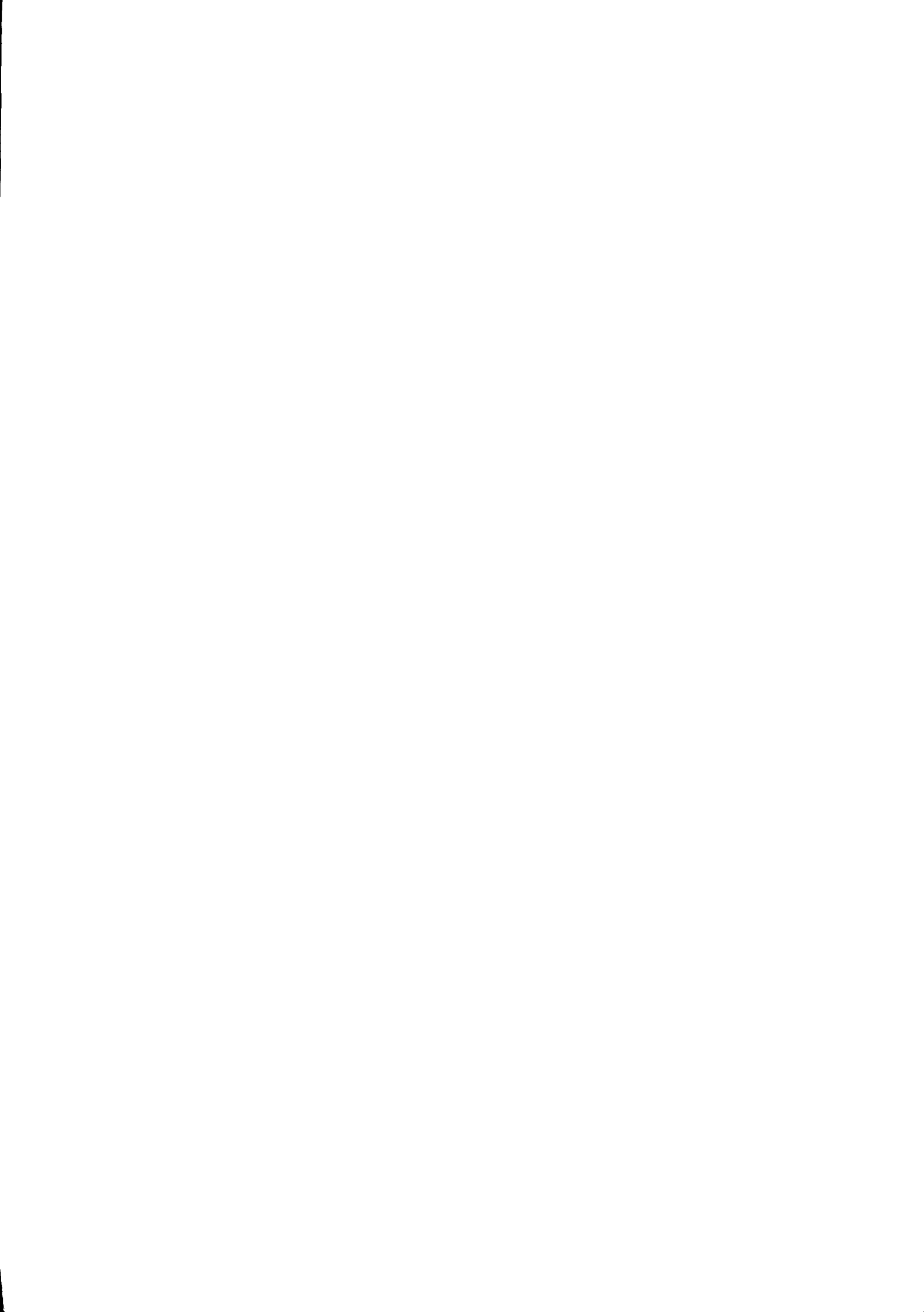
ALI NEUMANN

Ingénieur civil diplômé EPFL
de nationalité allemande

acceptée sur proposition du jury:

Prof. G. Sarios, rapporteur
Prof. J.-Ph. Cueille, corapporteur
Dr E. Gnansounou, corapporteur
Prof. J. Royer, corapporteur
Prof. J.-C. Védý, corapporteur

Lausanne, EPFL
1993



AVANT-PROPOS

Lorsque, en 1988, je fis part à Youba SOKONA¹ de mon intention d'analyser et de modéliser le secteur énergétique des combustibles domestiques au Sénégal, il me répondit que d'autres y avaient songé avant moi, mais avaient abandonné l'idée en raison du manque de données. Il faisait allusion à Jesse C.RIBOT qui s'est finalement décidé à réaliser un travail fondamental d'exploration de la filière de production et de commercialisation du charbon de bois au Sénégal².

Dans mon cas, le problème des données a pu être en grande partie résolu grâce à des enquêtes de grande envergure, organisées dans le cadre du projet MASENS (Méthodes d'Analyse du Système Energétique du Sénégal). Ce projet, dans le cadre duquel s'inscrit l'ensemble de mon travail de recherche, a été cofinancé par la Direction de la coopération au développement et de l'aide humanitaire (DDA, Suisse) et le Fonds National de l'Energie (FNE, Sénégal). Il a vu le jour grâce aux efforts conjugués de trois hommes : El Hadj Babacar CISSE de la SENELEC, qui a malheureusement déjà quitté ce monde, Saloum CISSE, Directeur de l'Energie du Sénégal, et le Professeur Gérard SARLOS, mon directeur de thèse, Directeur du Laboratoire de systèmes énergétiques (LASEN) de l'EPFL.

Dans mon travail, j'ai reçu l'appui de l'équipe de chercheurs et d'experts du LASEN - dont Pierre VERSTRAETE, Edgard GNANSOUNOU et Yi-Bin PENG - qui étaient toujours prêts à me venir en aide pour résoudre de multiples petits problèmes. J'ai également bénéficié de l'extraordinaire compétence, en économétrie et en pédologie respectivement, des Professeurs Jacques ROYER du Centre Universitaire d'Etudes des Problèmes de l'Energie (CUEPE, Genève) et Jean-Claude VEDY, Directeur de la Chaire de Pédologie de l'EPFL (Institut d'aménagement des terres et des eaux). Par ailleurs, la lecture attentive et critique que le Professeur Jean-Ph. CUEILLE (ENSPM, Rueil-Malmaison, France) a bien voulu faire de la première version de cette thèse a contribué à en améliorer significativement la qualité.

Au Sénégal, je dois à l'équipe nombreuse et pluridisciplinaire d'experts mobilisée dans le cadre du projet MASENS une grande partie des connaissances qui m'ont permis de mener à bien mon travail de recherche. Bassirou DIEDHIOU, Directeur de la Production Forestière à la DEFC, aujourd'hui au Comité National du CILSS, Michel DIEME, de la Direction de l'Energie (MIA) ainsi que Libasse BA et Masse LO du Programme Energie de l'ENDA T.-M. m'ont été d'un soutien inestimable.

¹ Directeur du Programme Energie de ENDA T.-M. à Dakar

² RIBOT (1991)

Les secrétaires du LASEN m'ont toujours rendu de très précieux services lorsqu'il s'agissait de taper et de mettre en forme lettres et documents. Je pense notamment à Elisabeth AYER et Barbara TINGUELY, et surtout Birgitte DIALLO, qui a dactylographié la plupart de cette publication, et qui m'a toujours étonné par la très haute qualité de son travail.

Je voudrais mentionner que le mérite de m'avoir mis sur la voie des études universitaires revient à mes parents, Gertraut et Wolfgang NEUMANN. Enfin, je n'oublierai pas ma compagne, Natacha GODEL, qui a partagé avec moi joies et soucis, en acceptant toutes les contraintes que nous a imposé mon travail pendant plusieurs années, et qui m'a prêté main forte pendant ces derniers jours qui ont été les plus pénibles.

Que tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réussite de cette thèse en soient chaleureusement remerciés !

RESUME

Au Sénégal, comme dans la plupart des pays en voie de développement, l'énergie domestique est tirée principalement de la combustion de bois de feu et de charbon de bois. Les prélèvements massifs de ces combustibles dans les formations ligneuses naturelles, associés à divers autres phénomènes, conduisent à une dégradation sévère du patrimoine forestier.

Il est soutenu dans cette thèse que les ressources ligneuses, les producteurs et les consommateurs de combustibles ligneux et l'Etat forment un système dont la dynamique peut être représentée par des lois simples. Un modèle de simulation basé sur ces lois est mis au point pour aider à préparer l'avenir énergétique et forestier du pays. Dans ce modèle, les prélèvements de combustibles commercialisés, qui affectent la dynamique des ressources ligneuses, sont obtenus en équilibrant prix et quantités consommées sur un marché spatial des combustibles domestiques.

La modélisation de la formation des prix dans l'espace permet d'estimer les prix des combustibles ligneux et ceux des combustibles concurrents en fonction, notamment, des quantités consommées. Elle fait intervenir les distances entre localités de production et localités de consommation, qui déterminent les coûts du transport.

La modélisation de la consommation permet d'évaluer les quantités consommées en fonction des prix. Elle est faite par zone et par classe de taille d'agglomération et comporte trois volets : l'évolution de la consommation d'énergie utile, l'évolution des rendements et la substitution entre les combustibles. La substitution entre les combustibles est obtenue par le fait que les parts de différents groupes d'équipements (dans la satisfaction des besoins en énergie utile d'une classe de consommateurs) se rapprochent progressivement de parts d'équilibre à long terme. Ces dernières sont elles-mêmes variables et données par un modèle logistique linéaire en fonction de variables explicatives. L'importance, parmi ces variables explicatives, des prix de l'énergie utile et du standing des ménages est clairement mise en évidence.

En dehors des prélèvements pour la commercialisation, les phénomènes suivants sont simulés au niveau de la dynamique des ressources ligneuses : croissance végétale naturelle (avec baisse de productivité en cas de surexploitation ou de sécheresse), extension des surfaces agricoles, aménagements forestiers, autoravitaillement en combustibles ligneux (par les ménages ruraux).

Les variables de décision, présentes à tous les niveaux du modèle, permettent d'évaluer les effets d'actions isolées ou de stratégies complexes de politique énergétique et forestière, comme l'illustrent quelques résultats de simulations.

ABSTRACT

In Senegal, as in most developing countries, domestic energy, much of which is used for preparing meals, is essentially drawn from fuelwood and charcoal. Extensive woodfelling for energy purposes causes severe damages to natural forests, already badly hit by drought and other types of human mismanagement.

In this dissertation, it is argued that forest resources, wood energy producers, wood energy consumers and the State are part of a system, the dynamics of which can be represented by simple laws. A simulation model based on these laws is put forward as a tool for preparing the country's long term energy and forestry policies. In this model, the quantities of commercial wood fuels consumed, which affect the dynamics of forest resources, are determined by seeking an equilibrium of prices and consumed quantities on a spatial domestic energy market.

The modelisation of price formation over space allows for an estimation of prices as a function of consumed quantities. Price formation is modeled not only for fuelwood and charcoal, but also for the main substitutes. Distances between production sites and consumers play an important role as they determine transport costs.

The modelisation of consumption allows for an estimation of consumed quantities by fuel, as a function of prices. Consumers are classified by zone and type of village or town. Consumption by fuel is a result of energy requirements, stove-efficiencies and interfuel-substitution. Interfuel substitution is achieved by letting the part of each fuel (within the total energy requirements) slowly tend towards long-term equilibrium parts. The long term parts are themselves variables given by a linear logistic model as a function of explanatory variables. The importance of fuel prices and consumer income, within these explanatory variables, is highlighted.

Apart from the extraction of commercialized wood fuels, the following phenomena are among those affecting the dynamics of forest resources in the model : natural vegetation growth (with yield reductions in case of vegetation depletion or drought), forest clearing for agricultural purposes, forest management (including establishment of fuelwood plantations), and extraction of uncommercial fuelwood.

Decision variables, present at all levels of the model, allow for an evaluation of forestry and energy policies. This is shown by some examples of simulation results.

TABLE DES MATIERES

1.	INTRODUCTION	1
1.1	La "Crise du bois de feu"	1
1.2	Motivations et contexte de la présente étude	2
1.3	Les idées maîtresses	3
1.4	Les enquêtes effectuées	4
1.5	Plan de la thèse	5
2.	APERCU GENERAL DU SYSTEME ETUDIE	7
2.1	LA PROBLEMATIQUE DES COMBUSTIBLES LIGNEUX AU SENEGAL	7
2.1.1	La situation énergétique du Sénégal	7
2.1.2	Le déboisement et ses conséquences	13
2.1.3	Les remèdes et leurs inconvénients	20
2.2	MODELISATION DU SYSTEME ENERGETICO-FORESTIER	24
2.2.1	L'intérêt d'une modélisation adaptée	24
2.2.2	La structure et le fonctionnement d'ensemble du modèle proposé	26
3.	LA DYNAMIQUE DES RESSOURCES LIGNEUSES	33
3.1	LES PHENOMENES REGISSANT LA DYNAMIQUE DES RESSOURCES LIGNEUSES	34
3.1.1	Les ressources ligneuses et leur environnement naturel au Sénégal	34
3.1.2	Le cycle forestier annuel	37
3.1.3	Le bois combustible et les autres	40

3.2	MODELISATION DES PHENOMENES "NATURELS" AFFECTANT LA DYNAMIQUE DES RESSOURCES LIGNEUSES	42
3.2.1	Stratification des ressources ligneuses naturelles	42
3.2.2	La croissance végétale naturelle	47
3.2.3	La désertification	57
3.2.4	Les surfaces agricoles : extension et production de bois	59
3.3	MODELISATION DE LA GESTION DES RESSOURCES LIGNEUSES	66
3.3.1	Les variations de statut et d'accessibilité	66
3.3.2	Les aménagements forestiers	67
3.3.3	Les prélèvements pour autoravitaillement	71
3.3.4	Les coupes pour la commercialisation (fraude et quotas)	74
3.4	DEBOISEMENT ET DEGRADATION DES SOLS	79
3.4.1	La dégradation des sols : formes, localisation et liens avec le déboisement	80
3.4.2	Modélisation des conséquences du déboisement au niveau des sols	101
3.4.3	Conclusions sur l'analyse et la modélisation des interactions sols-forêts	107
4.	LES SYSTEMES D'OFFRE	109
4.1	L'OFFRE DES COMBUSTIBLES LIGNEUX	109
4.1.1	La filière bois et charbon de bois	109
4.1.2	La formation des prix dans l'espace	118
4.1.3	Les prix de vente au détail et leur mesure	133
4.1.4	Des relations prix - éloignement à un modèle opérationnel	139
4.2	L'OFFRE DES COMBUSTIBLES DE SUBSTITUTION	152
4.2.1	La politique de butanisation	152
4.2.2	La formation des prix du gaz	156
4.2.3	L'offre des autres sources d'énergie	164

4.3	L'OFFRE, CLE DU MARCHE	168
4.3.1	La compétition spatiale des combustibles	168
4.3.2	Les possibilités d'intervention de l'Etat	174
4.3.3	Conclusions sur l'étude des systèmes d'offre	180
5.	LA DYNAMIQUE DES CONSOMMATIONS	183
5.1	ANALYSE DE LA CONSOMMATION	183
5.1.1	Desagrégation de la consommation	184
5.1.2	La consommation domestique	190
5.1.3	L'autoravitaillement et les marchés locaux	195
5.1.4	Formalisation de la consommation	201
5.2	L'ENERGIE UTILE ET LES RENDEMENTS	203
5.2.1	De l'énergie distribuée à l'énergie utile et aux rendements	203
5.2.2	Les variations de l'énergie utile avec la taille du ménage et le standing	207
5.2.3	Le flou dans les enquêtes-consommateurs	213
5.2.4	L'indépendance entre l'énergie utile et le choix des équipements	215
5.2.5	Les incertitudes sur l'évolution à long terme	218
5.3	LE CHOIX DES EQUIPEMENTS	222
5.3.1	Analyse du processus de choix	222
5.3.2	Le modèle logistique linéaire : application d'un modèle désagrégé au choix à long terme	226
5.3.3	D'un modèle statique à un modèle dynamique	236
5.3.4	Les modèles à vitesse de convergence variable	244
5.3.5	La prise en compte de l'investissement	248
5.3.	Sélection et généralisation d'un modèle	252
5.4	CONCLUSIONS SUR LA DYNAMIQUE DES CONSOMMATIONS	259

6.	LE FONCTIONNEMENT DU MODELE GLOBAL	261
6.1	MISE AU POINT DU MODELE GLOBAL	261
6.1.1	L'intersection offre - consommation	261
6.1.2	Vers une validation du modèle	271
6.2	EXEMPLES D'APPLICATIONS	277
6.2.1	Le scénario de référence	277
6.2.2	Scénarios sur les variables non contrôlées	283
6.2.3	Scénarios sur les variables de décision	289
7.	CONCLUSION GENERALE	297
	BIBLIOGRAPHIE	301
	LISTE DE DOCUMENTS DANS LES ARCHIVES DU PROJET MASENS	309
	LISTE DES SERVICES ET ORGANISATIONS AU SENEGAL	311
	LISTE DES ANNEXES ET ANNEXES	
	CURRICULUM VITAE	

ABREVIATIONS, SIGLES ET NOMS PROPRES

- ABF** : Association Bois de Feu
- Blip Banekh** : Nom du brûleur à gaz commercialisé au Sénégal, qui fonctionne avec des bonbonnes à 2,75 kg de GPL
- CERER** : Centre d'Etudes et de Recherches sur les Energies Renouvelables
- CILSS** : Comité Inter-états de Lutte contre la Sécheresse au Sahel
- CTFT** : Centre Technique Forestier Tropical
- CTS** : Compagnie des Tourbières du Sénégal
- DAT** : Direction de l'Aménagement du Territoire (Ministère de l'Economie et des Finances)
- DEFC** : Direction des Eaux, Forêts et Chasses, MPN.
- ENDA** : Environnement et Développement du Tiers-Monde (ENDA-T.-M.)
- FAO** : Food and Agriculture Organization of the United Nations
- GPL** : Gaz de pétrole liquéfié
- IREF** : Inspection Régionale des Eaux et Forêts (les IREF dépendent de la DEFC)
- MASENS** : Méthodes d'Analyse du Système Energétique du Sénégal (projet de coopération sénégal-suisse EPFL-MDIA).
- MDIA** : Ministère du Développement Industriel et de l'Artisanat (devenu MIA)
- MIA** : Ministère de l'Industrie et de l'Artisanat (anciennement MDIA)
- MPN** : Ministère de la Protection de la Nature
- Nopale** : Nom du brûleur commercialisé au Sénégal, qui fonctionne avec des bonbonnes de 6 kg de GPL
- PNUD** : Programme des Nations Unies pour le Développement
- RUCAV** : Région Urbaine du Cap Vert (Dakar + Pikine)
- SENELEC** : Société Sénégalaise de Distribution d'Energie Electrique
- SAR** : Société Africaine de Raffinage
- USAID** : United States Agency for International Development.

1 INTRODUCTION

1.1 La "Crise du Bois de Feu"

Sous l'influence des hommes, les forêts de nombreuses régions du monde se dégradent, diminuent, disparaissent. Dans les pays du Sahel, les prélèvements massifs et croissants de combustibles ligneux, bois de feu et charbon de bois, sont probablement la cause principale de la dégradation des forêts. Ce déboisement peut avoir des conséquences multiples : pénuries locales de bois ou temps de ramassage prolongés, raréfaction d'arbres d'utilités diverses, dégradation de sols dont les effets ne se limitent pas uniquement au milieu forestier, mais touchent également les terres agricoles, modifications climatiques, et d'autres encore. Bref, il peut engendrer un bouleversement de l'environnement naturel de l'homme qui met en péril, à long terme, la survie même des sociétés humaines. Pourtant, les prélèvements de combustibles ligneux sont nécessaires à la satisfaction d'un besoin élémentaire : la préparation des repas.

Sous le titre de "crise du bois de feu", cette situation a fait l'objet de discours alarmistes dès les années 70. En 1975, ECKHOLM (1975)¹ essayait de sensibiliser les milieux politiques et économiques et l'opinion publique internationale à la gravité du déboisement dans de nombreux pays du Tiers-Monde. Par la suite, CLEMENT et STRASFOGEL (1986) puis SOW (1990) ont publié des ouvrages grand-public qui faisaient une place importante à la situation dans les pays du Sahel.

Dans l'ensemble, les milieux politiques et économiques ont été plutôt lents à réagir. Le Comité Inter-Etats de Lutte contre la Sécheresse dans le Sahel (CILSS), créé en 1973, et le Club du Sahel, créé en 1976 et regroupant des européens, des américains et des sahéliens pour des réflexions communes sur les problèmes du Sahel, se sont rapidement intéressés à la problématique des combustibles ligneux. En revanche, dans le "Plan d'action de Lagos", adopté en 1980 par les chefs des Etats de l'Organisation de l'Unité Africaine, qui visait à définir les fondements d'un développement basé sur "l'autosuffisance collective", la lutte contre le déboisement n'occupait qu'une place marginale (cf. DUHAMEL, 1985). Dans le "Rapport

¹ Les dates entre parenthèses renvoient à la bibliographie.

Berg" de la Banque Mondiale², la question du bois de feu se résumait plus ou moins à une nécessité d'investir massivement dans des plantations d'arbres à croissance rapide.

Depuis, une multitude de moyens pour lutter contre le déboisement ont été inventoriés, et appliqués ici et là. Le Sénégal a été l'un des premiers pays à prendre des décisions politiques de grande portée dans ce domaine, en lançant dès 1974 une campagne à grande échelle pour la substitution du gaz butane au charbon de bois. Mais l'ensemble des décisions prises manquait en général de cohérence.

Un paysan sénégalais de la région de Vélingara me demanda un jour, par interprète interposé : "Pourquoi vient-on nous demander de planter quelques arbres dans le cadre d'un projet de reboisement villageois, alors que l'on laisse les charbonniers³ couper les arbres par centaines dans la forêt voisine ?". Si les mesures prises ou proposées n'étaient grotesques qu'à titre exceptionnel, elles témoignaient en revanche souvent d'un manque de connaissances approfondies du milieu auquel elles devaient s'appliquer. Par exemple, on a longtemps fait l'hypothèse qu'au Sénégal, l'acheminement du charbon de l'intérieur du pays vers Dakar n'était qu'une activité marginale des transporteurs (THIAM, 1984, Banque Mondiale/PNUD, 1989) alors qu'il n'en était rien⁴. On accusait alors certains agents économiques de réaliser d'énormes marges bénéficiaires alors que l'on avait négligé le coût du voyage "aller" des transporteurs dans la structure du prix du charbon⁵.

1.2 Motivations et contexte de la présente étude

La présente étude vise à un approfondissement de nos connaissances dans le domaine de la dynamique des combustibles ligneux au Sénégal. Elle se place dans un contexte de mise au point d'outils d'analyse pour les secteurs énergétiques et forestiers, destinés à faciliter la conception de stratégies énergétiques et forestières.

En 1989, la Banque Mondiale et le PNUD publiaient un rapport sous le titre : "Sénégal, stratégie pour l'énergie domestique urbaine" (op. cit.). La stratégie proposée dans ce rapport est

² "Le développement accéléré en Afrique au Sud du Sahara : programme indicatif d'action", Banque Mondiale, 1981.

³ Ceux qui produisent du charbon pour les besoins des villes.

⁴ Cf. § 4.1.2.

⁵ Cette erreur est citée en raison de son caractère fondamental. Elle n'a pas eu de conséquences majeures au niveau de la politique énergétique, parce que les agents économiques en question passaient pour être extrêmement bien organisés et incontournables.

justifiée sur la base d'un seul bilan offre / demande projeté pour les combustibles ligneux. Or, de nombreux paramètres qui entrent dans le calcul d'un tel bilan sont inconnus ou mal connus : Que deviendrait par exemple le bilan en question si la productivité des savanes arborées du Sénégal Oriental (dont les estimations disponibles ne comportent qu'un seul chiffre significatif !) était en réalité de 50 % plus élevée (ou moins élevée) que la valeur utilisée ?

C'est à des préoccupations de ce genre que répond la mise au point, dans le cadre de cette étude, d'un modèle de simulation de l'avenir énergétique et forestier du pays. Un tel modèle permet non seulement de donner successivement différents ensembles de valeurs à des paramètres mal connus, mais aussi d'évaluer rapidement, sur la base de résultats chiffrés, les effets de différentes actions ou politiques en matière énergétique ou forestière. Il peut ainsi faciliter aux décideurs politiques la recherche d'une stratégie appropriée dans un contexte d'incertitude. L'horizon des simulations se situe dans le moyen et long terme, soit entre quelques années et trois ou quatre dizaines d'années.

Les connaissances nouvelles et les connaissances antérieures sont, dans la mesure du possible, intégrées à l'élaboration du modèle. Elles en constituent le fondement.

1.3 Les idées maîtresses

Dans cette thèse, je soutiens que :

les ressources ligneuses, les producteurs et les consommateurs de combustibles ligneux et l'Etat forment un système dont les relations peuvent être représentées par des lois relativement simples, et que la connaissance de ces lois permet de mieux préparer l'avenir.

Les principales relations identifiées, analysées et modélisées au sein du système énergétique-forestier, comme il sera appelé ci-après, sont les suivantes :

- (1) l'influence des consommations de combustibles domestiques (fonction de leur intensité et de leur structure) sur l'ampleur des prélèvements de combustibles ligneux,
- (2) les liaisons entre les caractéristiques socio-économiques des consommateurs (standing, taille du ménage) et les consommations de combustibles domestiques,
- (3) l'influence des prix des différents agents énergétiques disponibles sur les consommations dans le cas où les combustibles domestiques sont achetés,
- (4) l'influence de la distribution spatiale des ressources, de la distribution spatiale des consommations, et des distances de transport sur les prix des combustibles domestiques,

(5) au niveau des ressources ligneuses :

- la baisse de la productivité avec la surexploitation,
- l'influence des conditions climatiques sur la productivité,
- la régression des surfaces forestières,
- la valorisation des ressources forestières par des travaux d'aménagement,

(6) l'augmentation des risques de dégradation des sols avec le déboisement.

Comme indiqué ci-dessus, les connaissances nouvelles qui se rapportent aux relations gouvernant le système énergéico-forestier peuvent, dans le cadre d'un modèle de simulation, être utilisées pour mieux préparer l'avenir énergétique et forestier du pays. L'utilisation du modèle de simulation développé dans le cadre de cette thèse est illustrée par quelques exemples de simulations.

1.4 Les enquêtes effectuées

La définition des lois qui représentent le fonctionnement du système énergéico-forestier se base non seulement sur des considérations d'ordre technique, mais aussi sur des considérations d'ordre économétrique. En particulier, la modélisation des relations (2), (3) et (4) se base sur l'analyse d'un grand nombre de données, dont certaines ont été spécialement collectées pour cette étude dans le cadre du projet MASENS. En effet, ce projet a permis la réalisation des enquêtes les plus étendues et les plus volumineuses qui aient été effectuées à ce jour au Sénégal au sujet des consommations d'énergie domestique en milieu urbain. Des enquêtes du même type ont été effectuées en milieu rural, et des enquêtes de détermination des prix réels des combustibles ligneux ont été effectuées en milieu urbain.

Les enquêtes ont ainsi touché, entre 1989 et 1991 :

- 7'500 ménages urbains
- 670 ménages ruraux
- 650 échantillons de bois et autant d'échantillons de charbon.

Des résultats d'enquêtes effectuées par le passé ont également pu être exploités⁶. Quelques indications sur la qualité des données recueillies par enquête sont données à l'annexe 1.1.

⁶ Je tiens à remercier à cet endroit la Banque Mondiale, et plus particulièrement Josef LEITMANN, pour la mise à disposition des résultats bruts des enquêtes de 1987, ainsi que ENDA pour la communication des résultats des mesures de prix du charbon à Dakar.

1.5 Plan de la thèse

Cette thèse se compose de cinq chapitres principaux (2 à 6), en dehors de l'introduction (1) et de la conclusion (7).

Le chapitre 2, après un exposé de la problématique des combustibles ligneux au Sénégal, donne un aperçu général du modèle proposé. Le modèle est fondé sur une analyse de l'organisation et de l'évolution du système énergétique-forestier.

Les chapitres 3 à 5 traitent chacun de l'analyse et de la modélisation d'une partie du système : le chapitre 3 concerne les ressources ligneuses et les différents phénomènes qui affectent leur évolution; le chapitre 4 traite de l'offre, donc de la formation des prix et des flux de combustibles domestiques à travers l'espace; et le chapitre 5 de la consommation, donc notamment des réactions des consommateurs aux variations de prix.

Au chapitre 6, les différentes parties du système sont assemblées, et quelques résultats de simulations effectuées avec le modèle global sont présentés. Ces résultats illustrent certaines applications possibles du modèle.

2 APERCU GENERAL DU SYSTEME ETUDIE

Après un exposé de la problématique des combustibles ligneux au Sénégal, la modélisation du système énergéico-forestier et le fonctionnement d'ensemble du modèle proposé sont exposés dans ce chapitre.

2.1 LA PROBLEMATIQUE DES COMBUSTIBLES LIGNEUX AU SENEGAL

La problématique des combustibles ligneux au Sénégal est exposée comme suit :

- l'analyse de la situation énergétique du Sénégal permet de mettre en évidence le fort impact de la consommation domestique de combustibles ligneux sur les ressources forestières du pays;
- un aperçu des multiples et graves conséquences de la dégradation des forêts permet de conclure à la nécessité d'agir;
- un tour d'horizon de différentes actions envisageables pour limiter le déboisement lié aux besoins énergétiques permet de faire ressortir leurs mérites, mais aussi leurs inconvénients.

2.1.1 La situation énergétique du Sénégal

Ce paragraphe commence, en guise d'introduction, par un survol de la situation géographique, climatique, démographique et économique du Sénégal (essentiellement d'après République du Sénégal, 1991). Dans l'exposé de la situation énergétique qui suit, l'accent est mis sur les combustibles domestiques.

Généralités sur le pays

Géographie et climat

Le Sénégal, situé à l'extrême Ouest de l'Afrique occidentale, couvre environ 197 000 km² entre 12°18' et 16°41' de latitude Nord.

La plus grande partie du pays se trouve à moins de 40 m d'altitude. Le relief ne s'accroît que dans les contreforts du Fouta-Djalon, dans le Sud-Est.

Le territoire sénégalais est à cheval sur les zones tropicales sahéliennes, soudaniennes et guinéennes. Les précipitations annuelles moyennes vont de moins de 300 mm au Nord à plus de 1200 mm au Sud. Les pluies tombent quasiment toutes pendant la saison des pluies, entre juillet et octobre.

Démographie

La population du Sénégal était de 6'880'000 habitants en 1988. Compte tenu du taux d'accroissement démographique de près de 3 %, cette population pourrait doubler au cours des 25 prochaines années.

Près de la moitié de la population urbaine sans cesse croissante est concentrée dans l'agglomération de Dakar, qui comptait 1,3 million d'habitants en 1988. Les autres villes importantes sont Thiès (175 000 hab.), Kaolack (152 000 hab.), Saint-Louis (115 000 hab.) et Ziguinchor (124 000 hab.) auxquelles on peut ajouter l'agglomération de Touba (environ 130 000 hab.), capitale du mouridisme⁷.

Les Sénégalais se répartissent entre plusieurs ethnies. Les principales sont : les Wolofs (38 %), les Toucouleurs (13 %), les Sérères (19 %), les Diolas, Bainouks et Balantes (14 %), et les Peulhs (7,5 %).

La religion islamique domine largement (plus de 90 % de la population).

Situation économique

Avec un PIB par habitant de \$ 720 en 1988⁸, le Sénégal présente les caractéristiques structurelles d'un pays en voie de développement.

Le secteur primaire ne fournit que de l'ordre de 20 % du PIB, mais il occupe plus de 80 % de la population active. La production agricole, qui représente environ la moitié du PIB primaire, connaît de fortes variations interannuelles, en raison de sa forte dépendance des conditions météorologiques, et particulièrement des pluies.

Le secteur secondaire reste modeste et concentré dans l'agro-alimentaire. Quant au tertiaire (près de 40 % du PIB), il est dominé par le commerce.

En termes réels, la croissance de la production de biens et services (2,4 %/an entre 1970 et 1987) n'a pas suivi la croissance rapide de la population. En particulier, la production vivrière a

⁷ Les mourides sont une confrérie islamique.

⁸ Bulletin mensuel de statistique, Nations Unies, Vol XLV n°7, juillet 1991.

stagné entre 1977 et 1986 (République du Sénégal, 1987), et des quantités de plus en plus importantes de céréales doivent être importées.

La balance commerciale affiche un déficit chronique. Entre 1986 et 1988, le taux de couverture des importations par les exportations se situait autour de 70 %.

Le Sénégal importe essentiellement des produits manufacturés et semi-finis (23,1 % des importations en 1986⁹), des produits alimentaires, boissons et tabacs (18,9 %), des produits énergétiques et lubrifiants (18,1 %) ainsi que des produits finis pour la consommation (16,5 %) et pour l'équipement et l'industrie (15 %).

Les principaux produits exportés sont les produits de la mer (28,0 % des exportations en 1986), les phosphates et les produits à base de phosphates (20,0 %) et les produits arachidières (11,1 %).

On remarquera le poids important des produits pétroliers dans les importations. Ils constituent la quasi-totalité du poste "produits énergétiques et lubrifiants" ci-dessus. Une grande partie de ces produits pétroliers est réexportée, mais les importations nettes de produits pétroliers représentent néanmoins une fraction importante des exportations. Cette fraction n'était "que" de 11 % en 1986, lorsque les prix du pétrole étaient bas. Elle était de plus de 40 % en 1982, lorsque les prix du pétrole étaient élevés et que la production agricole du Sénégal était fortement touchée par la sécheresse (Banque Mondiale, 1989).

Avant de passer à l'analyse du secteur énergétique, signalons encore que le Sénégal suit depuis le début des années 80 une politique d'ajustement structurel qui lui a permis d'avoir recours au FMI pour le financement d'une grande partie des déficits de la balance des paiements. Cette politique vise à un assainissement des finances publiques et à un redressement économique en cherchant à améliorer les performances des secteurs productifs tout en réduisant les interventions de l'Etat.

Les consommations énergétiques par secteur

Dans le secteur énergétique, le Sénégal doit faire face à deux problèmes majeurs : le premier est celui lié à la consommation élevée et croissante de combustibles ligneux, la "crise du bois de feu". Le second est celui lié au financement des importations de produits pétroliers. Remarquons que ces deux problèmes sont liés dans la mesure où certains produits pétroliers peuvent être substitués aux combustibles ligneux.

⁹ Les chiffres pour 1986 (importations et exportations) sont tirés de BIARNES, 1988.

Les produits pétroliers et les combustibles ligneux sont les deux grands groupes d'agents énergétiques qui apparaissent dans le bilan de l'énergie primaire du Sénégal. Dans le tableau 2.1, la colonne "Electricité" n'est autre que celle des produits pétroliers ayant servi à la production d'électricité.

Agent énergétique Secteur	Combustibles ligneux	Produits pétroliers	Electricité ¹⁾	Total
Industrie	-	7920	6800	14720
Transport	-	6390	-	6390
Pêche	-	3140	-	3140
Secteur public et divers	1700	1910	790	4400
Ménages	43840	1040	2020	46900
Total	45540	20400	9610	75550

1) A base de produits pétroliers

Tableau 2.1 Répartition sectorielle de la consommation d'énergie primaire [TJ] pour 1986
D'après les estimations de la Banque Mondiale (1989)

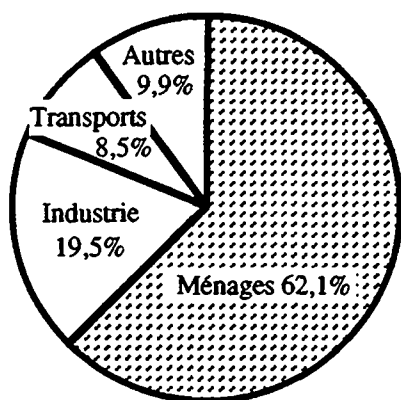


Fig. 2.1 Consommations d'énergie primaire par secteurs

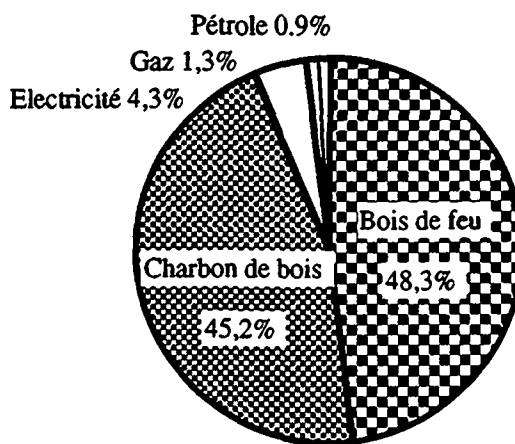


Fig. 2.2 Consommations d'énergie primaire domestique par agent énergétique

Bien que cette répartition ne soit qu'une estimation, elle permet de remarquer les aspects les plus importants de la consommation d'énergie au Sénégal, dont certains ont été mis en évidence dans les figures 2.1 et 2.2 :

- La consommation d'énergie primaire par tête est très basse : environ 12 MJ/hab., soit 370 W/hab.
- Les ménages absorbent la plus grande partie de l'énergie primaire consommée (fig. 2.1).
- Les combustibles ligneux représentent plus de 90 % de l'énergie primaire consommée par les ménages (fig. 2.2).
- Les consommations de charbon de bois sont du même ordre de grandeur que celles de bois.

Bois de feu et charbon de bois jouent donc tous les deux un rôle primordial dans la satisfaction des besoins en énergie des ménages. Par ailleurs, la consommation de combustibles ligneux en dehors des ménages étant très faible¹⁰, on peut dire que la forte consommation de combustibles ligneux est essentiellement un problème d'énergie domestique.

L'énergie domestique

Usage	Bois	Charbon	Electricité	GPL	Kérosène	Total
Cuisine	690	15570	-	440	20	16720
Eclairage	40	-	360 ²⁾	-	90	490
Appareils ménagers	-	-	1290	-	-	1290
Autres ¹⁾	40	1730	140	50	-	1960
Total	770	17300	1790	490	110	20460

1) Chauffage de l'eau sanitaire, repassage au charbon de bois, etc.

2) La part de l'éclairage dans la consommation d'électricité est vraisemblablement sous-estimée. La même source fait état, à un autre endroit, de parts de l'éclairage allant de 40% à plus de 2/3.

Tableau 2.2 Consommation d'énergie domestique primaire [TJ] par usage dans les grandes villes, en 1986

D'après la Banque Mondiale (1989) pour les villes de Dakar, Thiès, Kaolack, Saint-Louis et Ziguinchor

¹⁰ Moins de 4 % d'après le tableau 2.1. Ce chiffre est probablement assez imprécis en raison de manque de données concernant les consommations dans le secteur dit informel (artisanat, artisanat alimentaire, petite manufacture, ...).

Les agents énergétiques utilisés par les ménages se laissent différencier selon les usages qui en sont faits. Comme le fait ressortir le tableau 2.2, le bois de feu, le charbon de bois et le GPL (gaz de pétrole liquéfié) sont essentiellement utilisés dans la cuisine (préparation des aliments et des boissons), alors que l'électricité et le kérosène (ou pétrole lampant) servent essentiellement à l'éclairage et au fonctionnement de certains appareils ménagers autres que des cuisinières.

Cette ventilation de l'énergie domestique sur les usages est indicative. Elle fait cependant ressortir que les agents énergétiques utilisés par les ménages du Sénégal peuvent être divisés en deux groupes : ceux qui servent essentiellement dans la cuisine (bois, charbon, GPL) et ceux qui servent à d'autres usages, et ne sont pratiquement pas utilisés dans la cuisine (électricité, kérosène). Les agents énergétiques du premier groupe seront appelés les "combustibles domestiques" dans la suite de cette étude. Il est clair que le kérosène pourra se joindre aux combustibles domestiques si son utilisation dans la cuisine est favorisée par la politique énergétique. Par contre, en raison de son prix, il est fort peu probable que l'électricité ne devienne, dans les prochaines décennies, un agent énergétique couramment utilisé dans la cuisine au Sénégal.

Etant donné que le potentiel de substitution des combustibles ligneux par l'électricité est très faible, la problématique des combustibles ligneux peut être analysée en considérant uniquement les combustibles domestiques.

En.distr.	Popul° [1000]	Cons°/pers [g/pers.j]			Cons° totale [1000t]		
		bois	char.	gaz	bois	char.	gaz
Dakar	1552	2	163	39	1.2	92.2	22.3
GdesVilles	1082	200	152	17	78.9	59.9	6.6
PtesVilles	443	562	116	13	90.8	18.8	2.0
Villages	4224	909	17	3	1401.9	26.1	5.2
Sénégal	7301	590	74	14	1572.8	197.0	36.1

Notes :

- il n'a pas été tenu compte des usages occasionnels des combustibles ligneux (bois pour cérémonies, consommations supplémentaires en saison froide...)
- Dakar = RUCAV + Bargny; les consommations par personne pour Dakar sont celles de 1989. Il n'a pas été tenu compte des phénomènes de substitution entre 1989 et 1990.
- Pour certaines grandes villes et certaines petites villes, les consommations par personne sont, comme dans le cas de Dakar, celles d'une autre année : 1991.

Tableau 2.3 Combustibles domestiques : énergie distribuée¹¹ par classe de localités
D'après les enquêtes MASENS

¹¹ Energie distribuée (ou énergie finale) : énergie acquise par le consommateur final

Le tableau 2.3 révèle que les consommations par agent des trois principaux combustibles domestiques varient fortement en fonction de la classe de localités considérée. Le gaz (GPL) est consommé en premier lieu par les Dakarois. Les ménages des villes de l'intérieur n'en consomment pratiquement pas. Le charbon est également un combustible urbain, alors que le bois de feu est essentiellement utilisé en milieu rural.

Bois coupé	Popul° [1000]	Cons°/pers [g/pers.j]			Cons° totale [1000t]		
		bois	char.	b + c	bois	char.	b + c
Dakar	1552	2	814	816	1.2	461.2	462.4
GdesVilles	1082	200	758	958	78.9	299.3	378.3
PtesVilles	443	562	582	1144	90.8	94.1	184.9
Villages	4224	909	85	994	1401.9	130.5	1532.4
Sénégal	7301	590	370	960	1572.8	985.2	2558.0

Rendement pondéral de la carbonisation : 20 % (cf. annexe 2.1)

Tableau 2.4 Consommations domestiques de combustibles ligneux par classe de localités, en termes de bois coupé

Le milieu urbain, avec environ 40 % de la population, ne semble consommer qu'une faible partie du poids total des combustibles ligneux. Cependant, en traduisant les consommations de charbon en bois "coupé"¹² (tab. 2.4), on remarque que le milieu urbain est aussi responsable d'environ 40 % des 2,5 millions de tonnes de bois prélevées annuellement dans les forêts du Sénégal, et ce en dépit de sa consommation de gaz relativement élevée¹³.

2.1.2 Le déboisement et ses conséquences

L'importante consommation de combustibles ligneux est essentiellement satisfaite à partir de prélèvements dans les forêts¹⁴ du pays. Elle est à l'origine de déboisements par endroits très importants, mais elle n'est pas la seule cause de la dégradation des forêts : défrichements, feux

¹² Coupé ou ramassé : les villageois, pour leurs propres besoins, coupent rarement du bois vert. Ils préfèrent ramasser du bois mort.

¹³ En termes d'énergie primaire (cf. pouvoirs calorifiques à l'annexe 2.1), le gaz représente près de 30 % de l'énergie consommée à Dakar.

¹⁴ Ce terme désigne des formations végétales productrices de bois d'aspects très différents : les densités de bois sur pied vont de moins de 1 m³/ha à plus de 100 m³/ha.

de brousse, surpâturage et sécheresses s'allient aux prélèvements de bois combustible pour provoquer une grave détérioration de la couverture ligneuse. Cette dégradation de la couverture ligneuse provoque à son tour des modifications dans l'environnement naturel de l'homme, qui devient de plus en plus difficile à vivre.

Des forêts malmenées

Les prélèvements de bois de feu et de charbon de bois

Les prélèvements de bois destinés à la satisfaction des besoins en combustibles ligneux se font par le ramassage du bois mort, par la coupe d'arbres morts, par la coupe de branches d'arbres vivants ou encore par l'abattage d'arbres vivants entiers.

Tant que les prélèvements de bois ne concernent que le bois mort, on ne peut pas parler de déboisement. Tel est généralement le cas lorsque les prélèvements de bois servent uniquement à satisfaire les besoins du milieu rural, et que la densité de la population est relativement faible par rapport à la disponibilité des ressources ligneuses. La dernière condition est encore remplie dans la plus grande partie du milieu rural sénégalais¹⁵, mais, dans presque toutes les forêts accessibles du pays, des prélèvements massifs de combustibles destinés aux villes viennent s'ajouter à la consommation rurale.

Dans le cas où les charbonniers¹⁶, venus produire du charbon pour les besoins des villes, font irruption dans une forêt, ceux-ci ne se contentent généralement pas de couper du bois mort, pour la simple raison qu'il n'y en a pas assez¹⁷. Il y a alors déboisement, puisque la densité de bois sur pied baisse considérablement. Même si les forêts ont le temps de se régénérer à peu près complètement avant le prochain passage de charbonniers, leur densité moyenne (au cours du temps) n'est plus la même que la densité initiale¹⁸.

Rares sont cependant les forêts qui ont le temps de bien se régénérer entre deux passages successifs de charbonniers : des arbres de plus en plus jeunes sont abattus, et les interdictions

¹⁵ Des exceptions importantes existent cependant déjà dans le Nord du Bassin arachidier, où l'usage de déchets et résidus agricoles se généralise (Corps de la Paix, 1982).

¹⁶ Ouvriers ("Sourgha") généralement non originaires du lieu qui produisent du charbon sous le patronage "d'exploitants forestiers" (cf. § 4.1.1).

¹⁷ Même lorsqu'il existe quelques arbres morts, les charbonniers ne s'y attaquent pas volontiers, en raison de la dureté plus grande du bois mort, et au mépris de la législation (observations personnelles dans la vallée de l'Anambé, Sénégal).

¹⁸ En première approximation, elle est réduite de moitié (cf. § 3.2.2).

de couper certaines espèces sont de moins en moins respectées (cf. observations de BERGERET près de Koungheul, dans BERGERET et RIBOT, 1990). Les prélèvements se situent alors bien au-delà de la productivité, et la densité ne cesse de baisser.

Les défrichements pour les besoins de l'agriculture

L'augmentation de la population s'accompagne d'une extension des terres agricoles, qui se fait en général au détriment du milieu forestier. Dans les zones les plus peuplées du Sénégal, comme le centre du Bassin arachidier, les surfaces agricoles couvrent aujourd'hui plus de la moitié du sol. En revanche, dans les zones peu peuplées comme le Sud-Est du Sénégal Oriental, elles n'atteignent pas encore les 10 %¹⁹.

Même si, à long terme, seule une intensification de l'agriculture sera à même de répondre à la forte croissance de la demande de denrées alimentaires (SOW, 1990), il ne fait aucun doute que les pratiques extensives se maintiendront encore dans un avenir assez lointain. Les forêts naturelles continueront donc à être rongées de l'extérieur, comme elles le sont de l'intérieur par les prélèvements de bois ou par le surpâturage, les feux de brousse et la sécheresse, dont quelques mots sont dits ci-après.

Le surpâturage

Le cheptel sénégalais comptait en 1985 quelque 2,6 millions de bovins et 4 millions d'ovins et de caprins, dont la plupart se trouvaient dans les régions de Saint-Louis, du Sénégal Oriental et de Kolda (République du Sénégal, 1987).

Lorsque se suivent quelques années de bons pâturages, le cheptel se multiplie rapidement (+ 18,8 % de bovins entre 1984 et 1985, *ibid.*). Lorsque reviennent des années où les pâturages sont mauvais (en raison du faible volume et de la mauvaise distribution des pluies), le bétail ne trouve plus assez de fourrage à la fin de la saison sèche. Sur les photographies aériennes, on remarque alors clairement que toutes les hautes herbes ont disparu, surtout dans les alentours des points d'eau, signe évident de surpâturage (LE HOUEROU, 1989).

D'un point de vue forestier, on peut dire qu'il y a surpâturage dès que la densité de bétail empêche la forêt de se régénérer convenablement. Une forte densité de bétail gêne en effet la croissance et la régénération des ligneux pour les raisons suivantes :

¹⁹ Cf. annexes 3.1 et 3.3 et carte 2.1.

- Les jeunes plantes de certaines espèces ligneuses sont systématiquement broutées et n'arrivent pas à se développer²⁰.
- Les jeunes plantes de toutes les espèces sont fréquemment piétinées.
- Les feuillages à la portée des museaux sont broutés. Certaines chèvres grimpent même dans les arbres.
- Les pasteurs abattent les cimes de certains arbres pour que leurs bêtes puissent en brouter le feuillage.

Le problème principal vient du broutage des jeunes plantes : les grands arbres vieillissent ou se font couper, et la relève n'est pas assurée. Remarquons aussi que le sur-pâturage peut contribuer dans une large mesure à la dégradation des sols forestiers : non seulement les bêtes détruisent la structure du sol par le piétinement, mais elles lui ôtent la protection contre les phénomènes d'érosion constituée par la strate herbacée. Elles contribuent ainsi indirectement à la dégradation de la végétation dans son ensemble.

Lors des grandes sécheresses, le cheptel est décimé. Il y a ainsi un frein naturel au surpâturage par l'autorégulation des effectifs.

Les feux de brousse

Les feux de brousse ravagent régulièrement les forêts de la zone soudanienne²¹. Lorsque les pluies ont été bonnes, un tapis herbacé dense apparaît à la fin de la saison des pluies. Celui-ci se dessèche ensuite, fournissant la matière combustible qui permet aux feux de se propager. Les feux se développent également en milieu sahélien lorsque la végétation herbacée y est suffisamment dense.

Au niveau de la strate ligneuse, les effets négatifs des feux de brousse se concentrent sur les jeunes plantes, et affectent, comme dans le cas du sur-pâturage, la capacité de régénération de la strate ligneuse (POUPON, 1980). Les effets des feux sont d'autant plus graves que les feux sont tardifs, car la végétation s'assèche avec le temps, après la fin de la saison des pluies (ROOSE, 1981).

²⁰ Exemples : les "buissons" de *Balanites aegyptiaca* qui n'arrivent pas à dépasser les 50 cm de hauteur (observations personnelles dans la région de Niamey, Niger)

²¹ La plus grande partie du territoire sénégalais fait partie de cette zone (cf. carte 3.1, chap. 3).

C'est la raison pour laquelle des feux précoces sont parfois volontairement allumés par les services des Eaux et Forêts. Un autre moyen de lutte contre les feux consiste en la création de réseaux de pare-feux, mais ces pare-feux, probablement trop étroits, sont souvent traversés par les feux²².

Les sécheresses

Le climat sahélien a toujours été marqué par des alternances de périodes sèches et de périodes plus humides s'étalant sur plusieurs années consécutives (ANDERSON et FISHWICK, 1984). Les sécheresses sont donc, partiellement du moins, indépendantes des actions humaines.

Les déficits pluviométriques peuvent avoir des effets désastreux sur la végétation ligneuse, comme en témoignent les observations de POUPON et BILLE dans une steppe au Nord du Sénégal : entre 1972 et 1978, période qui renferme notamment la saison sèche extrême 1972-1973, la population d'Acacia Sénégal du site étudié a été détruite à 85 % ! (POUPON, 1980).

Les prélèvements de bois combustible affectent donc au Sénégal des forêts souvent déjà bien éprouvées par divers autres phénomènes. La liste passée en revue n'est pas exhaustive : les attaques de certains rongeurs (rats, lapins) ou acridiens, par exemple, peuvent lui être ajoutées.

Les conséquences de la dégradation des forêts

La dégradation des forêts a de multiples conséquences. Nous commencerons par la plus évidente, la raréfaction du bois. Nous dirons ensuite quelques mots des autres conséquences que la dégradation des forêts peut avoir pour les premiers concernés, c'est-à-dire les habitants du milieu rural. Nous enchaînerons avec deux groupes de conséquences à plus long terme : la dégradation des sols et les changements climatiques.

La raréfaction du bois

Les conséquences de la raréfaction du bois sont ressenties différemment selon que l'on se trouve en milieu urbain ou en milieu rural.

- En milieu urbain, la raréfaction du bois signifie généralement que les combustibles ligneux doivent être transportés sur des distances de plus en plus longues avant d'arriver chez les consommateurs. Par conséquent, les prix des combustibles ligneux augmentent, et les ménages doivent dépenser davantage pour préparer leurs repas. Certains ménages

²² POUPON (1980) et communications personnelles de Yoro SOW, DEFC, Dakar, janvier 1989.

choisirons de changer de combustible principal (passage du bois au charbon, du charbon au gaz).

- En milieu rural, la raréfaction du bois autour des villages signifie généralement qu'il faut parcourir des distances plus grandes, donc passer plus de temps à la collecte du combustible. Lorsque les ressources ligneuses en viennent à être épuisées, par exemple lorsque les périmètres de collecte de bois de différents villages commencent à se toucher ou à se chevaucher, les villageois sont forcés de recourir à d'autres combustibles. S'ils manquent de moyens financiers pour l'acquisition de combustibles commercialisés, ils ont alors généralement recours aux "déchets" et résidus agricoles : bouses de vache et autres crottins, tiges de mil, etc.

ANDERSON et FISHWICK (1984)²³ décrivent bien le cercle vicieux d'expansion des surfaces agricoles et de dégradation des sols qui peut s'en suivre :

Lorsque tous les cycles naturels d'enrichissement des sols (à travers les arbres, à travers les résidus végétaux et à travers le fumier), sont plus ou moins interrompus, les sols s'appauvrissent et leur protection contre l'érosion diminue. Les rendements agricoles diminuent et les pâturages se dégradent. Il y a alors surpâturage et l'érosion s'accélère. En fin de compte, les paysans doivent abandonner leurs terres, devenues inaptes à l'exploitation, et en chercher de nouvelles - s'il en existe encore.

La perturbation des relations entre les villageois et leur environnement forestier

Dans les sociétés rurales, les forêts ont une multitude de fonctions très importantes, en dehors de celle de ressource en combustible : elles fournissent de nombreux matériaux de construction ou d'artisanat, servent de domaines de chasse; certains grands arbres sont supposés abriter des esprits. Les fruits, feuilles, écorces ou tubercules de nombreux végétaux rencontrés dans la forêt servent à compléter ou à diversifier l'alimentation ou à préparer des produits à usage médical ou vétérinaire. S'agissant de l'appoint alimentaire procuré par certains arbres, BERGERET (1990), qui a fait une étude de terrain dans la région de Koungeul (Sénégal), fait état de stratégies anti-risques raffinées menées par les villageoises sur la base d'un savoir très étendu, destinées à assurer l'alimentation de leurs familles pendant les périodes de soudure²⁴.

La dégradation des forêts, et en particulier le déboisement pour la satisfaction des besoins en combustibles ligneux, met en péril les relations entre les populations rurales et leur

²³ ANDERSON et FISCHWICK citent eux-mêmes une étude détaillée qui aurait été faite par Ken NEWCOMMBER pour l'Éthiopie : "An Economic Justification for Rural Afforestation: the Case of Ethiopia"; Energy Department Paper (Draft), Banque Mondiale, 1983.

²⁴ Période avant les récoltes, lorsque les greniers sont vides ou presque.

environnement forestier. Par exemple, de nombreux arbres utiles se raréfient lorsque l'exploitation des forêts par les charbonniers s'intensifie (op. cit.).

La dégradation des sols

La dégradation des sols, notamment à travers les phénomènes d'érosion hydrique et éolienne, est intensifiée par la dégradation des forêts. Les différents phénomènes de dégradation des sols et leurs liens avec le déboisement seront analysés en détail au chapitre 3. Contentons-nous ici de relever que la dégradation des sols hypothèque gravement les possibilités de régénération des forêts, et de mentionner un effet de la dégradation des sols lui-même lourd de conséquences : l'abaissement des nappes phréatiques, qui fait suite à la réduction de l'infiltration à travers le sol.

Les changements climatiques

S'il ne fait aucun doute que les arbres ont des effets bénéfiques sur le microclimat (augmentation de l'humidité relative, modération de la température, des vents), il est moins facile de mettre en évidence les relations entre les modifications de la couverture ligneuse et l'évolution du climat régional.

L'une des hypothèses souvent faites dans les modèles de circulation atmosphérique fait intervenir les modifications d'albedo à la surface du sol (hyp. de Charney) : la dégradation de la couverture végétale fait augmenter l'albedo, fait baisser la température de l'air près de la surface terrestre²⁵, fait décroître la vitesse d'ascension verticale des vents et supprime les précipitations par convection. Il semble, d'après les résultats de simulations, que des modifications d'albedo sur un carré ayant entre 50 et 250 km de côté peuvent déjà apporter des changements de pluviosité importants (LAVAL, 1986; BERKOFKY, 1986).

Il faudrait examiner si les résultats de tels modèles peuvent être utilisés pour tirer des conclusions sur les pays sahéliens, où les précipitations se produisent lors de l'avancée du front intertropical^{25'}. Signalons en outre que l'albedo du sol n'est pas déterminé par la seule strate ligneuse de la végétation. Toutefois, il est fort probable que le déboisement ait au moins une légère influence négative sur la pluviosité.

Notons finalement encore que le déboisement a des conséquences sur le climat à l'échelle terrestre, liées entre autres au relarguage de CO₂ dans l'atmosphère.

²⁵ La température du sol augmente cependant.

^{25'} Limite d'extension des masses d'air humides venues du Sud-Ouest.

2.1.3 Les remèdes et leurs inconvénients

Comme nous venons de le voir, les conséquences de la dégradation des forêts sont pour le moins graves, sinon catastrophiques. Des moyens pour empêcher un déboisement intense doivent donc impérativement être trouvés pour que les conditions élémentaires de survie des hommes ne soient pas mises en péril à long terme.

Hélas, il n'existe pas de solution qui pourrait délivrer les responsables politiques de tous leurs soucis à ce sujet. Les différentes réponses possibles ont en effet toutes des inconvénients majeurs, comme nous allons le voir, en analysant successivement : les actions visant à augmenter les ressources en bois combustible, les actions visant à faire utiliser plus économiquement les combustibles ligneux et les actions visant à faire se substituer d'autres combustibles aux combustibles ligneux.

Les actions visant à augmenter les ressources ligneuses

Si les prélèvements effectués dans les forêts naturelles sont trop importants, une première solution possible consiste à créer de nouvelles forêts, ou à améliorer la productivité des forêts naturelles. Désignons ces actions par le terme de "reboisements".

Les reboisements permettent de préserver l'environnement tout en assurant une production de combustibles ligneux. La production de combustibles peut par ailleurs s'accompagner de productions de bois d'oeuvre et de bois de service, ce qui améliore généralement la rentabilité économique des reboisements.

Toutefois, les reboisements ont l'inconvénient de coûter très cher en capital et en main-d'oeuvre, quel que soit le degré d'implication des populations rurales :

- Lorsque les reboisements sont de type "communautaire" ou "familial", donc lorsque la participation des villageois à la création et à la gestion des reboisements est importante, ceux-ci doivent investir beaucoup de travail dans la plantation des arbres, l'arrosage, la protection contre les animaux. Par ailleurs, dans les régions densément peuplées, les reboisements entrent en compétition pour la terre avec les activités agricoles et d'élevage, qui ne peuvent leur être associées que dans une certaine mesure. Par conséquent, les populations rurales sont souvent très réticentes à se lancer dans les activités de reboisement. On les comprend d'autant mieux que les prix actuels du bois en milieu rural sont généralement encore très bas, et que l'investissement dans des travaux de reboisement ne peut porter de fruits qu'à long terme (d'après République du Sénégal, 1990a).

- Lorsque les reboisements sont faits en régie, le problème de l'intéressement des populations rurales ne se pose pas. Par contre, des moyens financiers très importants (300 000 à 600 000 FCFA/ha, pour des productivités ne dépassant guère 5 m³/ha.an, d'après SOW, 1990) sont nécessaires pour réaliser des plantations. C'est la raison essentielle pour laquelle les plantations forestières n'ont pas connu un essor rapide au Sénégal : de 1985 à 1989, la surface reboisée annuellement a stagné autour de 20 000 ha. Les actions d'aménagement des forêts naturelles, entreprises en vue d'améliorer la productivité de ces dernières, sont moins onéreuses (SCHAM, 1985). Cependant, elles doivent encore faire leurs preuves.

Que les reboisements soient faits en régie ou avec une forte implication paysanne, ils ne semblent donc pas pouvoir toucher de très grandes superficies dans les années à venir. Remarquons qu'une augmentation des prix du bois des forêts naturelles favoriserait l'attrait économique des reboisements. Cependant, une forte augmentation des taxes sur les combustibles ligneux est une opération délicate : d'une part elle suppose que les milieux politiques soient prêts à augmenter les prix des produits de première nécessité que sont les combustibles ligneux, et à affronter le mécontentement des consommateurs qui s'ensuivrait, d'autre part, elle doit être accompagnée d'une surveillance plus stricte des forêts pour maîtriser la fraude fiscale.

Les actions destinées à faire économiser du bois

Lors du prélèvement des combustibles ligneux dans les forêts comme lors de leur utilisation par les ménages, d'importantes pertes d'énergie se produisent. Les principales actions menées au Sénégal dans le but de réduire ces pertes concernent les techniques de carbonisation et les foyers de combustion. Elles n'ont eu jusqu'à présent qu'un succès limité.

La diffusion de la Meule Casamançaise

Depuis 1981, la DEFC essaye de diffuser, avec l'aide de l'USAID, une technique de carbonisation améliorée en meule dite "Casamançaise", qui permettrait de faire passer le rendement de la carbonisation de 20 % à 25 ou 30 %. Cependant, la diffusion "se fait très difficilement" (République du Sénégal, 1990a). Nous y reviendrons au paragraphe 4.3.2.

La diffusion des foyers améliorés

Dans un premier temps, les actions de diffusion de foyers améliorés ont visé le milieu rural, avec le programme de cuisinières Ban ak Suuf, fabriquées à base d'argile et de sable. Puis, le CERER a mis au point des foyers métalliques Sakkanal à bois et à charbon de bois pour le

milieu urbain. Ces foyers et cuisinières permettraient d'économiser de l'ordre de 30 % de combustible²⁶.

Les enquêtes MASENS ont révélé des taux de pénétration encore assez faibles pour les foyers améliorés : 8 % pour le Ban ak Suuf en milieu rural (cf. tab. 5.2, § 5.1.3) et 9 % pour les Sakkanal à Dakar. Alors que le programme de diffusion des Ban ak Suuf, jugé moins important que celui des Sakkanal, a été mis en veilleuse, la diffusion des foyers améliorés en milieu urbain se heurte aux difficultés suivantes (d'après LAURA, 1990) :

- nombre insuffisant d'artisans formés à la production des foyers
- approvisionnement discontinu des artisans en matières premières
- absence de circuits de commercialisation
- intérêt limité des ménagères
- montant du prix d'achat difficile à réunir.

La méthode de carbonisation améliorée et les foyers améliorés permettraient, s'ils étaient massivement diffusés, de faire économiser des quantités importantes de combustible. A eux seuls, ils ne pourraient cependant que procurer un répit aux forêts, étant donné l'augmentation rapide des besoins avec les phénomènes démographiques (accroissement de la population et migrations).

Les actions visant à favoriser les substitutions entre combustibles

Le Sénégal mène depuis 1974 une politique de "butanisation", de substitution de GPL aux combustibles ligneux (essentiellement au charbon de bois). Nous reviendrons plus en détail sur la mise en oeuvre de cette politique (chap. 4) et sur les résultats obtenus jusqu'ici chez les consommateurs (chap. 5). Notons simplement ici que :

- (1) Les consommateurs ont été lents à adopter le gaz comme combustible (environ 30 % des besoins satisfaits à partir des GPL en 1989 à Dakar).
- (2) Le GPL, ou le pétrole servant à le produire, étant importé, l'augmentation de la consommation de gaz charge la balance des paiements, qui souffre déjà fortement de l'importation de produits pétroliers.

Tout autre agent énergétique importé changerait aussi la balance des paiements. En revanche, l'équivalent de l'inconvénient (1) ne s'appliquerait pas en cas de substitution de combustibles ligneux importés aux combustibles ligneux nationaux.

²⁶ Pour les Ban ak Suuf : cf. LAURA, 1990; pour les foyers Sakkanal : cf. tab. 5.3, § 5.2.1.

Pour ce qui est des sources d'énergie de substitution nationales, elles sont disponibles en quantités plutôt faibles (biogaz, gisement de tourbe des Niayes) ou inadaptées - dans l'état actuel des technologies - aux besoins de la majorité des consommateurs (énergie solaire). Par ailleurs, elles ont des problèmes de compétitivité.

2.2 MODELISATION DU SYSTEME ENERGETICO-FORESTIER

2.2.1 L'intérêt d'une modélisation adaptée

Comme nous venons de le voir, les solutions possibles au problème du déboisement ont toutes des inconvénients majeurs : certaines coûtent cher, à court terme, à la société (importations de combustibles de substitution, reboisements massifs), d'autres ne peuvent apporter qu'un soulagement temporaire (méthodes de carbonisation améliorées, foyers améliorés, exploitation des ressources nationales de tourbe), et la plupart ne peuvent changer la situation qu'à long terme. Il n'existe donc pas de solution simple pour mettre à l'écart les risques qu'entraînent avec eux les forts prélèvements de combustibles ligneux. Or ces risques, bien que difficiles à évaluer, semblent être importants.

Les pouvoirs publics se trouvent par conséquent confrontés à deux questions auxquelles il n'est pas facile de répondre : "Qu'est-ce qui risque d'arriver ?" et "Que devrions-nous faire ?". Dans ce contexte, l'utilité d'un modèle de simulation de l'avenir énergétique et forestier du pays devient évidente. Un tel modèle peut en effet aider les décideurs politiques en leur donnant une image quantifiée de l'évolution future des systèmes énergétiques et forestiers, pour différentes stratégies en matière énergétique et forestière, et pour divers scénarios faits au sujet de l'évolution de certains paramètres mal connus, voire stochastiques.

La modélisation présentée ci-dessous a pour objectif de donner une représentation de l'évolution à long terme (plusieurs dizaines d'années) de la situation énergétique et forestière du pays en évaluant :

- les états futurs des ressources ligneuses, et plus particulièrement des forêts naturelles
- les consommations par agent énergétique, pour différents groupes de consommateurs (selon leur localisation et leur situation sociale)
- les moyens par lesquels les consommateurs sont satisfaits (transformations énergétiques, transports, équipements de consommation).

L'approche méthodologique choisie permet de tenir compte de la diversité des phénomènes et de la multitude des paramètres qui influencent les résultats recherchés :

- Elle est analytique et non globale. Elle vise à approcher la réalité grâce à un mécanisme cohérent de décomposition du système.
- Elle est prospective plutôt que tendancielle. Elle vise à établir des liens entre le présent et des états futurs possibles et désirables. Elle suppose donc une attitude normative de la part de l'utilisateur du modèle.
- Les modèles mathématiques formels utilisés servent à la simulation et non à l'optimisation.
- Enfin, elle est systémique, c'est-à-dire qu'elle vise à intégrer tous les éléments qui ont une influence importante sur la partie de la réalité étudiée, et à représenter en détail les phénomènes réels.

Cette méthodologie est proche de celle qui est à la base des modèles MEDEE-S²⁷ et LEAP²⁸, deux outils d'aide à la décision en matière de politique énergétique qui ont été développés pour les besoins de pays du Tiers-Monde, et qui ont déjà connu de nombreuses applications.

MEDEE-S, un modèle comptable pour le secteur énergétique, permet d'évaluer des demandes futures d'énergie à un niveau désagrégé (par classe de consommateurs et par usage). Il ne fait cependant pas intervenir l'offre, et en particulier il ne fait pas apparaître l'évolution des ressources ligneuses.

LEAP fait, en revanche, apparaître l'évolution des ressources ligneuses sur la base d'un découpage assez fin de l'espace (zones écologiques, utilisation du sol). L'évolution des ressources ligneuses est affectée par la demande et le système de transformation de l'énergie. Par contre, l'évolution des ressources ligneuses n'affecte pas la consommation. Les calculs sont donc séquentiels : demande → transformation → ressources.

Pourtant, les consommations ne sont jamais indépendantes de l'offre. Dans le cas des consommations de combustibles ligneux au Sénégal, lorsque les consommateurs vont chercher eux-mêmes leur combustible dans les forêts voisines, il est évident que les consommations seront limitées par le bois disponible. Lorsque les consommateurs achètent leurs combustibles, et qu'ils ont le choix entre plusieurs agents énergétiques, leurs choix seront influencés par les prix. Les prix dépendent à leur tour des distances sur lesquelles les combustibles doivent être transportés, donc, pour les combustibles ligneux, de l'évolution des ressources ligneuses. Une

²⁷ "Modèle d'Evaluation de la Demande d'Énergie dans les pays du Sud". Ce modèle a été mis au point par l'Institut Économique et Juridique de l'Énergie (IEJE, Grenoble). Pour une description, voir LAPILLONE (1984).

²⁸ "LDC (Least Developed Countries) Energy Alternatives Planning". Ce modèle a été développé au Beijer Institute, Stockholm. Pour une description, voir RASKIN (1986).

dépendance de la consommation vis-à-vis de l'évolution des ressources ligneuses vient donc se greffer par-dessus la dépendance de l'évolution des ressources ligneuses vis-à-vis de la consommation.

La plus grande originalité du modèle qui sera présenté ci-dessous, réside certainement dans la prise en compte de ces interactions entre la consommation et l'offre, notamment au niveau du marché des combustibles domestiques, grâce à la mise en évidence de relations formelles qui peuvent être utilisées pour relier les consommations aux caractéristiques de l'offre et vice-versa.

2.2.2 La structure et le fonctionnement d'ensemble du modèle proposé

La représentation du système énergétique-forestier

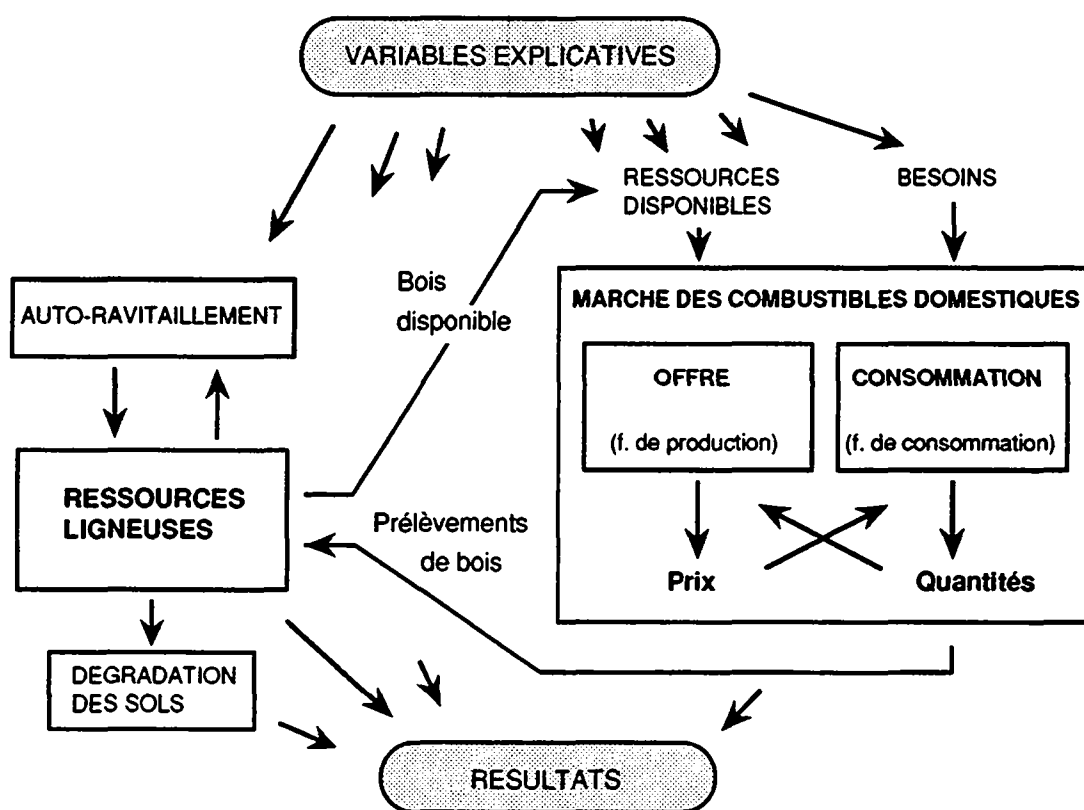


Fig. 2.3 Schéma d'ensemble du système énergétique-forestier

Le système énergétique-forestier, tel qu'il est modélisé, est représenté à la figure 2.3. Les cadres y représentent des parties du système alors que les flèches schématisent les relations de

dépendance. Aux parties du système correspondent, dans le modèle, des modules, alors que les relations sont formalisées. Examinons les différents modules et leurs relations réciproques en remontant le cheminement des combustibles ligneux depuis les consommateurs jusqu'à leur source.

La raison d'être de toute consommation d'énergie est un besoin d'énergie, que l'on peut exprimer en termes d'énergie utile²⁹ par ménage. La consommation d'énergie utile d'un ménage dépend entre autres de la taille (du nombre de personnes) et du standing du ménage, qui sont par conséquent des variables explicatives de la consommation.

Les ménages, et non les individus, sont les cellules de base de la consommation domestique d'énergie : dans chaque ménage, la préparation du repas se fait pour tous les membres du ménage en même temps. C'est pourquoi le terme de "consommateurs" désignera par la suite les ménages.

Les consommateurs peuvent être classés en deux catégories selon leur mode d'approvisionnement en combustibles ligneux : ceux qui pratiquent l'auto-ravitaillement et ceux qui achètent leurs combustibles³⁰.

- L'auto-ravitaillement est la règle en milieu rural. On ne peut guère empêcher les villageois, au moyen d'une quelconque législation, de ramasser du bois dans les forêts qui entourent leur village. Seules des distances à parcourir trop grandes ou une raréfaction générale du bois peuvent les amener à se tourner vers d'autres combustibles ou les inciter à recourir à des foyers améliorés. Etant donné que l'évolution des distances village-forêt et l'effet de ces distances sur la consommation sont difficilement modélisables, la ventilation des consommations rurales d'énergie utile sur les équipements et les agents énergétiques utilisés devra être exogène. A partir de là, les prélèvements opérés par les ménages auto-ravitaillés sur les ressources ligneuses pourront être évalués par le module de l'auto-ravitaillement.
- Dans le cas des consommateurs achetant leurs combustibles domestiques, le choix des équipements et des agents énergétiques se laisse plus facilement modéliser. A partir des consommations d'énergie utile, du choix des équipements, des rendements des équipements et des pouvoirs calorifiques, le module de la consommation (du marché) détermine les quantités consommées par agent énergétique (en termes de masse ou de

²⁹ Les principaux concepts utilisés ici seront définis de façon précise dans les chapitres suivants. L'objectif de ce paragraphe est de donner une idée générale du fonctionnement du modèle.

³⁰ Les consommateurs qui s'approvisionnent sur des marchés locaux, pour lesquels la formation des prix n'a pas pu être modélisée, seront par la suite assimilés à des ménages auto-ravitaillés (§ 4.1.4).

volume) par les ménages. Ces quantités sont ensuite majorées, par addition de quantités exogènes, pour tenir compte des consommations des autres secteurs économiques.

A partir de quelques réflexions sur le comportement des consommateurs et à partir des données disponibles, on peut montrer que le choix des équipements dépend des prix des agents (ou vecteurs) énergétiques. C'est pourquoi ces prix figurent parmi les variables explicatives de la consommation.

- Les prix des agents énergétiques sont des variables endogènes, déterminées par le module de l'offre. En fait, il existe pour chaque combustible, dans ce module, un modèle indépendant de l'offre, comme il existe dans la réalité pour chaque combustible un système d'offre indépendant. Les deux combustibles ligneux, bois de feu et charbon de bois, forment, à cet égard, une exception : leurs systèmes d'offre sont alimentés par les mêmes ressources et doivent, par conséquent, être modélisés conjointement.

Une autre particularité des combustibles ligneux est que leurs prix dépendent fortement des quantités consommées : si la consommation de combustibles ligneux est très élevée, les ressources ligneuses disponibles dans le voisinage ne suffisent plus, et les combustibles doivent être acheminés depuis des localités de production plus éloignées, ce qui, en règle générale, fait monter leurs prix. En effet, le coût du transport est une composante importante du prix de vente au détail lorsque les distances sont grandes³¹. Même dans des zones bien fournies en ressources ligneuses, le contingentement de la production imposé par l'Etat peut avoir pour effet un épuisement des quantités disponibles locales. Le module de l'offre détermine aussi les flux de combustibles à travers l'espace, dont la formation va de pair avec celle des prix.

- La formation des prix dépend donc des quantités consommées (module de l'offre) alors que, en même temps, les quantités consommées sont influencées par les prix (module de la consommation). Prix et quantités consommées doivent donc correspondre les uns aux autres, être "en équilibre" pour chaque période pour laquelle ils sont déterminés, c'est-à-dire chaque année³². Nous désignerons par "point de fonctionnement du marché" l'ensemble des moyennes annuelles des prix et des quantités qui satisfont cette exigence.

³¹ En termes de dépenses énergétiques, le "coût" du transport reste cependant faible : de l'ordre de 2 à 3% de la valeur énergétique du charbon transporté. Pour un camion transportant 15 tonnes de charbon (30 MJ/Kg) sur 600 km (aller simple), consommant 30 l de diesel (30 MJ/l) par 100 km, le ratio de l'énergie consommée s'établit comme suit :

$$[2 \cdot 600 \text{ km} \cdot (30 \text{ l} / 100 \text{ km}) \cdot 30 \text{ MJ} / \text{l}] / [15000 \text{ Kg} \cdot 30 \text{ MJ} / \text{Kg}] = 2,6 \%$$

³² Les fonctions d'offre et de consommation développées ne s'appliquent pas au court terme (moins d'une année). Par exemple, les consommations peuvent à court terme s'écarter des quantités d'équilibre en raison de leur plus forte inélasticité à court terme vis-à-vis des prix.

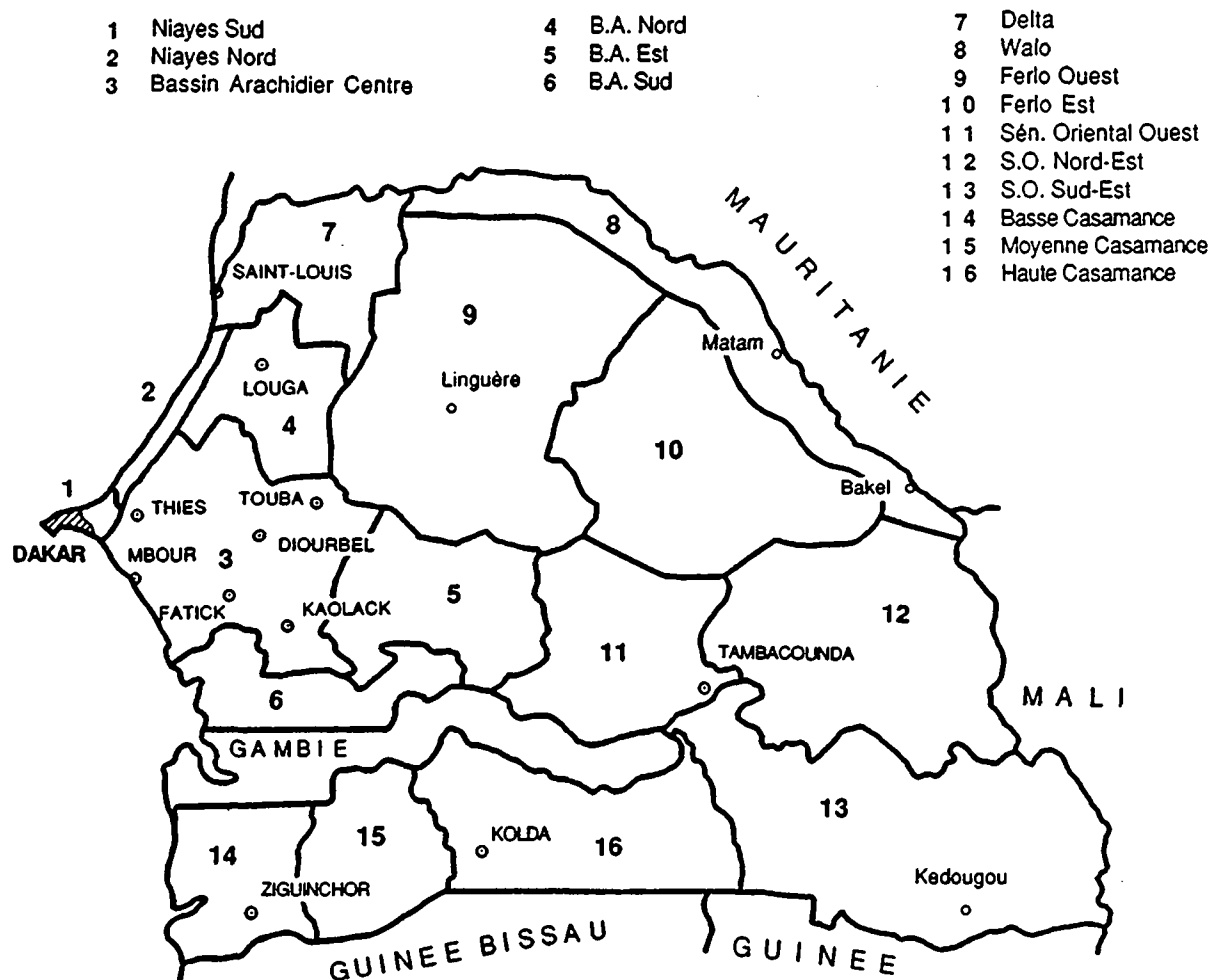
Le module qui détermine le point de fonctionnement du marché en faisant intervenir les modules d'offre et de consommation est celui du "marché des combustibles domestiques".

- L'évolution des ressources ligneuses dépend entre autres des prélèvements de combustibles ligneux. Ceux-ci résultent des prélèvements pour la consommation locale et des flux de combustibles à travers l'espace. Les quantités prélevées sont fournies au module de l'évolution des ressources ligneuses par le module de l'auto-ravitaillement (quantités prélevées par auto-ravitaillement) et par le marché (quantités commercialisées). Outre les prélèvements de bois combustible, les phénomènes de croissance végétale naturelle, de désertification, d'expansion et de production de bois des surfaces agricoles, de développement et de production des forêts aménagées sont représentés par ce module. Pour sa part, le module de l'évolution des ressources ligneuses fournit à celui de l'offre les quantités de combustible disponibles pour la commercialisation (bois et charbon confondus, exprimés en termes de bois équivalent).

Les calculs du modèle se font à un rythme annuel, c'est-à-dire une fois pour chaque année simulée, à partir d'une année initiale: nous reviendrons au chapitre 6 sur la recherche du point de fonctionnement du marché. Les calculs se font par ailleurs sur la base d'un découpage de l'espace en zones et de l'ensemble des consommateurs d'une zone en classes de taille d'agglomération. Ces découpages sont présentés ci-dessous.

Le découpage de l'espace en zones

L'objectif du découpage de l'espace en zones est de structurer l'espace en fonction du comportement régional des consommateurs, en fonction des caractéristiques de l'offre (disponibilité des combustibles et prix), et en fonction de certains paramètres qui influencent l'évolution des ressources ligneuses (pression à laquelle elles sont soumises par les prélèvements de combustibles, conditions climatiques, vitesses d'expansion des surfaces agricoles, etc.).



Carte 2.1 Le découpage du Sénégal en zones

Un découpage du Sénégal répondant à ces exigences a été réalisé à Dakar par un groupe de travail dans le cadre du projet MASENS³⁴. Ce découpage est représenté sur la carte 2.1.

La discrétisation du marché : la prise en compte des classes de taille d'agglomération

Le découpage de l'espace en zones est encore insuffisant pour représenter convenablement le marché des combustibles domestiques. C'est pourquoi nous adopterons un critère de stratification supplémentaire : la taille d'agglomération. A l'intérieur d'une classe de taille

³⁴ cf. document 12

d'agglomération les prix des combustibles, tout comme le comportement des consommateurs, atteignent une plus grande homogénéité :

- les prix des combustibles dépendent des distances sur lesquelles se fait leur transport. Or, pour une grande ville, la distance parcourue par les combustibles ligneux de la zone même seront en général plus grandes que pour une petite ville. En revanche, lorsqu'il s'agit de combustibles de substitution (gaz, pétrole) ou de combustibles ligneux provenant d'une autre zone, les grandes villes seront avantagées.
- le comportement des consommateurs varie aussi - à prix égaux - avec la taille de l'agglomération. L'habitat, la distribution des revenus monétaires, le jugement sur le caractère plus ou moins "moderne" des combustibles ou l'ouverture à la publicité véhiculée par les médias sont autant de caractéristiques des consommateurs qui influencent les comportements énergétiques et qui sont liées à la taille de l'agglomération.

Pour simplifier le vocabulaire, désignons par "localité de consommation" une classe de taille d'agglomération d'une zone. Au point de fonctionnement du marché, les quantités consommées doivent correspondre aux prix dans chaque localité de consommation, alors que les prix de chaque combustible doivent correspondre, globalement, aux quantités consommées dans l'ensemble des localités de consommation. En notant y_{vj} la consommation et p_{vj} le prix d'un combustible v dans une localité de consommation j , nous pouvons écrire :

$$\begin{aligned} (y_{1j}, \dots, y_{vj}, \dots) &= f_j (p_{1j}, \dots, p_{vj}, \dots) \\ (p_{v1}, \dots, p_{vj}, \dots) &= g_v (y_{v1}, \dots, y_{vj}, \dots) \end{aligned}$$

f_j est la fonction de consommation en j et g_v est la fonction de production du combustible v . L'indice du temps a été omis, les calculs étant supposés se rapporter à une seule année.

Bien entendu, il ne faut pas s'attendre à pouvoir trouver une formulation explicite des fonctions f et g , et encore moins à pouvoir résoudre le système d'équations ci-dessus. Notre objectif sera de trouver une méthode permettant d'approcher les valeurs numériques des y_{vj} et p_{vj} (chap. 6) après avoir défini les fonctions de consommation (chap. 5) et de production (chap. 4). Nous commencerons cependant par étudier la dynamique des ressources ligneuses dans son ensemble, qui se trouve au centre de nos préoccupations.

3 LA DYNAMIQUE DES RESSOURCES LIGNEUSES

Toutes les données relatives à la productivité des formations ligneuses sénégalaises se résument à quelques estimations grossières de productivités moyennes par genre de formation ligneuse (CTFT, 1981), elles-mêmes fondées essentiellement sur les deux seules mesures rapportées par GIFFARD en 1974. Dans ce contexte, de sérieuses réserves doivent être faites sur toute prévision de l'évolution future des ressources ligneuses. Même si les chiffres disponibles étaient de bonnes estimations des productivités moyennes pour la période à laquelle ils se réfèrent, les prévisions ne seraient dignes de confiance que si la pluviométrie restait inchangée, s'il n'y avait pas de désertification de certaines surfaces, s'il n'y avait pas baisse de productivité par surexploitation, etc.

La modélisation présentée aux sections 3.2 et 3.3 ci-après a pour objectif la mise au point d'un modèle de simulation qui, à l'aide d'un nombre réduit de variables exogènes dont la signification doit être aussi transparente que possible, permette de représenter la réaction des ressources ligneuses aux différents phénomènes qui affectent leur dynamique, que l'ampleur de ces phénomènes soit prévisible ou non. Pour atteindre cet objectif, les mécanismes des phénomènes en question sont étudiés de près et les relations qui, à l'intérieur du modèle, relient les variables exogènes aux principaux résultats, sont conçues de sorte à représenter au mieux ces mécanismes. Pour ne pas charger l'exposé, les calculs effectués par le modèle sont décrits, mais les équations correspondantes ne sont données que dans certains cas où elles facilitent réellement la compréhension.

Après la modélisation des sections 3.2 (phénomènes indépendants des besoins en énergie) et 3.3 (détermination des quantités disponibles pour la commercialisation et modélisation des phénomènes liés aux besoins en énergie), la section 3.4 sera consacrée à l'une des principales conséquences du déboisement : la dégradation des sols. Une méthode sera proposée pour évaluer quantitativement, au niveau pédologique, les conséquences d'un scénario d'évolution des ressources ligneuses.

3.1 LES PHENOMENES REGISSANT LA DYNAMIQUE DES RESSOURCES LIGNEUSES

Dans cette section, après un paragraphe introductif sur la végétation du Sénégal, le point sera fait sur les principaux phénomènes qui régissent la dynamique des ressources ligneuses, et sur l'ordre dans lequel ils doivent être représentés. Les coupes de bois d'oeuvre et de service feront l'objet du paragraphe 3.1.3 où il sera montré pourquoi la dynamique des ressources ligneuses peut être représentée indépendamment de ces dernières.

3.1.1 Les ressources ligneuses et leur environnement naturel au Sénégal

L'importance des ressources ligneuses naturelles

Trois types de ressources ligneuses peuvent être distinguées au Sénégal :

- les ressources ligneuses naturelles
- les forêts aménagées
- les terres de culture et de jachère

Celles du premier type sont des formations végétales dont les arbres n'ont pas été plantés. Leur gestion se limite généralement à l'exploitation ou à certaines mesures de protection : protection contre les feux, le pâturage, le défrichage, l'exploitation.

Celles du deuxième type ont fait l'objet de travaux de reboisement et de restauration des sols. Leurs surfaces ont fortement progressé au cours de la dernière décennie, mais la superficie totale aménagée n'atteignait malgré cela que 176 000 ha fin 1989 (Rép. du Sénégal, 1990b).

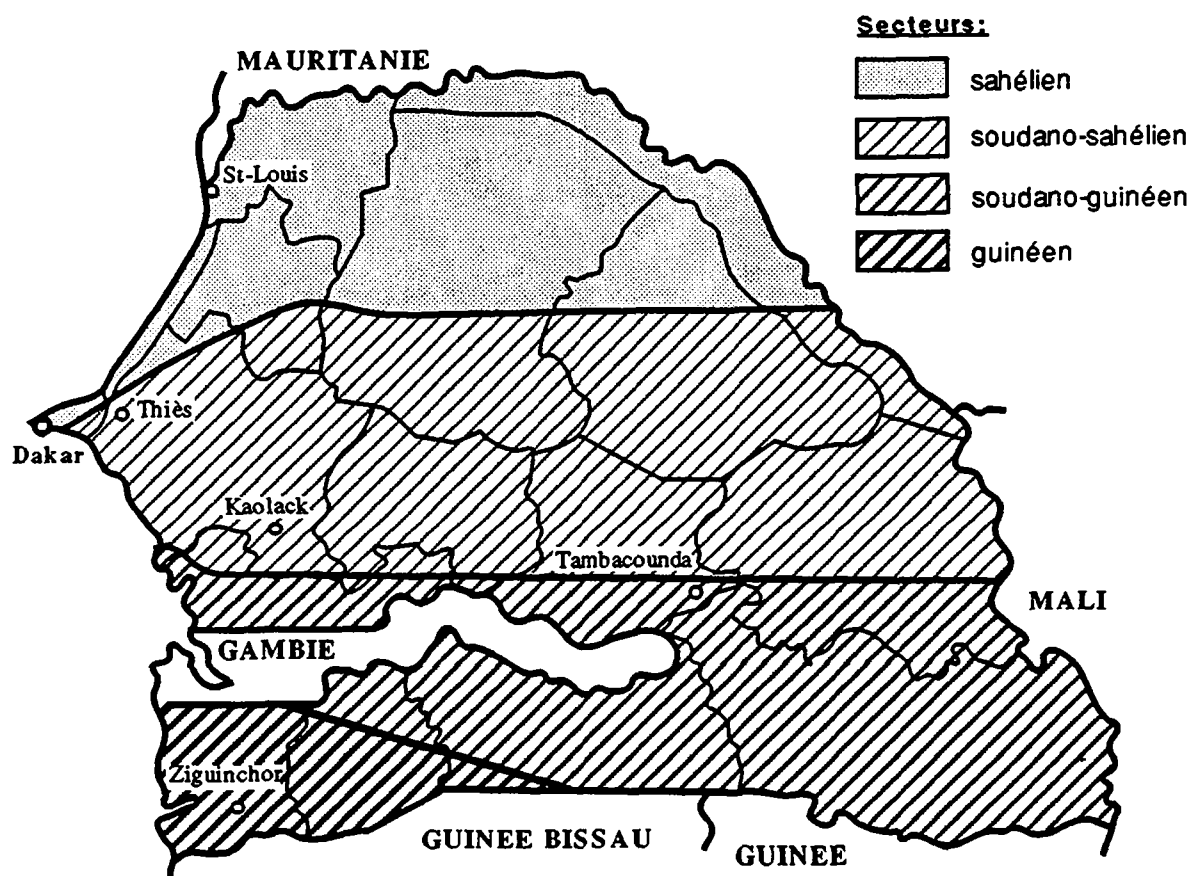
Ce chiffre est très faible en comparaison avec la surface totale couverte par les ressources ligneuses naturelles, qui était de l'ordre de 13 800 000 ha en 1980, d'après le Plan Directeur de Développement Forestier du Sénégal (CTFT, 1981).

Par ailleurs, les ressources ligneuses naturelles sont actuellement, et de loin, la principale source d'approvisionnement en bois et charbon du marché des combustibles domestiques. L'essentiel de l'analyse qui va suivre se concentrera donc sur celles-ci; nous ne reviendrons aux forêts aménagées qu'au paragraphe 3.3.2, et aux terres de culture et de jachère qu'au paragraphe 3.2.4.

L'inégale répartition spatiale

La répartition spatiale des ressources ligneuses naturelles est très inégale, en raison d'une part de l'influence de l'homme, et en raison d'autre part de la disparité des conditions naturelles. Parmi ces conditions naturelles, la pluviosité a une influence très importante. Elle a donné naissance à la distinction des grands ensembles phytogéographiques représentés à la carte 3.1.

La brève description des secteurs qui est donnée ici est basée essentiellement sur les indications du Plan Directeur de Développement Forestier (CTFT, 1981) et sur la cartographie des ressources naturelles du Sénégal (USAID, 1984)



Carte 3.1 Les secteurs phytogéographiques du Sénégal.

D'après THIAM (1984) et Rép. du Sénégal (1990b)

- Dans le secteur sahélien, au Nord du pays, les précipitations annuelles sont inférieures à 500 mm. La formation végétale dominante est du type steppe arborée arbustive composée essentiellement d'arbustes. La densité de couverture de la strate arborée y est inférieure à 5 %. On rencontre aussi des steppes arborées dans lesquelles la strate arborée domine, mais la densité du couvert reste inférieure à 20 %. Les espèces caractéristiques de ce

secteur sont des acacias (surtout *A. senegal*, mais aussi *A. albida* dans l'ouest et *A. nilotica* dans la vallée du fleuve Sénégal), des combrétacés (*Combretum glutinosum*, *Guiera senegalensis*) et *Balanites aegyptiaca*.

La densité moyenne de bois sur pied des steppes arborées arbustives est de l'ordre de $1 \text{ m}^3/\text{ha}$. Le secteur ne représente ainsi qu'environ 5 % du volume total de bois sur pied du pays (fig. 3.1), bien que sa superficie soit d'à peu près 20 % de la superficie du pays.

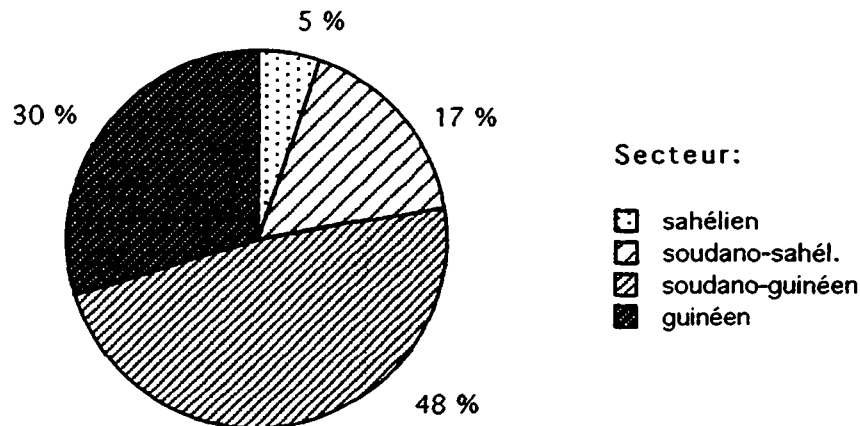


Fig. 3.1 Parts du volume national de bois sur pied par secteur phytogéographique

D'après CTFT, 1981

- Dans le secteur soudano-sahélien, les formations dominantes sont du type savane arbustive et savane arborée. La strate ligneuse est formée d'arbres et d'arbustes, mais la densité de couverture de la strate arborée reste inférieure à 20 %. Les essences forestières suivantes font leur apparition : *Bombax costatum*, *Cordyla pinnata*, *Entenda africana*, *Parkia biglobosa* et *Pterocarpus erinaceus*. La densité de bois sur pied va de $1 \text{ m}^3/\text{ha}$ pour les savanes arbustives à $6 \text{ m}^3/\text{ha}$ pour les savanes arborées. Remarquons que dans l'ouest du secteur, formé par le centre du bassin arachidier (région peuplée du Sénégal), les surfaces agricoles dominent. Les ressources forestières du secteur sont, pour cette raison, essentiellement concentrées dans l'Est.
- Plus au Sud, dans le secteur soudano-guinéen, les savanes arborées côtoient les savanes boisées. Ces dernières possèdent une strate arborée plus dense (densité de couverture supérieure à 20 % et souvent à 40 %), mais le couvert reste ouvert. La strate arbustive s'efface, et une strate graminéenne dense fait son apparition. Près de 50 % du volume total de bois sur pied du pays se concentrent dans ce secteur (fig. 3.1) à la fois assez bien arrosé par les pluies (près de 1000 mm/an, dans la partie sud), et en majeure partie suffisamment éloigné des principales zones de peuplement humain pour ne pas avoir subi

encore, ni de coupes trop sévères de bois, ni de défrichements massifs pour les besoins de l'agriculture.

- Dans le Sud-ouest du pays apparaît le secteur guinéen, dont la limite Nord correspondait jadis à l'isohyète 1200 mm. On y rencontre surtout des forêts claires, de couvert encore ouvert, et quelques îlots de forêt dense tropicale sèche. Les densités de bois sur pied peuvent dépasser 100 m³/ha. Trois espèces de l'étage forestier supérieur sont caractéristiques dans ce secteur : *Parinari excelsa*, *Erytrophleum guineense* et *Detarium senegalense*. Ces essences se sont cependant raréfiées en raison de l'exploitation de bois d'oeuvre, tout comme de nombreuses autres espèces guinéennes qui existent à l'état disséminé : *Albizza ferruginea*, *Antiaris africana*, *Chlorophora regia*, etc.

La forte densité de bois de ce secteur se reflète dans la distribution des volumes par secteur où ce secteur, qui ne couvre qu'environ 7 % du territoire national, représente 30 % du volume total (fig. 3.1)

Les conditions locales

A pluviosité égale, d'autres caractéristiques du site (topographiques, pédologiques, hydrologiques, etc...), qui définissent la station, ont une forte influence sur le type de végétation naturelle local et peuvent être à l'origine de grandes variations de densité.

C'est ainsi que l'on trouvera en bordure de certaines rivières des forêts-galeries à 100 m³/ha à quelques mètres de savanes boisées à 30 m³/ha.

3.1.2 Le cycle forestier annuel

Les déterminants de la dynamique forestière

Les phénomènes suivants sont susceptibles d'influencer notablement l'évolution d'une parcelle de forêt naturelle :

- l'autoravitaillement en bois des populations rurales,
- les prélèvements de bois pour la commercialisation,
- l'expansion des terres agricoles,
- les variations d'accessibilité,

qui représentent la pression anthropique sur les ressources ligneuses;

- la croissance végétale et le dépérissement naturels,
- la désertification,

qui sont des phénomènes naturels;

- les changements de statut légal,
- l'aménagement des forêts,

qui traduisent des mesures de gestion des forêts.

Tous ces phénomènes seront analysés en détail et modélisés plus loin. Au préalable, l'étude de la répartition dans le temps de ces phénomènes permet de définir l'ordre des calculs qui les représenteront lors de la simulation.

Le cycle annuel des événements

Lorsqu'une parcelle forestière est affectée par l'un des phénomènes cités, cela se traduit par des événements dans la vie de la parcelle. Ces événements se produisent en général chaque année à la même période de l'année. Les principaux événements de l'année forestière sont représentés sur la figure 3.2 par un arc de cercle qui indique approximativement à quelle période de l'année ils ont lieu.

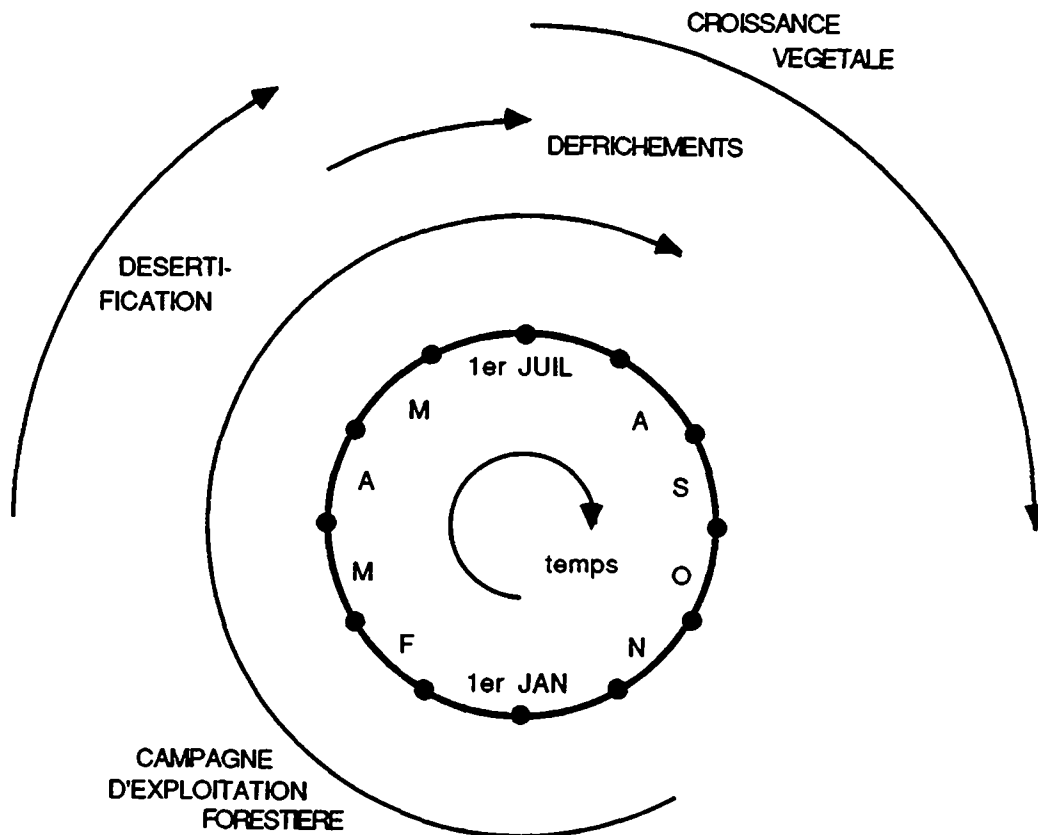


Fig. 3.2 Les événements du cycle forestier annuel

L'autoravitaillement n'a pas été représenté car il a lieu tout au long de l'année. Il en est, en fait, de même de l'exploitation forestière, puisque les dates de début et surtout de clôture de la campagne officielle ne sont guère respectées (cf. § 4.1.1).

L'ordre des calculs représentant la dynamique forestière

Lors de la simulation de la dynamique des ressources ligneuses, l'occurrence des événements forestiers se traduit par des calculs affectant les valeurs des variables qui décrivent l'état des ressources forestières. Les valeurs des variables avant les calculs doivent correspondre à l'état des ressources forestières avant l'occurrence de l'événement considéré. C'est pourquoi la succession des calculs doit autant que possible correspondre à la succession des événements qui marquent l'évolution de la forêt.

Malheureusement, certains événements se chevauchent (fig. 3.2). Etant donné que la prise en compte des chevauchements alourdirait considérablement les calculs sans que les résultats en soient beaucoup modifiés, la règle simple suivante sera adoptée pour déterminer l'ordre des calculs : les calculs correspondant à un événement A seront effectués avant ceux correspondant à un événement B si et seulement si les événements engendrés par A prennent fin avant ceux engendrés par B. L'ordre des calculs obtenus est alors le suivant :

1. Variations de statuts
2. Désertification
3. Aménagements forestiers
4. Extension agricole
5. Variations d'accessibilité
6. Croissance végétale
7. Autoravitaillement
8. Prélèvements de bois pour la commercialisation.

Les prélèvements de bois pour la commercialisation ont été placés après l'autoravitaillement pour qu'il puisse être tenu compte des prélèvements "inévitables" dus à l'autoravitaillement lors de la localisation des prélèvements pour la commercialisation : une unité forestière surexploitée par l'autoravitaillement pourra ainsi être épargnée par l'exploitation commerciale.

3.1.3 Le bois combustible et les autres

La marginalité du bois non brûlé

Outre le bois combustible, du bois d'oeuvre et du bois de service sont également prélevés dans les ressources ligneuses naturelles. Au Sénégal, ce bois ne représente qu'une petite partie du total prélevé : il aurait représenté en moyenne 13 % entre 1972 et 1983 (Rép. du Sénégal, 1990a).

En raison de la raréfaction croissante des grands arbres, l'exploitation de bois d'oeuvre dans les forêts naturelles est en perte de vitesse, comme le montre l'évolution du nombre de pieds de bois d'oeuvre coupés dans les statistiques de la DEFC (op.cit. et communications de la DEFC) :

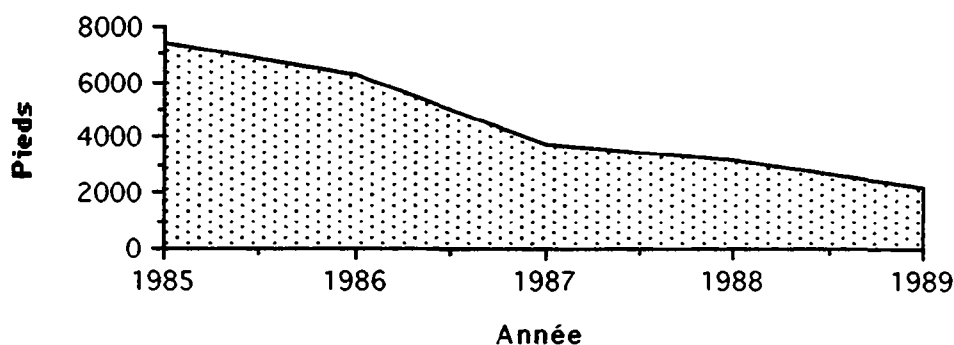


Fig. 3.3 Evolution du nombre de pieds de bois d'oeuvre coupés
D'après République du Sénégal, 1990b

Le nombre de pieds coupés annuellement fait l'objet de décisions politiques. Depuis quelques années, les scieries se voient allouer des quotas de plus en plus faibles, et plusieurs d'entre elles ont déjà dû fermer leurs portes.

L'exploitation de bois de service (piquets, perches, poteaux, gaullettes) n'est pas aussi gênée par la disparition des grands arbres que celle de bois d'oeuvre. Néanmoins, la part du bois non consommé dans les prélèvements totaux sur les ressources ligneuses naturelles devrait rester faible dans les décennies à venir.

S'il n'est pas permis de négliger les prélèvements de bois d'oeuvre et de service, il est en revanche possible de les mettre à l'écart lors de la modélisation de la dynamique des ressources ligneuses naturelles.

La mise à l'écart du bois non brûlé

La croissance et les prélèvements de bois d'oeuvre et de service ne seront pas modélisés, mais deux précautions complémentaires seront prises pour que les résultats des simulations ne soient pas biaisés par cette omission :

- une certaine densité de bois dans les formations ligneuses naturelles sera considérée non utilisable comme combustible
- les chiffres de productivité utilisés seront des chiffres de productivité nette de bois combustible, c'est-à-dire que la productivité de bois non combustible leur aura été préalablement soustraite¹.

Soulignons qu'il n'a été question ici que du bois non brûlé qui provient des ressources ligneuses naturelles. La production de bois d'oeuvre et de service des plantations est un autre cas auquel nous reviendrons dans le paragraphe consacré aux aménagements forestiers (§ 3.3.2).

¹ Les chiffres de productivité disponibles (§ 3.2.2) ont été utilisés tels quels, étant donné que l'incertitude sur ces chiffres (il s'agit pour la plupart de nombres à un seul chiffre significatif !) est beaucoup plus importante que la productivité de bois non combustible.

3.2 MODELISATION DES PHENOMENES "NATURELS" AFFECTANT LA DYNAMIQUE DES RESSOURCES LIGNEUSES

Pour celui qui cherche à influencer l'évolution des ressources ligneuses à travers des mesures de politique énergétique ou forestière, certains phénomènes sont des données sur lesquelles il ne peut guère agir. C'est le cas de la croissance végétale naturelle, de la désertification naturelle, mais aussi de l'extension des surfaces bâties et agricoles aux dépens des surfaces boisées. Ces trois phénomènes seront analysés et modélisés dans cette section. Au préalable, l'ensemble des ressources ligneuses naturelles sera stratifié, c'est-à-dire découpé en unités relativement homogènes. Cette stratification constituera la base de la représentation de tous les phénomènes affectant la dynamique des ressources ligneuses.

3.2.1 Stratification des ressources ligneuses naturelles

Les niveaux de stratification

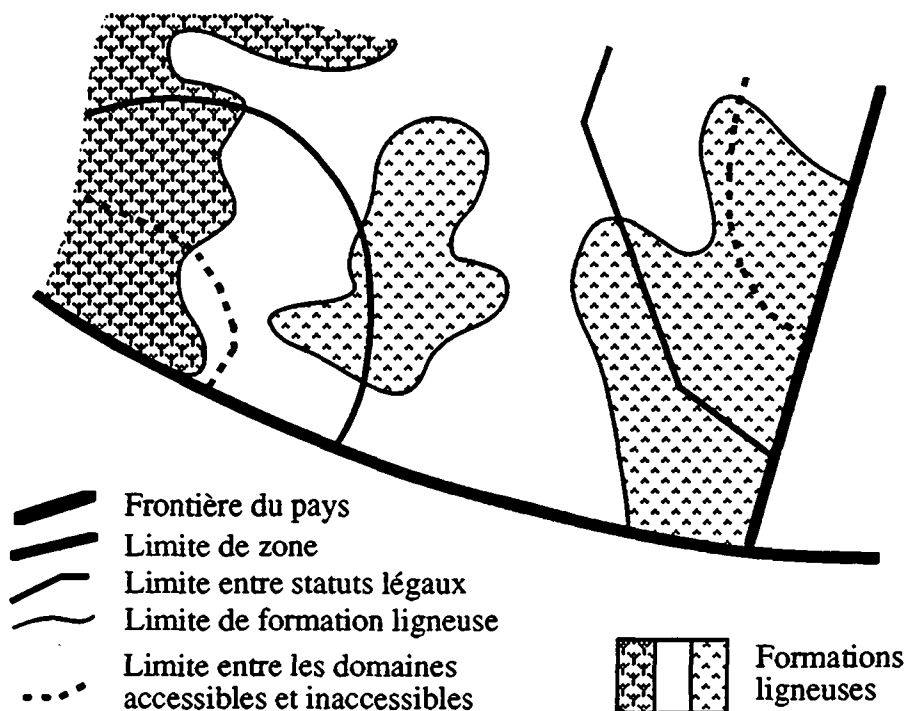


Fig. 3.4 Schéma du découpage spatial des ressources ligneuses naturelles

La nécessité de découper l'espace en zones a déjà été soulignée au paragraphe 2.2.3. Pour représenter l'évolution des ressources ligneuses, le découpage en zones est cependant encore insuffisant. La figure 3.4 représente le découpage qui sera utilisé, et qui comporte quatre niveaux de stratification de l'espace : la zone, le statut légal, la formation ligneuse et le niveau d'exploitation.

- **Les zones (indice Zne)**

Le découpage de l'espace en zones est effectué de telle façon qu'il satisfasse aux besoins de la modélisation du marché des combustibles domestiques dans son ensemble. Rappelons que du point de vue de l'évolution des ressources ligneuses, le découpage en zones permet de différencier les ressources ligneuses :

- selon la pression à laquelle elles sont soumises par les prélèvements de combustibles ligneux
- selon certains autres facteurs qui influencent leur évolution, comme les conditions climatiques ou la vitesse d'extension des terres agricoles.

- **Les statuts légaux (indice Stu)**

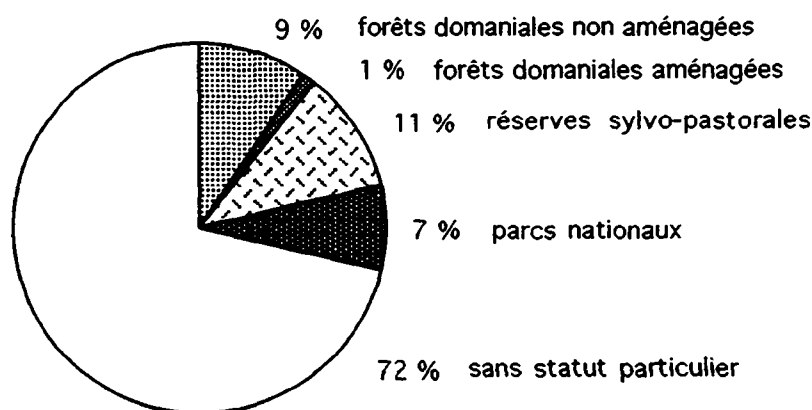


Fig. 3.5 Les parts des différents statuts légaux dans la superficie nationale des formations ligneuses

La législation forestière différencie plusieurs types de statuts forestiers. Au Sénégal, les cinq statuts principaux sont (d'après CTFT, 1981) :

- Les forêts domaniales non aménagées, où l'exploitation forestière est interdite. Elles couvrent environ 1300 milliers d'ha.
- Les forêts domaniales aménagées pour la production de combustible ligneux. Elles couvrent environ 150 milliers d'ha.

- Les réserves sylvo-pastorales, qui couvrent environ 1 500 milliers d'ha et sont presque toutes situées dans le département de Linguère (zones 9 et 10).
- Les parcs nationaux, qui couvrent au total environ 1000 milliers d'ha et dont le principal, celui du Niokolo Koba, avec plus de 800 milliers d'ha, est situé dans la zone 13 (Sénégal Oriental).
- Les forêts sans statut particulier (environ 9900 milliers d'ha).

Ces statuts doivent être distingués lors de la modélisation des ressources ligneuses puisque les quotas de bois dont le prélèvement est autorisé varient d'un statut à l'autre.

- Les formations ligneuses (indice Frm)

La délimitation des formations ligneuses permet de distinguer des surfaces à l'intérieur desquelles les paramètres régissant la croissance végétale peuvent être considérés uniformes. "Savane arborée", "Savane boisée", "Forêt claire" sont des exemples de formations ligneuses. Même des formations végétales aussi peu productives que la "Steppe arbustive" seront désignées par le terme de "formation ligneuse".

L'apparition d'un genre de formation ligneuse à l'intérieur d'une zone donnée s'explique par les conditions topographiques, pédologiques et hydriques. Etant donné que ces conditions ne varient que très lentement au cours du temps, les frontières entre les formations ligneuses seront considérées fixes au cours d'une période de simulation.

Deux travaux de délimitation des formations ligneuses par télédétection ont été entrepris au début des années 80 pour le Sénégal : l'un par le CTFT (1981), lors de la réalisation du Plan Directeur de Développement Forestier, l'autre par l'USAID (1984), lors de la cartographie des ressources naturelles du Sénégal. Les photos-satellite utilisées datent dans les deux cas essentiellement des années 1979-80. Les résultats du CTFT, plus adaptés à ce travail, ont été utilisés dans cette étude.

- Le niveau d'exploitation

Le "niveau" d'exploitation n'a que deux modalités : il distingue les surfaces qui ont déjà fait l'objet d'une exploitation forestière de celles où la végétation est encore dans une sorte d'équilibre naturel à long terme. Ces deux types de surface se différencient par leurs densités de bois et par l'incrément net de biomasse.

Certaines surfaces non exploitées sont inaccessibles à l'exploitation forestière en raison de l'inhospitalité du milieu, du manque ou de l'impraticabilité des voies d'accès. D'autres ne sont simplement pas encore exploitées.

A cette stratification spatiale des ressources ligneuses il faut ajouter la distinction du bois utilisable comme combustible de celui qui ne l'est pas - en raison d'une qualité insuffisante, d'utilisations concurrentes (bois de service et bois d'oeuvre) ou de la protection *traditionnelle*, en partie légalisée, dont bénéficient certaines espèces et certains peuplements forestiers.

Les variables d'état des unités forestières

L'intersection d'une zone, d'un statut légal et d'une formation ligneuse sera appelée une "unité forestière". Les principales variables qui caractérisent l'état d'une unité forestière en une année t sont :

- sa surface $Surf_{ZneStuFrm}(t)$
- son taux d'exploitation $T_{ExplZneStuFrm}(t)$
qui indique la part de $Surf_{ZneStuFrm}(t)$ qui a déjà fait l'objet d'une exploitation
- la densité de la partie exploitée $d_{ZneStuFrm}(t)$

Les surfaces $Surf_{ZneStuFrm}(1980)$ - les surfaces initiales des simulations du chapitre 6 - sont données à l'annexe 3.1. Nous reviendrons aux taux d'exploitation et aux densités initiales au paragraphe 3.2.2.

Pour simplifier l'écriture, "(t)" sera omis par la suite dans l'écriture de toutes les variables. Il sera sous-entendu qu'il s'agit de leur valeur pour une année t donnée.

Deux variables exogènes qui influencent la dynamique d'une unité forestière peuvent déjà être définies :

- Le taux d'accessibilité $T_{AccZneStuFrm}$ est la limite supérieure du taux d'exploitation. Il permet de tenir compte de l'inaccessibilité déjà évoquée de certaines surfaces.
- La densité limite d'utilisation $d_{ur}^{Surf_{ZneFrm}}$ représente la densité du bois d'une formation ligneuse qui n'est pas utilisable comme combustible ligneux.

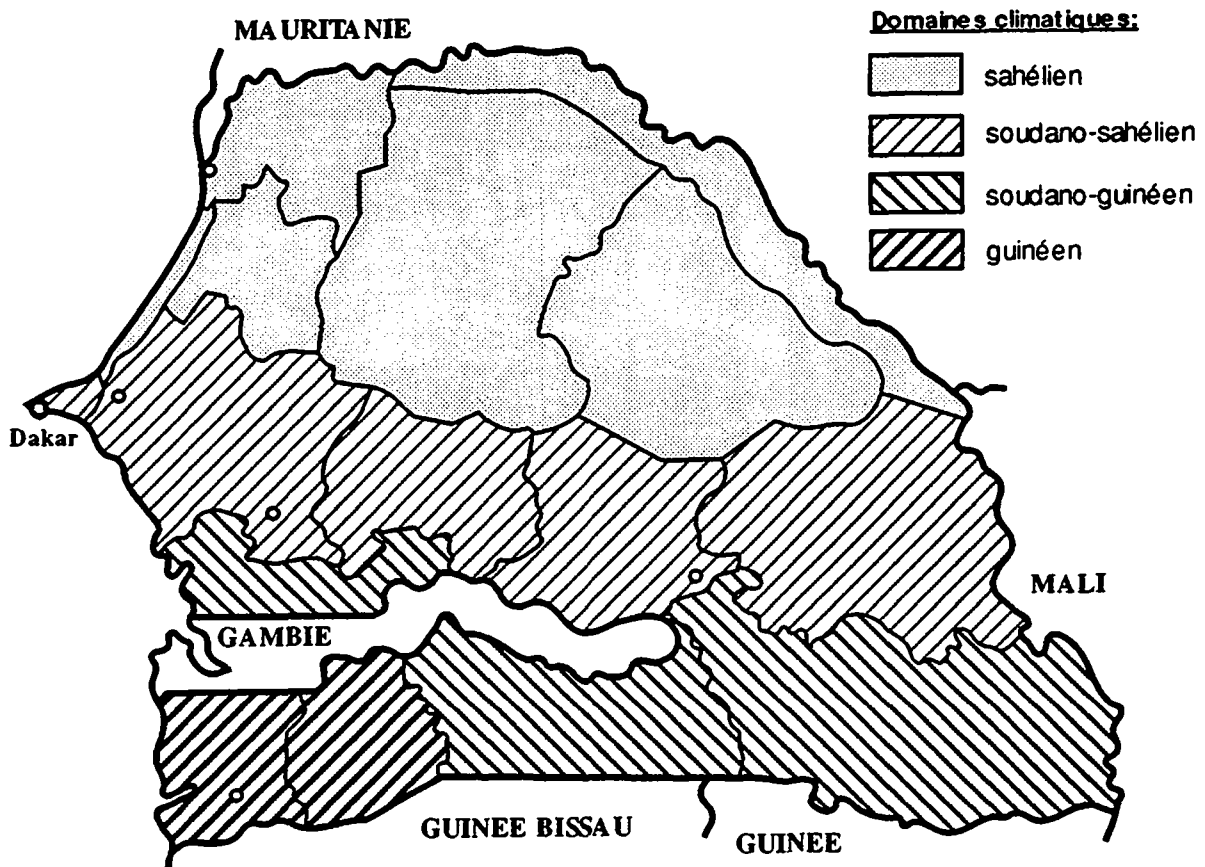
Leurs valeurs sont données à l'annexe 3.2.

D'autres variables exogènes, et en particulier celles qui régissent la croissance naturelle de la végétation, dépendent du climat et sont communes à un ensemble de zones. Il est dès lors utile de définir des domaines climatiques.

Les domaines climatiques

Sur la carte 3.2, les domaines climatiques ont été composés de façon à redessiner au mieux les secteurs phytogéographiques de la carte 3.1 qui sont, rappelons-le, définis par des isohyètes et sont de ce fait assimilables à des domaines climatiques.

La productivité moyenne d'une formation ligneuse Frm dans une zone Zne dont le domaine climatique est Clm sera notée² : $i^{\text{moy}}_{\text{ClmFrm}}$.



Carte 3.2 Les domaines climatiques

² Plus correctement, il faudrait écrire : $i^{\text{moy}}_{\text{Clm}(Zne) \text{Frm}}$.

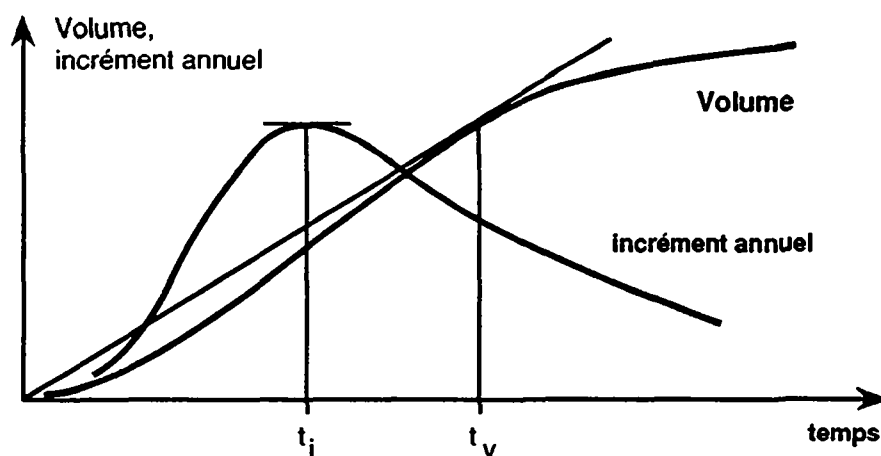
3.2.2 La croissance végétale naturelle

Alors que seules sont connues des estimations de densités moyennes (unités exploitées et inexploitées confondues), comment peut-on estimer les densités de bois des parties exploitées et des parties inexploitées des unités forestières ? Alors que seules sont données des estimations de productivités moyennes (correspondant à des conditions climatiques passées et à un certain régime d'exploitation), comment peut-on simuler les variations de productivité avec les conditions climatiques et les baisses de productivité avec la surexploitation ? Dans ce paragraphe, des réponses seront données à ces deux questions, sur la base d'une analyse de la croissance végétale naturelle.

La croissance naturelle d'une parcelle forestière

Appelons "parcelle forestière", la partie d'une unité forestière ayant subi, en une année donnée, la coupe de tout le bois utilisable. La parcelle ainsi définie n'est donc pas nécessairement une surface connexe³.

Grâce aux semences, aux rejets et aux petits arbres épargnés, le volume de bois exploitable recommence à croître après la coupe. La forme de la courbe de croissance d'un arbre, qui est aussi la forme de la courbe de croissance de la parcelle, est représentée à la figure 3.6



temps t_i : maximum de l'incrément annuel

temps t_v : optimum économique = point de tangence d'une droite passant par (0,0)

Fig. 3.6 Forme de la courbe de croissance d'un arbre

³ A la limite, il peut s'agir d'une réunion de surfaces très petites sur chacune desquelles n'ont été abattus que quelques arbres. L'exploitation commerciale du bois destiné à la carbonisation se fait cependant au Sénégal par coupes quasiment rases sur des surfaces de plusieurs dizaines d'ares autour de l'emplacement des futures meules (observations personnelles).

Cette courbe présente un point d'inflexion en t_i qui correspond au maximum de l'incrément annuel. Au-delà, l'incrément annuel décroît vers zéro, alors que le volume se stabilise peu à peu. t_v représente un optimum économique. C'est le temps après lequel la parcelle devrait être recoupée si l'objectif économique est la maximisation du volume de bois produit par unité de temps.

La plus connue des représentations de cette courbe par des fonctions mathématiques est certainement la loi de Chapman-Richards (cf. MUNRO, 1983) :

$$V = b_1 \{ 1 - e^{-b_2(t - b_4)} \}^{b_3}$$

b_1 permet de fixer le volume maximum atteint

b_2 définit la vitesse de croissance

b_3 est un paramètre de forme

b_4 est un paramètre de calage par rapport au temps

où V est le volume de bois et b_1 à b_4 sont des paramètres.

Une première approximation de la courbe de croissance d'une parcelle est cependant déjà donnée par deux segments de droite, comme représenté à la figure 3.7.

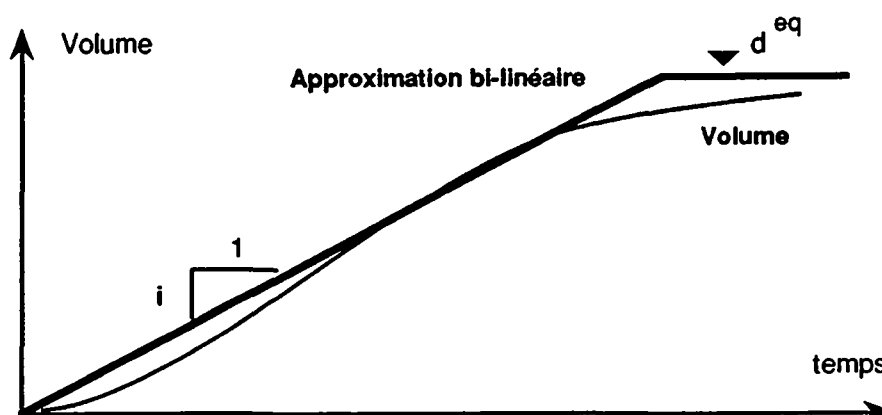


Fig. 3.7 Approximation de la courbe de croissance d'une parcelle forestière par une fonction bi-linéaire

L'avantage de cette approximation est que, pour une surface unitaire, la pente i du premier segment représente la productivité moyenne de la formation ligneuse⁴, alors que d^{eq} représente la densité d'une parcelle en état d'équilibre à long terme, qui n'a jamais subi de coupe.

La croissance d'une unité forestière

Partie non exploitée

La partie non exploitée d'une unité forestière, qui n'a jamais subi de coupe de bois (ou n'en a pas subi depuis très longtemps) peut être assimilée à une grande parcelle de densité uniforme en état climacique. Une faible production brute compense la perte de bois par dépérissement et putréfaction. On peut admettre que la production nette est nulle.

Partie exploitée

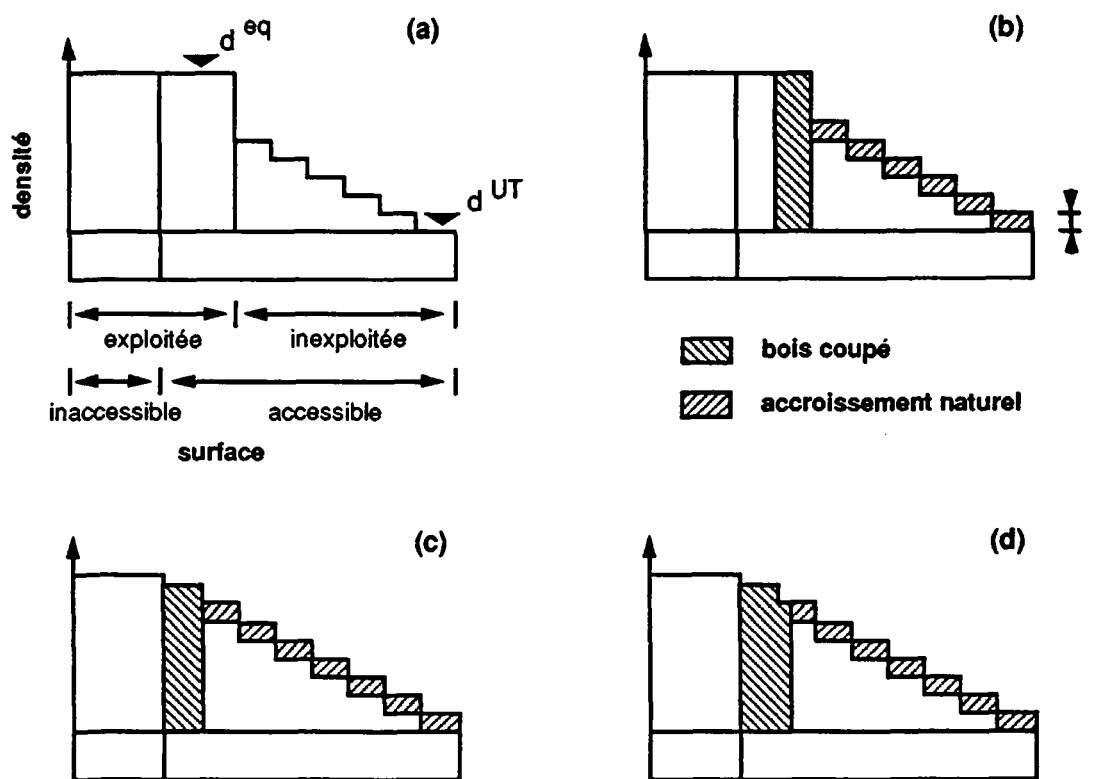


Fig. 3.8 Coupes de bois et accroissement naturel dans une unité forestière

⁴ L'une des intersections du segment de droite avec la courbe (fig. 3.5) correspond alors au temps de croissance pour lequel la productivité a été mesurée.

La partie exploitée d'une unité forestière se compose d'une suite de parcelles de différents âges (temps écoulé depuis la dernière coupe), donc de différentes densités. Pour simplifier, on peut supposer que les parcelles sont de même taille. On obtient alors la fonction de répartition (inversée) de la densité représentée à la figure 3.8(a). Chaque palier correspond à une parcelle.

La partie non exploitée, dont la densité est égale à la densité d'équilibre d^{eq} , est également représentée. d^{UT} est la densité limite d'utilisation (§ 3.2.1).

Tant que l'exploitation n'a pas atteint la limite des surfaces accessibles, on peut admettre qu'elle se fait au détriment de la partie inexploitée de l'unité, qui rétrécit (figure 3.8(b)). Entre-temps, les parcelles coupées connaissent la croissance naturelle qui se traduit par un accroissement de densité i . En vertu de l'approximation bi-linéaire de la courbe de croissance, cet incrément annuel est le même pour toutes les parcelles.

Aux figures 3.8(c) et (d) est représenté l'équivalent de la figure 3.8(b) pour deux cas où l'exploitation a atteint la limite des surfaces accessibles. Dans le cas (c), les coupes sont compensées par la croissance naturelle de la végétation et la densité moyenne est stable. Dans le cas (d), le volume de bois coupé excède l'accroissement naturel et la densité moyenne décroît; il y a surexploitation de l'unité forestière et risque de baisse de la productivité. Nous y reviendrons.

Dans tous les cas, la croissance naturelle de la végétation peut être représentée très simplement, par un accroissement de la densité moyenne de la partie exploitée, cet accroissement ayant pour valeur la productivité de la formation tant que $d^{(6)}$ ne dépasse pas d^{eq} :

$$d^{(6)}_{ZneStuFrm} = d^{(5)}_{ZneStuFrm} + i_{ZneStuFrm}$$

- $d^{(5)}$: densité de bois avant l'accroissement naturel
 $d^{(6)}$: densité de bois après l'accroissement naturel⁵
 i : productivité

Densités naturelles et productivités moyennes

Densités des parties exploitées et inexploitées

Il n'est pas possible, à partir des estimations de densité actuellement disponibles dans le cas du Sénégal (tableau 3.1), qui sont des estimations grossières de densités moyennes par formation

⁵ Les chiffres entre parenthèses renvoient aux numéros du phénomène modélisé et du phénomène précédent (cf 3.1.2).

ligneuse, de faire des estimations précises de densité pour les parties exploitées et inexploitées des unités forestières.

Genre de formation ligneuse	Domaine climatique			
	sahélien	soudano-sahélien	soudano-guinéen	guinéen
Steppe arbustive	0,1	0,5	0,5	
Steppe arborée	1,0	2,0	2,0	
Prairie arborée	1,0			
Steppe boisée	2,0			
Savane arbustive	0,5	1,0	1,0	
Savane arborée	3,0	6,0	6,0	6,0
Savane boisée		15,0	30,0	30,0
Forêt claire				60,0
Forêt dense + galerie			100,0	100,0
Mangroves		20,0	30,0	40,0

Tableau 3.1 Densités des arbres de diamètre > 10 cm, tiges de diamètre > 7 cm [m³/ha]

D'après CTFT, 1981

Il est en revanche possible et nécessaire de faire des estimations grossières. Nécessaire, parce que, comme le montrent les schémas (b) à (d) de la figure 3.8, les densités moyennes des parties exploitées sont généralement beaucoup plus faibles que celles des parties inexploitées. Le raisonnement qui est à la base des schémas de la figure 3.8 indique en même temps la marche à suivre pour estimer la densité actuelle d'une partie exploitée : en se faisant une idée du régime d'exploitation qu'a subi l'unité forestière depuis le jour où elle était "vierge", on peut reconstituer l'évolution de la fonction de répartition de la densité et évaluer finalement la densité moyenne cherchée, en fonction de la densité d'équilibre à long terme. L'indétermination concernant cette dernière est levée en imposant que les densités moyennes données (tableau 3.1) par genre de formation ligneuse et par domaine climatique soient respectées. Cette démarche est suivie lors de l'estimation des densités "actuelles" (1981) au Sénégal faite à l'annexe 3.2.

Productivité moyenne

Genre de formation ligneuse	Domaine climatique			
	sahélien	soudano-sahélien	soudano-guinéen	guinéen
Steppe arbustive	0,02	0,05	0,10	
Steppe arborée	0,10	0,20	0,40	
Prairie arborée	0,20			
Steppe boisée	0,20			
Savane arbustive	0,05	0,10	0,20	
Savane arborée	0,20	0,50	0,75	0,75
Savane boisée		1,00	1,50	1,50
Forêt claire				2,00
Forêt dense + galerie			3,00	3,00
Mangroves		0,20	0,50	0,50

Tableau 3.2 Productivités moyennes en matière ligneuse utilisable comme combustible
D'après CTFT, 1981 (en m³/ha.an)

Les productivités moyennes moy_{ClmFrm} données au tableau 3.2 ne tiennent compte ni des effets de la surexploitation, ni des effets des variations climatiques. Une méthode permettant de simuler les effets de la surexploitation et une autre permettant de simuler ceux de la sécheresse seront proposées ci-dessous.

La baisse de la productivité avec la surexploitation

Il existe de nombreuses raisons pour lesquelles la surexploitation d'une unité forestière peut faire baisser sa productivité :

- la plus importante est liée à la forme réelle de la courbe de croissance des arbres (figure 3.6) : lorsqu'une unité forestière est surexploitée, les arbres seront coupés à des âges de plus en plus bas, et, en raison de la concavité vers le haut de la courbe de croissance, la productivité moyenne baissera
- la surexploitation peut entraîner une dégradation des sols, une dégradation du microclimat, une perte d'arbres semenciers ... , qui entraînent à leur tour une baisse de la productivité.

Définition de la surexploitation

On peut définir la surexploitation comme étant un régime d'exploitation avec des coupes tellement rapprochées que la densité moyenne reste bien en deçà de la valeur correspondant à l'optimum économique (cf. figure 3.4). Cette définition n'est peut-être pas assez stricte, une baisse de productivité pouvant se manifester à long terme en cas d'exploitation continue à l'optimum économique. On peut néanmoins dire que $d^{eq}/2$ est une approximation grossière de la densité moyenne de la partie accessible en dessous de laquelle il y a surexploitation. Cette approximation sera utilisée par la suite.

La relation productivité-densité

Chaque point de la figure 3.9 représente une formation ligneuse. Les chiffres de productivité et de densité utilisés sont les chiffres moyens proposés par le CTFT (1981) pour le domaine climatique dans lequel la formation est le mieux représentée. Dans les coordonnées log-log de la figure, les points s'alignent à peu près sur une droite

$$\ln (i^{moy}) = a \ln (d^{moy}) + b$$

$$\text{avec } a = 0,71$$

Cette loi permet de fixer une borne supérieure à la baisse de la productivité avec la surexploitation. En effet, on peut dire que si la densité dans une formation ligneuse A baisse au point d'atteindre la densité moyenne d'une formation non surexploitée B, alors A conservera au moins la productivité de B⁶. La loi ci-dessus permet d'évaluer la productivité d'une formation fictive B que l'on aura associée à la densité d de A et qui sera appelée $i^{Surexlim}(d)$.

⁶ Parce que la station de A conserve certainement quelques avantages (topographiques, pédologiques, climatiques,...) sur celle de B. Des exceptions sont toutefois imaginables, en particulier sur des sols très sensibles.

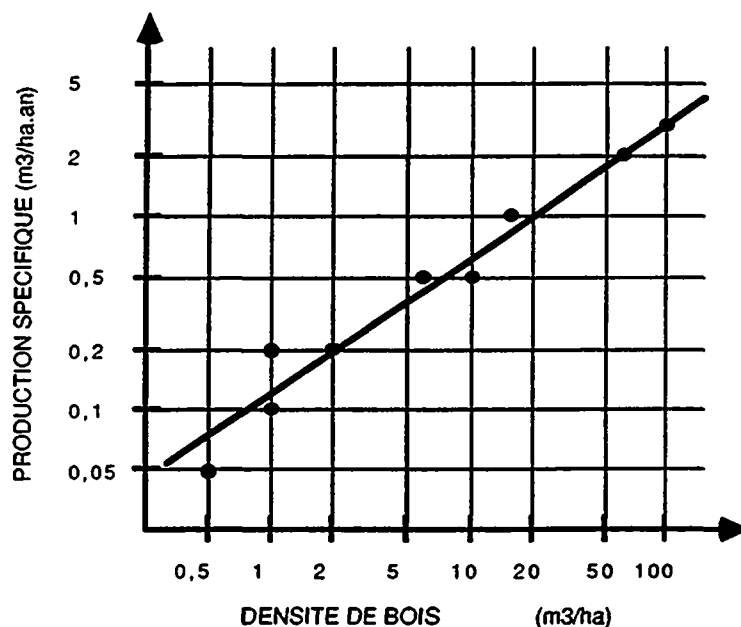


Fig. 3.9 Relation productivité-densité pour les formations ligneuses du Sénégal
D'après CTFT, 1981

Etant donné que la loi ci-dessus est établie pour des densités moyennes par formation observées sous les conditions d'exploitation "actuelles" (1980) au Sénégal, toute densité d devra dans un premier temps être transformée en "densité moyenne qu'aurait eu la formation fictive B sous les conditions d'exploitation de 1980", par une application qui sera notée d^m . Ainsi :

$$i^{\text{Surexlim}}(d) = i^s \circ d^m(d)$$

$$\text{avec } i^s \text{ définie par } \ln [i^s (d)] = a \ln (d) + b$$

Puisque les densités moyennes par formation de 1980 sont proches des densités d'équilibre⁷, d^m peut être approchée par une fonction d^e qui à d associe la densité d'équilibre d'une formation fictive exploitée à la limite de la surexploitation et ayant pour densité d . Or, d^e peut être approchée par $2d$ (voir ci-dessus "Définition de la surexploitation"). D'où :

$$d^m(d) \approx d^e(d) \approx 2d$$

$$i^{\text{Surexlim}}(d) \approx i^s(2d)$$

$$\ln [i^{\text{Surexlim}}(d)] \approx a \ln (2d) + b$$

⁷ Comparer les densités d'équilibre de l'annexe 3.2 avec les densités du tableau 3.1.

D'un autre côté, $i^{\text{Surexlim}}(d)$ doit être égal à i^{moy} lorsque d est la densité correspondant à un régime d'exploitation de A à la limite de la surexploitation⁸ :

$$\ln [i^{\text{Surexlim}}(d^{\text{eq}}/2)] \approx a \ln (d^{\text{eq}}) + b = \ln (i^{\text{moy}})$$

On en déduit finalement :

$$\ln [i^{\text{Surexlim}}(d)] \approx \ln (i^{\text{moy}}) + a [\ln (2d) - \ln (d^{\text{eq}})]$$

Le facteur surexploitation

Puisque $i^{\text{Surexlim}}(d)$ est la borne inférieure de la productivité d'une unité forestière de densité d , une variable exogène doit être introduite pour fixer l'intensité de la réduction de i avec la surexploitation. Dans ce but, la pente a de la relation entre $\ln [i^{\text{S}}(d)]$ et d sera multipliée par un facteur $FS_{\text{Surex}}_{\text{CImFrm}}$, et la productivité $i^{\text{Surex}}_{\text{ZneStuFrm}}$ qui permettra de simuler les effets de la surexploitation dans la partie exploitée d'une unité forestière sera calculée par les relations suivantes :

- Si $d^{\text{acc}} < 0,5 \cdot d^{\text{eq}}_{\text{CImFrm}}$

$$\ln(i^{\text{Surex}}_{\text{ZneStuFrm}}) = \ln(i^{\text{moy}}_{\text{CImFrm}}) + FS_{\text{Surex}}_{\text{CImFrm}} \cdot a [\ln(2 \cdot d^{\text{acc}}) - \ln(d^{\text{eq}}_{\text{CImFrm}})]$$
- Si $d^{\text{acc}} \geq 0,5 \cdot d^{\text{eq}}_{\text{CImFrm}}$

$$i^{\text{Surex}}_{\text{ZneStuFrm}} = i^{\text{moy}}_{\text{CImFrm}}$$

d^{acc} est la densité moyenne de la partie accessible de l'unité:

$$d^{\text{acc}} = [d^{\text{eq}}_{\text{CImFrm}} - (T_{\text{Acc}}_{\text{ZneStuFrm}} - T_{\text{Expl}}_{\text{ZneStuFrm}}) + d^0_{\text{ZneStuFrm}} \cdot (T_{\text{Expl}}_{\text{ZneStuFrm}})] / T_{\text{Acc}}_{\text{ZneStuFrm}}$$

La valeur attribuée à FS_{Surex} devra se trouver entre 0 et 1.

- Pour $FS_{\text{Surex}} = 0$, il n'y a aucune modification de la productivité par la surexploitation
- Pour $FS_{\text{Surex}} = 1$, les effets de la surexploitation atteignent leur borne supérieure correspondant à la relation production-densité de la figure 3.9.

La baisse de la productivité avec la sécheresse

Que la productivité des formations ligneuses décroisse avec la sécheresse est une évidence. En revanche, il ne semble pas exister, pour les formations ligneuses du Sénégal, de relations

⁸ C'est cette condition qui fixe la valeur de b dans la relation donnant i^{S}

quantitatives entre la productivité et des variables explicatives exprimant la sécheresse, comme par exemple les précipitations annuelles.

CLEMENT (1982), à partir de diverses observations de productivité faites par des forestiers d'Afrique tropicale, a pu établir une relation entre la productivité et les précipitations annuelles moyennes du lieu :

$$i_0 = 0,0513 + 1,081 p^2$$

i_0 : productivité potentielle [$m^3/ha.an$] (pas de protections contre le pâturage, les feux)

p : m de pluie / an

(valable entre 500 et 1600 mm de pluie).

Cette relation, qui a été développée pour comparer les productivités de différents sites, ne devrait pas pouvoir donner de bonnes estimations de la variation de la productivité avec les pluies, pour un site donné. Du fait du manque d'adaptation des espèces ligneuses d'un site donné à des conditions plus arides, la relation de CLEMENT devrait sous-estimer la baisse de productivité avec la sécheresse.

Par conséquent, on peut admettre qu'en cas de baisse des précipitations d'un facteur 2, la productivité d'un site devrait baisser au moins d'un facteur 3.

Ce résultat devrait déjà pouvoir aider celui qui cherche à simuler les effets d'une sécheresse ou d'une période pluvieuse sur les productivités, dans le choix des valeurs des variables exogènes $FSech_{CImFrm}$ par lesquelles seront multipliées les productivités :

$$i_{ZneStuFrm} = i_{Surex_{ZneStuFrm}} \cdot FSech_{CImFrm}$$

Par exemple, un $FSech$ de $1/\sqrt{3} \approx 0,58$, correspondant à une baisse des précipitations d'un facteur au plus égal à $\sqrt{2} \approx 1,41$, est tout-à-fait réaliste : la migration des isohyètes vers le Sud constatée au Sénégal dans la période 1968-1984, qui englobe la dernière grande période de sécheresse, (GAVAUD, 1989; LE BORGNE, 1988) correspond à une baisse des précipitations d'un facteur supérieur à 1,5.

Le facteur $FSech_{CImFrm}$ peut aussi être utilisé pour simuler une meilleure protection contre les feux de brousse ou le pâturage : pour CLEMENT, les productivités peuvent être multipliées par 1,25 lorsque des mesures spéciales de protection contre les feux et le pâturage sont prises.

3.2.3 La désertification

La désertification sera définie ici comme un phénomène irréversible conduisant à une forte baisse de productivité des formations ligneuses naturelles. Etant donné que certaines causes de ce phénomène sont indépendantes de la gestion des ressources ligneuses, et qu'il n'est de toute façon pas possible d'établir de relations quantitatives entre les conséquences du phénomène et des variables explicatives, la désertification sera simulée indépendamment de la gestion des ressources ligneuses. La modélisation proposée consiste à faire passer certaines surfaces de leur formation ligneuse initiale à une formation ligneuse particulière : les surfaces désertifiées. Il sera cependant indiqué que les effets de la désertification peuvent également être simulés, quoiqu'avec une certaine perte de pertinence, grâce à un choix judicieux des valeurs des variables exogènes qui gouvernent la croissance végétale naturelle.

Le phénomène irréversible

Le terme "désertification" a été utilisé pour désigner de nombreux phénomènes souvent assez différents les uns des autres par leur localisation, leurs mécanismes, leurs conséquences.

Sa première utilisation est attribuée à AUBREVILLE (1949). Pour ce dernier, les activités humaines (déforestation, feux de brousse) pouvaient engendrer une forte érosion des sols et l'apparition d'une végétation caractéristique de régions plus arides, ce qu'il appela la "désertification".

Une large part est aussi faite aux activités humaines dans les définitions récentes utilisées par les organisations des Nations Unies et la Banque Mondiale. Ainsi, GORSE et STEEDS (1987) définissent la désertification comme le déclin prononcé de la productivité biologique dans des milieux arides et semi-arides, sous l'effet combiné des pressions démographiques et climatiques.

Ci-après, le terme "désertification" sera utilisé dans un sens proche, mais l'accent sera mis sur le caractère désertique des surfaces ayant subi le phénomène. Ce sens est celui que LE HOUEROU a donné au terme "désertification" en le définissant par "l'extension des paysages et des formes géomorphologiques désertiques typiques" (LE HOUEROU, 1976). Il sera admis que :

- la désertification a des conséquences sur la densité de matière ligneuse vivante et sur la productivité, liées à la dégradation des sols;
- ses causes sont à chercher à la fois dans les activités humaines (déforestation, surpâturage, techniques agricoles inadaptées) et dans les conditions naturelles (fluctuations de la pluviosité);

- la désertification est irréversible à l'échelle des horizons de simulation, à moins d'une intervention humaine avec des moyens techniques et financiers importants.

L'utilité d'une modélisation spécifique

La perte de productivité en matière ligneuse justifie la simulation du phénomène de désertification. Les causes du phénomène n'étant que partiellement liées à l'exploitation des ressources ligneuses, celui-ci ne peut pas être convenablement modélisé dans le cadre de la gestion des ressources ligneuses. Il se distingue par ailleurs des phénomènes modélisés jusqu'ici par son caractère irréversible et sa non-linéarité : si nous supposons l'existence d'une relation de cause à effet entre la surexploitation des ressources ligneuses et la désertification, il existe vraisemblablement un seuil de densité de bois au-dessous duquel le phénomène démarre et s'accélère rapidement, faisant chuter la productivité à près de zéro en l'espace de peu de temps.

Une modélisation basée sur le concept de vitesse de désertification fictive

Puisqu'il n'existe pas de relations quantitatives entre la baisse de productivité en cas de désertification et de quelconques variables explicatives (densité de bois, pluviosité⁹), la modélisation du phénomène devra faire intervenir des variables explicatives qui indiquent plus ou moins directement de combien et sur quelles surfaces la productivité baisse.

La vitesse de désertification : les bons côtés du mythe

L'idée que l'on pouvait définir une limite du désert et mesurer sa vitesse d'avancement a séduit quelques spécialistes des questions de désertification et de nombreux politiciens. Il est cependant généralement admis aujourd'hui que l'on ne peut pas parler d'un front d'avancement du désert et que les vitesses mesurées (par exemple 5,5 km/an par LAMPREY en 1975 au Soudan) ne correspondent pas à une réalité physique (MAINGUET, 1991).

En revanche, la notion de vitesse de désertification, ou plutôt celle de temps de désertification qui lui est associée, permet une simulation aisée du phénomène de désertification: On définira pour chaque formation ligneuse des "temps de désertification" $\text{TempsDesert}_{\text{CImFrm}}$ par domaine climatique au bout duquel toute la surface ayant été couverte par la formation ligneuse dans le domaine climatique CIm est supposée désertifiée. Ces temps de désertification permettent le calcul des superficies affectées en moyenne chaque année par la désertification. Il

⁹ La relation de CLEMENT présentée au paragraphe précédent n'est même pas valable pour de faibles précipitations annuelles.

est possible de multiplier ces superficies par un "facteur d'amplification" variable dans le temps pour modéliser par exemple des variations cycliques de l'intensité de la désertification¹⁰.

Les caractéristiques des surfaces désertifiées

La productivité en biomasse ligneuse des surfaces désertifiées est faible mais non nulle. Elles possèdent donc une dynamique très semblable à celle des formations ligneuses, et elles ne représentent en fait qu'un cas particulier de formation ligneuse. Une différence importante doit cependant être faite dans la représentation de leur dynamique; elle concerne le bois mort. En effet, la densité de biomasse ligneuse vivante est réduite lors de la désertification (une variable indiquera la densité résiduelle des surfaces désertifiées par climat). Il y a donc apparition d'un stock de bois mort qui est disponible pour l'exploitation et dont on pourra admettre qu'une certaine part (variable exogène) pourrit chaque année¹¹.

Une certaine redondance de la modélisation

Des essais de simulation de la désertification sur la base de la modélisation proposée ci-dessus ont montré que les résultats obtenus avec des vitesses de désertification constantes (facteur d'amplification constant) étaient peu différents des résultats obtenus en faisant graduellement baisser les valeurs des variables exogènes $F_{Sech_{ClimF_{tm}}}$ (§ 3.2.2). Seule la perte de bois par putréfaction ne pouvait pas être simulée avec les variables exogènes qui régissent la croissance végétale naturelle.

Etant donné ces résultats d'une part, et la critique dont l'emploi de la notion de vitesse de désertification a fait l'objet d'autre part, la modélisation proposée ci-dessus ne devrait être utilisée que pour simuler des cas de désertification extrêmes, dans lesquels d'importantes quantités de bois mort risquent de pourrir.

3.2.4 Les surfaces agricoles : extension et production de bois

L'extension des terres agricoles se fait au détriment des ressources ligneuses naturelles. Il s'agit d'une cause importante de régression des surfaces boisées, mais il faut accepter que la priorité soit donnée à l'extension des surfaces agricoles sur la conservation des surfaces forestières. En outre, la production agricole n'est pas incompatible avec une production de bois, comme le

¹⁰ Cette démarche est exposée en détail dans le document [5].

¹¹ On peut remarquer dans les régions peu accessibles du Sahel de nombreux arbres morts qui ne semblent pas dater de la dernière saison sèche.

démontrent très bien les systèmes agro-forestiers traditionnels. On peut dire que le défrichage donne naissance à une nouvelle ressource ligneuse dont la productivité, bien que faible, est loin d'être négligeable.

Un phénomène souhaitable

Le taux de surface agricole par habitant au Sénégal était de 0,4 ha/hab en 1980 (DAT et Nations Unies, 1984). En admettant que ce taux se maintienne pendant les 20 années suivantes, compte tenu d'un taux de croissance démographique de 2,8 %, on peut calculer que 1700·10³ ha auront été défrichés entre 1980 et 2000, soit 12 % de la surface des formations ligneuses. Certes, ce calcul est simpliste, mais il permet de montrer que la perte de ressources ligneuses naturelles due à l'extension des terres agricoles est loin d'être négligeable. L'extension des surfaces bâties se fait aussi - indirectement - au détriment des ressources ligneuses. Ses effets sont toutefois négligeables en comparaison avec ceux de l'extension des surfaces agricoles.

L'extension des surfaces agricoles est cependant très importante pour le pays, puisqu'elle permet dans une certaine mesure à la production alimentaire de suivre la croissance démographique. Elle permet aussi au pays, dans le cas des cultures de rente, d'acquérir des devises nécessaires au financement de certaines importations, comme celles de gaz pour la cuisson (!).

Nous pouvons donc admettre que, dans les grandes lignes, l'extension des surfaces agricoles se fera indépendamment de la politique forestière.

Modélisation de l'extension des surfaces agricoles

Détermination des surfaces défrichées par zone

Pour chaque zone, la surface défrichée SurfDéfrich_{Zne} sera déterminée par la variation de la surface agricole totale depuis l'année précédente :

$$\text{SurfDéfrich}_{Zne}(t) = \text{SurfAgric}_{Zne}(t) - \text{SurfAgric}_{Zne}(t-1)$$

$$\text{avec } \text{SurfAgric}_{Zne}(t) = \text{FJach}_{Zne}(t) \cdot \sum_{\text{Cult}=1}^{\text{NbCult}} \text{SurfCultures}_{Zne\text{Cult}}(t)$$

$\text{SurfCultures}_{Zne\text{Cult}}(t)$: Surface affectée au type de culture Cult, zone Zne, année t

$\text{FJach}_{Zne}(t)$: Rapport entre la surface agricole totale (y.c. jachères) et la surface cultivée hors jachères, soit $1 / (1 - \text{Taux de jachère})$.

Les variables SurfCultures et FJach sont exogènes. Les surfaces initiales (1980) par zone et par type de culture et les taux d'accroissement annuels utilisés lors des simulations sont données à l'annexe 3.3, ainsi que les hypothèses faites sur l'évolution des taux de jachère.

Ventilation des surfaces défrichées sur les unités forestières

La surface défrichée d'une zone doit être ventilée sur les unités forestières.

Etant donné que les unités forestières qui ont un statut légal particulier bénéficient généralement d'une protection vis-à-vis du défrichage, on peut admettre que l'extension agricole se fait dans les unités "sans statut particulier" (statut : StuAgr), et négliger les défrichements frauduleux dans les autres statuts¹².

Il est probable que certaines formations ligneuses seront préférées à d'autres. On peut supposer que les surfaces défrichées dans les différentes formations ligneuses sont proportionnelles à la fois aux surfaces de ces formations ligneuses et à des variables exogènes $Pref_{ZneFrm}$, les "préférences". L'équation différentielle à la base du calcul des surfaces défrichées est alors¹³ :

$$\frac{dS_{ZneFrm1}}{Pref_{ZneFrm1} \cdot S_{ZneFrm1}} = \frac{dS_{ZneFrm2}}{Pref_{ZneFrm2} \cdot S_{ZneFrm2}} = \dots$$

S_{ZneFrm} : surface résiduelle de l'unité forestière Frm

dS_{ZneFrm} : variation différentielle de surface.

Les quantités $Pref_{ZneFrm}$ représentent la part de la surface défrichée qui, si les surfaces des formations ligneuses étaient toutes égales, reviendrait à la formation Frm lors du défrichage d'une surface unitaire dans la zone Zne.

Etant donné le manque d'informations sur les préférences des agriculteurs, il a été admis lors des simulations que les "préférences" de chaque zone sont égales entre elles, c'est-à-dire que les défrichements se font proportionnellement aux surfaces des formations ligneuses.

¹² Des défrichements frauduleux dans les autres statuts existent cependant, même dans les parcs nationaux (communication personnelle de Bassirou DIEDHIOU, DEFC). Peut-être ne sont-ils pas aussi négligeables.

¹³ Une méthode numérique itérative a été développée pour la résolution de cette équation (document [4]).

La production de bois des surfaces agricoles

Les surfaces agricoles sont génératrices de bois pour deux raisons : lors du défrichage, le bois des arbres abattus peut être utilisé, et après, les arbres conservés ou replantés dans les champs produisent du bois en poussant.

Le bois des défrichements

Si $d_{AgricZneFrm}$ est une densité moyenne des arbres conservés dans les champs lors des défrichements (variable exogène) et $VarSurfAgrZneFrm$ une surface défrichée déterminée précédemment pour la formation Frm , alors la quantité de bois disponible due aux défrichements dans la zone Zne vaut :

$$BoisDefrich_{Zne} = \sum_{Frm} (d^{(3)}_{Zne\ StuAgr\ Frm} - d_{AgricZne}) \cdot VarSurfAgrZneFrm$$

$d^{(3)}$: densités avant les défrichements (ne sont pas modifiées par l'extension des surfaces agricoles). L'extension des surfaces agricoles est supposée se faire dans les parties accessibles uniquement.

$StuAgr$: statut légal des surfaces défrichées.

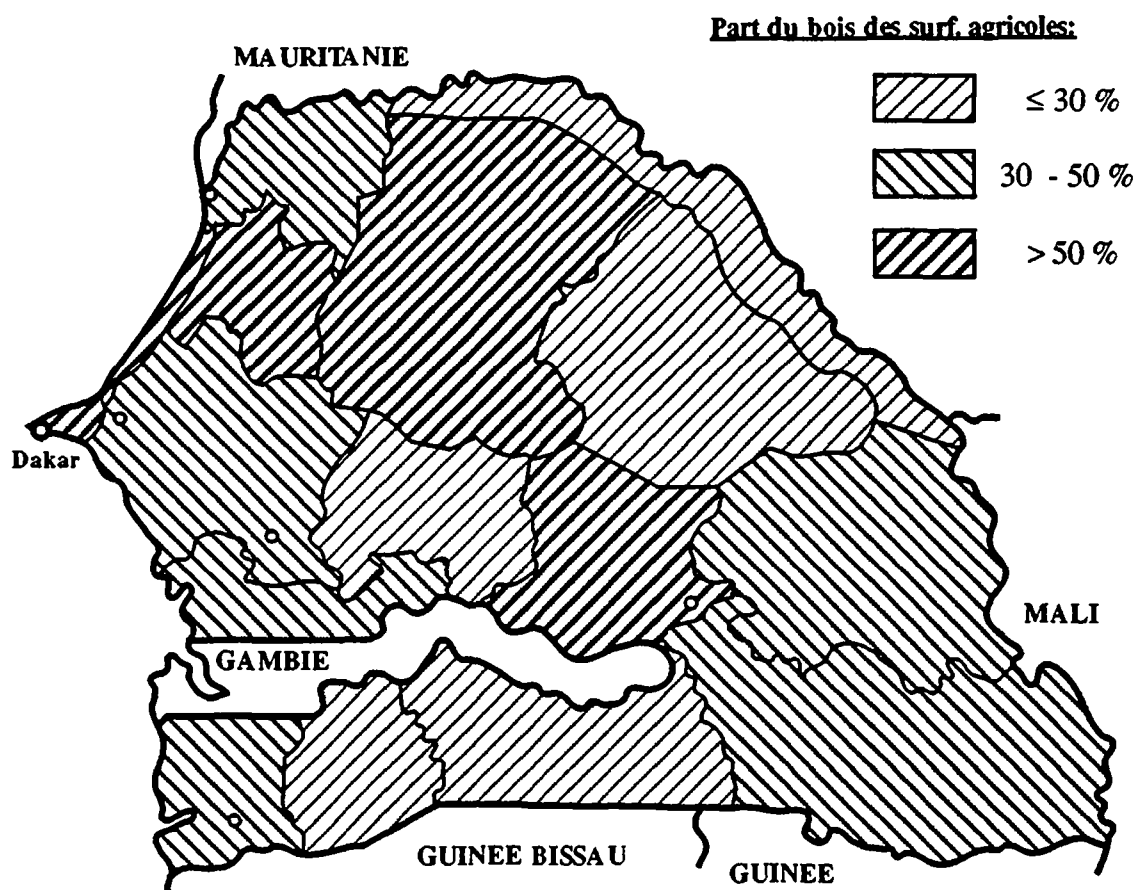
Faute de données, $d_{AgricZneFrm}$ sera supposée égale à d^{UT}_{ZneFrm} lors des simulations.

La productivité des terres agricoles

Si $i_{AgricZne}$ est la productivité moyenne des terres agricoles dans la zone Zne , la production de bois des terres agricoles est :

$$BoisAgricZne = i_{AgricZne} \cdot SurfAgricZne$$

Comme le montre la carte 3.3, la production de bois des terres agricoles est loin d'être négligeable, puisque, en moyenne, plus de 30 % du bois combustible consommé par les ménages ruraux du Sénégal semble provenir des terres agricoles.



Carte 3.3 Parts des surfaces agricoles dans la couverture des besoins en bois des ménages ruraux. D'après enquêtes MASENS¹⁴

En supposant que la totalité du bois produit par les surfaces agricoles est consommée, on peut calculer des productivités en bois combustible $imin_{Zne}$ à partir des consommations de combustible ligneux, des parts du bois provenant des surfaces agricoles et des superficies des surfaces agricoles (tableau 3.3). Dans certaines zones bien fournies en ressources ligneuses on peut supposer que ceux qui vont chercher le bois, par commodité, ramassent ou coupent une partie $MinForêts_{Zne}$ du bois dont ils ont besoin dans la forêt, alors que la production des champs n'est pas exploitée au maximum. Dans ces zones, $imin_{Zne}$ sous-estime la productivité réelle des terres agricoles, $iAgric_{Zne}$. Des estimations de $MinForêts$ et de $iAgric$ ont été faites au tableau 3.3.

¹⁴ Les estimations des parts moyennes par zone ont été faites sur la base de réponses qualitatives du type : "La plupart du bois provient des champs et des jachères", "Une petite partie ..."; ... Ces estimations sont donc à utiliser avec certaines précautions.

Zone	Pop. '80 [1000]	Cons. bois [g/hab.j]	PartChamps	SurfAgric [1000 ha]	i _{min} [m ³ /ha.an]	iAgric [m ³ /ha.an]	MinForets
1	58	299	0,51	8,1	0,37	0,10	0,00
2	55	402	0,60	50,5	0,09	0,09	0,00
3	1033	806	0,39	902,3	0,12	0,12	0,00
4	180	427	0,64	190,2	0,09	0,09	0,00
5	210	1228	0,28	213,0	0,11	0,11	0,00
6	271	781	0,37	240,4	0,11	0,11	0,00
7	133	597	0,33	114,6	0,07	0,07	0,00
8	172	854	0,22	50,2	0,21	0,21	0,00
9	124	427	0,61	90,5	0,11	0,11	0,00
10	74	687	0,12	33,4	0,06	0,11	0,88
11	74	750	0,68	44,5	0,27	0,30	0,32
12	65	760	0,39	39,1	0,16	0,30	0,61
13	71	707	0,36	62,1	0,09	0,40	0,64
14	218	1577	0,48	91,8	0,57	0,60	0,52
15	199	1977	0,19	101,6	0,19	0,40	0,81
16	190	1577	0,23	134,8	0,16	0,40	0,77

PartChamps : part du bois provenant des champs, d'après enquêtes MASENS
i_{min} : productivité minimale des surfaces agricoles d'après les enquêtes

$$i_{min} = (\text{PartChamps} \cdot \text{Pop '80} \cdot \text{Consbois} \cdot 365/860) / (\text{SurfAgric} \cdot 1000 \cdot (1 + \text{TauxJachere}))$$

TauxJachere : cf. Annexe 3.3

Sources : Annexes 2.1, 3.3 et résultats enquêtes MASENS

Tableau 3.3 Estimation de la productivité des surfaces agricoles

Dans l'avenir, la productivité en bois des surfaces agricoles augmentera certainement dans certaines zones, non seulement en raison de la raréfaction du bois de feu, mais aussi en raison des multiples autres bénéfices que certains types d'agro-foresterie peuvent procurer aux paysans : diversification et appoint alimentaires, produits médicinaux, appoint de fourrage, amélioration du sol, ombre, ...

Remarquons cependant que certains systèmes agro-forestiers traditionnels sont déjà hautement performants. L'exemple le plus connu en milieu sahélien est l'association *Acacia albida* - cultures céréalières sous pluies : *Acacia albida* est une légumineuse fixatrice d'azote. Elle n'a pas de feuilles pendant la saison des pluies, et n'entre donc pas en compétition avec les cultures pour la lumière. Sous les arbres, les rendements céréaliers peuvent doubler. Par ailleurs, les gousses qui tombent en grande quantité (plus de 1500 kg/ha) pendant la saison sèche sont mangées par le bétail (d'après National Research Council, 1984).

3.3 MODELISATION DE LA GESTION DES RESSOURCES LIGNEUSES

Comme déjà signalé, la gestion des ressources ligneuses naturelles est assez rudimentaire : les populations riveraines tout comme les autorités forestières se contentent de couper ou de laisser couper du bois, le renouvellement de la ressource étant ensuite laissé aux soins de la nature. Il n'y a pas de travail du sol, pas d'apport d'engrais, pas d'ensemencement ni d'apport de jeunes plants. Deux phénomènes importants doivent cependant être modélisés en dehors des prélèvements : les variations de statut et les variations d'accessibilité, qui augmentent ou diminuent la protection de certaines surfaces vis-à-vis de l'exploitation. Ils seront l'objet du premier paragraphe de cette section.

En revanche, dans les forêts aménagées, les travaux entrepris ont généralement des répercussions importantes sur la productivité de bois combustible. L'aménagement des forêts et la production des forêts aménagées seront traités au paragraphe 3.3.2.

Enfin, les prélèvements pour l'autoravitaillement et les coupes de bois pour la commercialisation seront analysés et modélisés aux paragraphes 3.3.3 et 3.3.4.

3.3.1 Les variations de statut et d'accessibilité

Une modification du statut légal d'une surface forestière peut être décrétée à tout moment par les autorités forestières. Elle peut être motivée par une volonté de protéger (classement de forêts domaniales, création de parc nationaux) ou de réserver à des usages particuliers (création de réserves sylvo-pastorales). Elle peut aussi avoir pour objectif de rendre accessible à l'exploitation une surface initialement protégée (déclassement de forêts domaniales). Ses conséquences sur l'évolution des ressources ligneuses ne doivent donc pas être négligées.

Sur la base de certaines données exogènes qui définiront les surfaces concernées par zone, formation ligneuse, paire de statuts et année, les variations de surface et de densité qui traduisent les modifications de statut pourront être calculées lors des simulations.

Une amélioration de l'accessibilité des ressources ligneuses peut apparaître avec le désenclavement de certaines surfaces éloignées des villages et des axes de circulation. La part des surfaces accessibles augmente avec la construction de nouvelles routes, l'extension des zones agricoles, la création de nouveaux villages...

La simulation des améliorations d'accessibilité se fera à travers l'évolution des variables exogènes TAccZneStuFrm, les taux d'accessibilité. Elle aura pour conséquence des

augmentations de densité pour les parties accessibles. L'évolution des taux d'accessibilité utilisée lors des simulations est donnée à l'annexe 3.2.

Dans les deux cas (modifications de statut et améliorations de l'accessibilité), les équations qui traduisent les phénomènes sont simples et sans intérêt scientifique¹⁵

3.3.2. Les aménagements forestiers

Toute surface forestière ayant fait l'objet d'un aménagement important destiné à augmenter sa productivité (fertilisation, plantation d'arbres...) ou à la protéger des attaques de l'homme ou de son environnement en général (protection contre les coupes frauduleuses, le bétail, protection contre l'érosion...) sera appelée une forêt aménagée¹⁶.

Malgré la souplesse de cette définition, peu de surfaces forestières peuvent encore être comptées parmi les forêts aménagées (cf. début du chapitre), car les moyens techniques et financiers ont jusqu'à maintenant manqué au pays pour des travaux d'aménagements forestiers de grande envergure.

La création de forêts aménagées se fait généralement sous forme de projets cofinancés par des organisations d'aide au développement. C'est aussi sous la forme de "projets" localisés dans le temps et dans l'espace que sera simulé l'aménagement des forêts.

Modélisation des aménagements forestiers

Les projets d'aménagements forestiers

Un "projet d'aménagement forestier" sera défini par :

- l'année de démarrage
- la durée (en années) du projet
- la zone, le statut légal et la formation ligneuse (y compris les "surfaces désertifiées") de l'unité forestière d'origine

¹⁵ Ces équations figurent dans le document [6].

¹⁶ A ne pas confondre avec le statut légal "forêts domaniales aménagées (pour l'exploitation de bois)" des ressources ligneuses naturelles.

- la surface aménagée annuellement
- le genre de forêt aménagée (voir ci-dessous)

Les forêts aménagées qui existent déjà l'année où commence la simulation seront décrites à l'aide de projets dont l'année de démarrage est antérieure à la première année simulée.

Les genres de forêt aménagée

Un "genre de forêt aménagée" GFA est défini par les principales caractéristiques d'un type de forêt aménagée, dont certaines sont illustrées sur la figure 3.10 :

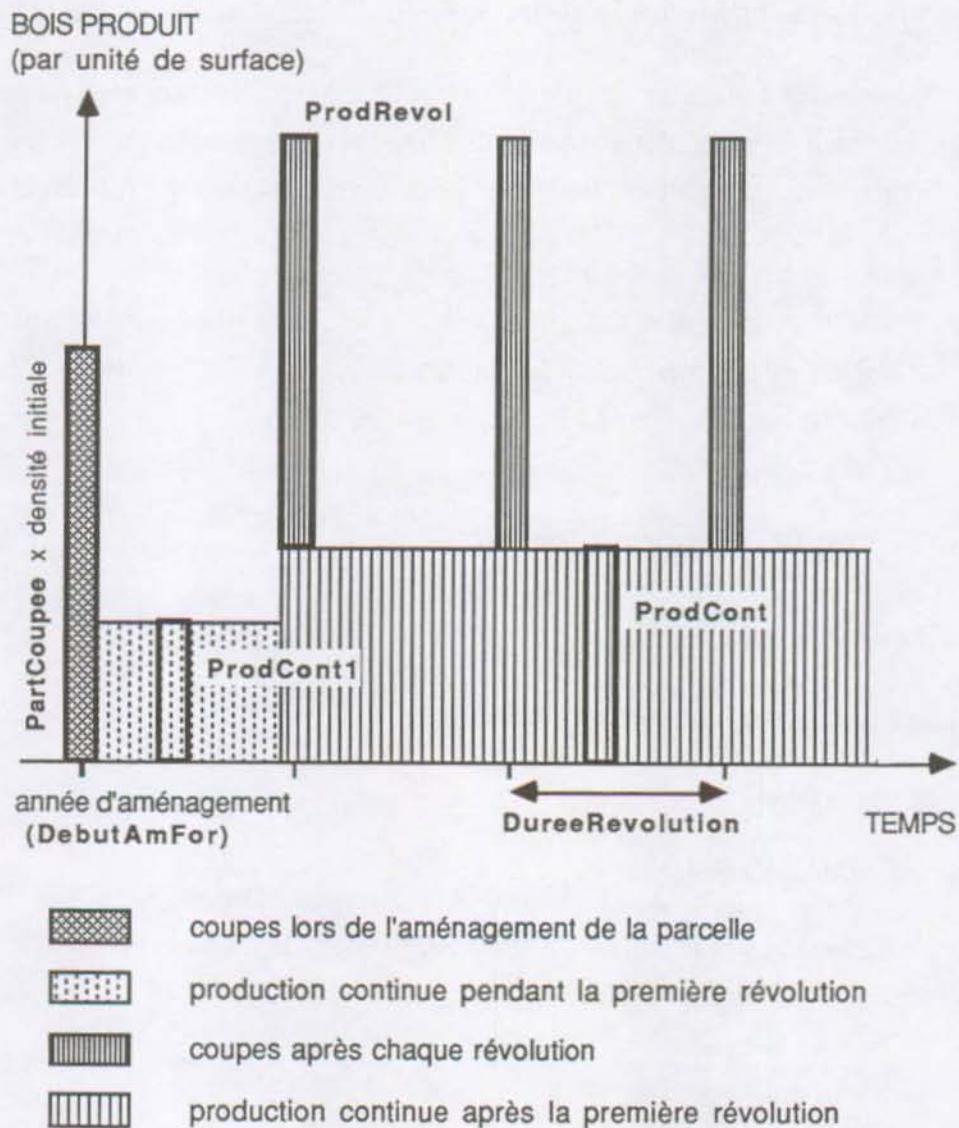


Fig. 3.10 Les productions de bois d'une forêt aménagée

- $PartCoupee_{GFA}$: part du bois sur pied de la parcelle d'origine qui est coupée lors de l'aménagement.
- $DureeRevolution_{GFA}$: durée d'une révolution (temps qu'il faut à une nouvelle génération d'arbres pour atteindre leur maturité)
- $ProdCont1_{GFA}$: production spécifique continue (annuelle) pendant la première révolution. Bien que la première révolution doive normalement permettre à un capital ligneux dégradé ou inexistant de se reconstituer, il se peut que de faibles prélèvements soient prévus au cours de cette période.
- $ProdRevol_{GFA}$: production spécifique due aux coupes à la fin de chaque révolution
- $ProdCont_{GFA}$: production spécifique continue
- $AmForRural_{GFA}$: variable binaire indiquant si l'aménagement est principalement destiné à satisfaire des besoins du milieu rural ou non
- $CoutAmForInit_{GFA}$, $CoutAmForCont1_{GFA}$, $CoutAmForRevol_{GFA}$,
 $CoutAmForCont_{GFA}$: coûts spécifiques de l'aménagement et de l'exploitation (notations analogues à celles pour la production).

Un aménagement peut être fait en vue de la production de bois combustible, de bois d'oeuvre ou de bois de service, ou de deux ou trois de ces types de bois à la fois. Les productions ci-dessus sont des productions de combustible uniquement. De même, lorsque des produits autres que le bois combustible sont produits, les coûts totaux doivent être ventilés sur les produits, de façon que n'apparaissent ici que les coûts imputables à la seule production de bois combustible.

Il va de soi que certaines de ces variables peuvent être nulles. Lorsque l'exploitation se fait par révolutions, on se contentera par exemple de définir $PartCoupee$, $DureeRevol$, $ProdRevol$, $CoutAmForInit$ et $CoutAmForRevol$.

Les caractéristiques des projets et des genres de forêts aménagées permettent de calculer :

- les diminutions de surface des formations ligneuses naturelles,
- la production de bois des forêts aménagées (cf fig. 3.8),
- le coût de l'aménagement et de l'exploitation des forêts aménagées.

Les revenus de la vente du bois seront calculés pour les aménagements à usage urbain en supposant que le prix de vente du bois produit est égal au prix du marché pour du bois à distance nulle des localités de production (cf § 4.1.4)¹⁷.

Pour ce qui est de la carbonisation éventuelle, le bois des forêts aménagées sera traité de la même façon que celui des formations ligneuses naturelles (cf chap. 4).

Des plantations énergétiques aux aménagements écologiques

Parmi les premières réactions au déboisement et à "l'avancée du désert" au Sahel figuraient de nombreux projets de plantations énergétiques et de "ceintures vertes". Les plantations énergétiques étaient des monocultures d'arbres à croissance rapide destinées à l'approvisionnement en combustible des grandes villes. Les "ceintures vertes", bandes boisées entourant les villes, étaient généralement aussi des monocultures. Les espèces les plus utilisées étaient le Neem (*Azadirachta indica*) et l'Eucalyptus (*E. camaldulensis*, et autres).

Il s'est avéré que ces plantations constituaient des écosystèmes très fragiles. Les arbres en bas âge ont particulièrement souffert des années de sécheresse, laissant souvent le sol beaucoup moins bien protégé qu'il ne l'était avant l'aménagement. Par ailleurs, les espèces plantées avaient besoin de bons sols et de conditions hydriques favorables. Elles rivalisaient ainsi avec l'agriculture pour l'attribution des meilleures terres (SCHAM, 1985). En plus, il fallait des moyens financiers importants.

A l'avenir, la tendance sera probablement aux aménagements écologiques, moins coûteux, dans lesquels la végétation naturelle est enrichie par des espèces qui ont prouvé leur résistance aux conditions naturelles locales. Ils ont une productivité bien inférieure mais donnent naissance à des écosystèmes plus riches et moins vulnérables.

En attendant que de nouvelles espèces à croissance rapide fassent leurs preuves, les estimations de productivité des forêts aménagées, faites en vue des simulations, devront donc dénoter beaucoup de prudence. La prudence s'impose également lors de l'estimation des surfaces aménagées futures, qui dépendent des moyens techniques et financiers disponibles : à moins d'un changement des méthodes d'aménagement, un taux de croissance de 7 % de la surface aménagée annuellement présuppose déjà un doublement des moyens tous les 10 ans, alors que, entre 1985 et 1988, la surface aménagée stagnait aux alentours de 20 000 ha/an.

¹⁷ Avec les notations du chapitre 4, le prix de vente dans une zone i sera supposé être $\alpha + m_i$

3.3.3. Les prélèvements pour autoravitaillement

Il y a autoravitaillement en combustibles ligneux lorsque les membres d'un ménage produisent (ramassent, coupent, éventuellement carbonisent, transportent...) du bois de feu ou du charbon de bois pour les besoins du ménage. C'est, en règle générale, le cas du milieu rural. Les prélèvements du bois pour l'alimentation de certains "marchés locaux", qui seront définis ultérieurement, seront assimilés à de l'autoravitaillement (cf § 4.1.4). L'évaluation, par zone, des consommations des ménages auto-ravitailés et de ceux qui s'approvisionnent sur les marchés locaux sera présentée au chapitre 5 (§ 5.1.3). Il sera donc supposé ici que les volumes de bois coupés par zone sont donnés. L'inventaire des ressources disponibles, la ventilation des consommations sur les ressources et l'enregistrement des prélèvements seront traités dans ce paragraphe.

L'accès incontrôlé aux ressources

La principale différence, du point de vue forestier, entre l'autoravitaillement et les prélèvements pour la commercialisation réside dans le caractère incontrôlable de l'autoravitaillement.

Le code forestier place les ressources ligneuses naturelles sous le contrôle de l'Etat, mais ménage aux villageois la possibilité de s'y approvisionner (avec quelques restrictions pour certains statuts légaux). On peut dire que cette concession faite à l'autoravitaillement est sage, pour deux raisons :

- Sur le plan législatif, toute disposition contraire serait difficile à défendre, étant donné que le bois est pratiquement le seul combustible accessible à une grande majorité de ruraux dont les revenus financiers sont très faibles;
- Sur le plan exécutif, il serait pratiquement impossible de contrôler l'accès des villageois aux forêts qui entourent les villages.

Par conséquent, les villageois prélèvent dans les ressources ligneuses naturelles autant de bois qu'ils en désirent, en choisissant d'après leurs propres critères les formations ligneuses, et cela jusqu'à épuisement des ressources. Il n'en est pas de même dans le cas des prélèvements pour la commercialisation, sur lesquels l'Etat exerce, malgré la fraude, un certain contrôle. Pour cette raison, les prélèvements pour l'autoravitaillement méritent d'être modélisés séparément.

Les ressources préférées

Les ressources disponibles pour la satisfaction des besoins des auto-ravitailés sont, dans l'ordre d'accessibilité :

- 1) la production des terres agricoles
- 2) le bois des défrichements
- 3) la production des forêts aménagées à usage rural
- 4) les ressources ligneuses naturelles

On peut admettre que cet ordre d'accessibilité est aussi celui dans lequel les ressources seront épuisées : les villageois ne s'attaqueront à une ressource que lorsque toutes les ressources plus accessibles seront épuisées.

Une exception doit être faite pour certains prélèvements dans les ressources ligneuses naturelles qui ont lieu malgré que la production des terres agricoles ne soit pas épuisée (cf § 3.2.4). Les variables exogènes $MinForets_{Zne}$ (tab. 3.3) indiqueront la part des prélèvements ruraux d'une zone à imputer aux ressources ligneuses naturelles.

La question de la ventilation des prélèvements effectués dans les ressources ligneuses naturelles sur les différentes formations ligneuses est analogue à celle qui se posait à propos de l'extension des surfaces agricoles. Elle se prête donc à un traitement similaire. Cette fois cependant, on peut admettre que les prélèvements sont proportionnels aux volumes de bois accessibles (et non aux surfaces) et à des variables exogènes $PrefAuto_{ZneStuFrm}$.

A nouveau, faute d'informations, les "préférences" qui sont censées traduire les préférences des villageois pour certaines formations (plus denses, en moyenne plus proches...) et certains statuts légaux ont été supposées uniformes lors des simulations du chapitre 6. Seules les "préférences" pour les parcs nationaux ont été supposées nulles.

L'enregistrement des prélèvements

Une fois que les volumes de bois prélevés dans les différentes ressources disponibles ont été évalués, les prélèvements doivent être enregistrés. Les calculs correspondants sont assez simples : pour les formations ligneuses naturelles, ils se traduisent par une baisse des densités moyennes $d_{ZneStuFrm}$, et pour les autres ressources, il y a baisse de la quantité de bois disponible. Certains détails méritent toutefois d'être élucidés. Ils concernent la majoration des ressources pour autoravitaillement et le sort des ressources non épuisées.

La majoration des ressources pour autoravitaillement

Les densités de bois avec lesquelles sont effectués les calculs représentant la dynamique des ressources ligneuses naturelles ($d_{ZneStuFrm}$, d^{eq}_{ClmFrm} ...) correspondent au bois commercialisable.

Alors que celui qui coupe du bois pour la commercialisation n'utilise que les branches dépassant un certain diamètre, l'autoravitailleur est moins exigeant : il emporte aussi des petites branches¹⁸. Les ressources ligneuses devraient donc être multipliées par un facteur de majoration pour être exprimées en termes de bois d'autoravitaillement.

Dans le modèle, la soustraction des volumes prélevés aux volumes disponibles (en vue de la détermination des nouvelles densités) doit être faite en termes de bois commercialisable. Les volumes prélevés par les ménages auto-ravitailés sont donc divisés au préalable par un facteur de majoration $MajorBois_{Zne}$.

Si on suppose que le bois commercialisable correspond aux tiges de diamètre > 7 cm (cf tab. 3.1), et que le bois exploité par les ménages auto-ravitailés correspond aux tiges de diamètre > 4 cm, on peut utiliser comme valeur de $MajorBois$ (toutes zones) le rapport des volumes estimé par le CTFT (1981), qui est de 1,4.

Cette majoration des ressources s'applique :

- aux ressources ligneuses naturelles,
- au bois des défrichements,
- à la production des aménagements forestiers à usage rural si leur production est exprimée en termes de bois commercialisable.

La productivité des surfaces agricoles peut être considérée exprimée en termes de bois pour autoravitaillement (c'est le cas dans le tableau 3.3)

Le sort des ressources non épuisées

- Lorsque les ménages auto-ravitailés n'utilisent pas toute la production des surfaces agricoles, on peut considérer que le solde est perdu (pourri, brûlé...), qu'il n'y a donc pas de commercialisation ni de stockage interannuel.
- Le bois des défrichements, plus "dense", est commercialisable¹⁹. Le solde se retrouvera donc parmi les ressources disponibles pour la commercialisation, mais on peut supposer qu'il n'y a pas de stockage interannuel.

¹⁸ Les charbonniers utilisent certes quelques petites branches pour couvrir les meules, mais la plus grande partie n'en est pas utilisée.

¹⁹ Des permis de carbonisation peuvent être obtenus auprès des IREF pour du bois de défrichement.

- Le solde de la production des forêts aménagées à usage rural est commercialisable, au même titre que le bois des défrichements.

Le traitement des demandes non satisfaites

Lors d'une simulation de la dynamique des ressources ligneuses, il se peut que les ressources disponibles d'une zone soient insuffisantes et qu'il apparaisse une "demande non satisfaite", différence entre la consommation de bois combustible du milieu rural et la somme des volumes disponibles.

Dans l'état actuel de la modélisation, il appartient alors au scénariste de modifier la part des ménages auto-ravitailés ou les parts des combustibles utilisés (cf § 5.1.3)²⁰.

3.3.4 Les coupes pour la commercialisation (fraude et quotas)

Lorsque les prélèvements de bois combustible ne se font pas pour autoravitaillement (ou pour le ravitaillement des marchés locaux), ils se font pour la commercialisation, sous forme de bois de feu ou de charbon de bois, sur le marché interconnecté.

Les deux principales questions qui seront abordées dans ce paragraphe sont :

- a) Quelles sont les quantités R_{Zne} que l'on peut considérer disponibles dans chaque zone, lors de la simulation de la formation des prix ?
- b) Quelle est la répartition des quantités prélevées par zone sur les ressources accessibles ?

Les réponses à ces questions dépendent partiellement de la politique de l'Etat, qui peut fixer des quotas de production dont le prélèvement est autorisé.

Cependant, une partie importante de la production échappe au contrôle de l'Etat : la fraude. La réponse aux questions a) et b) ci-dessus passe donc par une étude du comportement des fraudeurs pour évaluer la répartition de la fraude sur les ressources accessibles.

²⁰ Pour qu'une simulation ne s'arrête pas en cours de route, les demandes non satisfaites sont ajoutées à la consommation du marché, mais apparaissent parmi les résultats de la simulation

La fraude

Un phénomène difficilement maîtrisable

La fraude peut être définie à différents niveaux de la filière de production et de commercialisation d'un combustible ligneux : une production frauduleuse peut par exemple être légalisée avant le transport. Nous y reviendrons au début du chapitre 4. Ci-dessous, une production sera considérée frauduleuse dès que sa localisation échappe au contrôle de l'Etat, à condition toutefois qu'il s'agisse de ressources ligneuses naturelles.

Il ne serait pas possible de maîtriser complètement la fraude, surtout en raison de l'immense étendue des surfaces en jeu, à laquelle s'associe l'extrême pauvreté de certains éléments de la société, toujours prêts à courir des risques importants dans l'espoir d'obtenir un maigre profit.

Les principaux facteurs dont dépend l'ampleur de la fraude sont :

1. la disponibilité de ressources ligneuses
2. l'existence d'une classe sociale suffisamment pauvre pour se livrer à la fraude
3. les prix des combustibles ligneux sur le marché
4. la rigueur des mesures prises pour combattre la fraude

On peut dire que tant qu'il existera des ressources ligneuses, et tant que le Sénégal demeurera un pays pauvre, l'ampleur de la fraude ira croissante avec le revenu que peuvent procurer les combustibles et décroissante avec la rigueur des mesures prises à son encontre.

Simulation de la fraude

En raison du manque de données concernant la fraude, il n'est pas possible de déterminer de relation quantitative entre l'ampleur du phénomène et ses variables explicatives.

Il faudra donc se contenter, lors des simulations, de faire des scénarios sur l'évolution future des prélèvements frauduleux. Deux ensembles de variables exogènes permettent la simulation :

- La part de la fraude $PartFraude$ dans le total national des prélèvements sur les ressources ligneuses naturelles. Pour simplifier les calculs, $PartFraude(t)$ est supposée être la part représentée l'année t par le volume de la fraude dans le total national de l'année $t-1$.
- Les "préférences" (cf § 3.3.2 et 3.3.3) $PrefFraudeZneStuFrm$ permettent de ventiler la production frauduleuse nationale sur les unités forestières.

La quantité totale produite frauduleusement dans une zone Zne sera ci-dessous désignée par $R_{\text{fraude}}^{\text{Zne}}$.

La part nationale actuelle de la fraude peut être estimée en faisant la différence entre la consommation nationale de combustibles ligneux sur le marché interconnecté et le total des quotas contrôlés par la DEFC (quotas initiaux et supplémentaires). On obtient environ 30 %²¹.

Quant aux "préférences" des fraudeurs, elles sont très difficiles à évaluer. D'un côté, la production frauduleuse rapporte plus lorsqu'elle se situe près des grands centres de consommation. De l'autre, les fraudeurs échappent plus facilement aux contrôles dans les endroits reculés. Les informations disponibles sont contradictoires : d'après les statistiques de la DEFC pour 1988 et 1989, seulement 16 % du charbon saisi pour cause de fraude provenait des régions de Tambacounda et Kolda. Or, selon Bassirou DIEDHIOU, ancien Directeur de la Production aux Eaux et Forêts, ce sont précisément ces mêmes zones où l'on rencontre le plus de fraudeurs.

Dans les scénarios du chapitre 6, il a été admis en règle générale que les prélèvements frauduleux étaient proportionnels au bois disponible ("préférences" uniformes), en dehors des parcs nationaux.

La distribution spatiale des quotas

La distribution spatiale des quotas de production de combustibles ligneux est décidée par la DEFC. Les variables exogènes qui la traduiront seront donc des variables de décision.

Avant que ne soient fixés les quotas des ressources ligneuses naturelles, il s'agit de tenir compte des autres ressources disponibles :

- 1) La production des forêts aménagées (solde de celles à usage rural et totalité de la production des autres).

²¹ - Consommation nationale urbaine en 1990 (tab. 2.4) = 1 026 000 t. D'où en 1989 environ $1\,026\,000/1,03 = 996\,000$ t.

- Charbon contrôlé par la DEFC en 1989 : 1 509 000 quintaux. En supposant que 1 sac de "50 kg" pèse 45 kg, et que le rendement pondéral de la carbonisation est de 20 % (cf annexe 2.2), le charbon contrôlé est équivalent à $1\,509\,000 \times 45/50 \times 0,2 = 679\,000$ t.

- Bois contrôlé par la DEFC en 1989 : 54 500 stères \times 270 kg/stère = 15 000 t.

- Part de la fraude : $1 - [(679\,000 + 15\,000)/996\,000] = 30,3$ %

- 2) Le solde, après satisfaction des besoins des ménages ruraux, du bois des défrichements²².
- 3) Une partie $PartDesZne$ (exogène) du bois mort des surfaces désertifiées²³.

Le total pour la zone Zne de ces autres ressources disponibles sera désigné par R^{autres}_{Zne} .

Par conséquent, nous pouvons admettre que le total des quotas de bois combustible à prélever dans les ressources ligneuses naturelles s'obtient en soustrayant

$$\sum_{Zne} R^{autres}_{Zne} \text{ et } \sum_{Zne} R^{fraude}_{Zne} \text{ à la consommation nationale.}$$

La ventilation du total des quotas des ressources ligneuses naturelles sur les unités forestières peut à nouveau être simulée à l'aide de "préférences" : la quantité prélevée dans une unité forestière est supposée proportionnelle à la quantité de bois accessible et à une variable exogène $PrefQuotasZneStuFrm$.

- Une gestion des prélèvement "équilibrée" dans le sens où les prélèvements sont proportionnels au bois accessible est obtenue avec des "préférences" uniformes.
- Des "préférences" de la forme $(d / d^{eq})^n$ avec n élevé (par ex. $n = 3$) permettent de soulager les unités forestières fortement exploitées par le passé.

Les ressources disponibles pour la commercialisation

En raison des interactions entre l'offre et la consommation, nous devons admettre que la consommation nationale exacte de bois combustible du marché interconnecté n'est pas connue lorsque sont effectués les calculs de l'offre. Néanmoins, ceux-ci ne peuvent être faits que si les ressources disponibles R_{Zne} sont connues.

Une façon de résoudre ce problème consisterait à redéterminer les ressources disponibles avant chaque série de calculs de l'offre, lors de la recherche du point de fonctionnement du marché, en fonction des consommations à satisfaire. Il est cependant plus simple de déterminer une fois pour toutes les ressources disponibles dans la plupart des zones et de ne réajuster lors des itérations que les ressources disponibles dans certaines "zones-tampon".

²² En 1989, la quasi totalité de la production commercialisée de la région de Kolda provenait des défrichements de la vallée de l'Anambé (DEFC).

²³ En 1984, une importante partie de la production nationale de charbon provenait des "cimetières de bois" du Ferlo (THIAM, 1984).

Une ventilation des prélèvements sur les ressources ligneuses naturelles sera donc effectuée à partir de la consommation nationale de bois combustible de l'année précédente, ce qui permet d'obtenir des volumes $R^{\text{init}}_{\text{Zne}}$ disponibles par zone. Les volumes supplémentaires qu'il faut attribuer aux zone-tampons pour que la consommation de chaque partie du marché soit égale aux ressources disponibles sera notée $R^{\text{suppl}}_{\text{Zne}}$ (nulle si Zne n'est pas une zone-tampon).

Finalement, on a :

$$R_{\text{Zne}} = R^{\text{autres}}_{\text{Zne}} + R^{\text{fraude}}_{\text{Zne}} + R^{\text{init}}_{\text{Zne}} + R^{\text{suppl}}_{\text{Zne}}$$

L'enregistrement des prélèvements

Lorsque le point de fonctionnement du marché est trouvé, $R^{\text{suppl}}_{\text{Zne}}$ a pris sa valeur définitive. Les différents prélèvements doivent alors être enregistrés, comme dans le cas de l'autoravitaillement :

- Les ressources "autres" peuvent être supposées épuisées, sauf la partie non exploitée du bois mort des surfaces désertifiées, dont une partie pourrit (cf § 3.2.3) alors que l'autre constitue un stock initial pour l'année suivante.
- Les prélèvements frauduleux se traduisent par des baisses de densité moyenne pour les unités forestières . Rappelons que $R^{\text{fraude}}_{\text{Zne}}$ a été obtenu à partir d'une ventilation d'une quantité nationale sur les unités forestières du pays. Les quantités prélevées par unité forestière sont donc connues.
- Les prélèvements autorisés $R^{\text{quotas}}_{\text{Zne}} = R^{\text{init}}_{\text{Zne}} + R^{\text{suppl}}_{\text{Zne}}$ peuvent être ventilés sur les unités forestières de la zone à l'aide des "préférences" de la zone. Ces prélèvements se traduisent également par des baisses de densité moyenne.

Avec l'enregistrement des prélèvements se terminent les calculs annuels effectués lors d'une simulation de l'évolution du marché des combustibles domestiques, et avec ce paragraphe se termine la revue des phénomènes modélisés - à l'exception de la dégradations des sols, qui fait l'objet de la section 3.4 suivante.

3.4 DEBOISEMENT ET DEGRADATION DES SOLS

Parmi les conséquences que peut avoir une dégradation de la couverture ligneuse, les dommages causés aux sols méritent une attention toute particulière. En effet, ces dommages sont le plus souvent irréversibles. Par exemple, les vitesses d'érosion hydrique ou éolienne après défrichage sont en général sans commune mesure avec la vitesse de genèse du sol. Par ailleurs, la dégradation d'un sol n'est le plus souvent que le premier maillon d'une chaîne de dommages dans l'environnement naturel de l'homme. Par exemple, l'encroûtement d'un sol de plateau dont la végétation a été dégradée provoque un ruissellement accru. Celui-ci peut être à l'origine d'une érosion en nappe sur des terres de culture situées en aval, puis de coupures de voies de communication (routes, voies de chemin de fer, ...) par érosion linéaire, et finalement d'un ensablement de plaines cultivées ou de réservoirs d'eau.

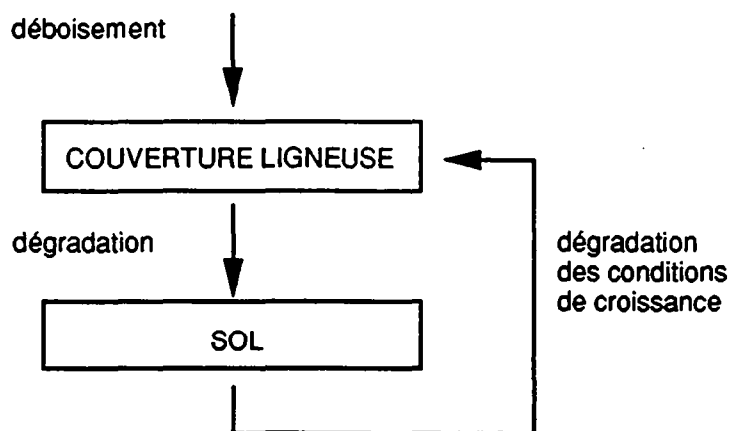


Fig. 3.11 Les interactions sol-couverture ligneuse après déboisement

L'une des conséquences les plus graves de la dégradation des sols est certainement son effet sur les possibilités de régénération des ressources forestières elles-mêmes. Comme indiqué à la figure 3.11, une dégradation du sol, qui fait suite à un déboisement affectant la couverture ligneuse, signifie en général une détérioration des conditions de croissance de la couverture ligneuse.

Etant donné les conséquences que peut avoir la dégradation des sols, une bonne gestion des ressources forestières doit nécessairement tenir compte de la nature du sol et des risques de dégradation associés. Ceci d'autant plus qu'en raison de la forte demande de combustibles ligneux, des prélèvements sur le capital forestier ne sont peut-être pas toujours évitables.

Ci-dessous, nous commencerons par jeter un regard sur les découpages géologiques et pédologiques du Sénégal avant de situer les principaux phénomènes de dégradation des sols à l'intérieur des grandes unités pédo-géomorphologiques.

Ensuite, nous analyserons chacun de ces phénomènes de dégradation des sols en indiquant les sols les plus sensibles et en prêtant une attention particulière au rôle joué par la couverture ligneuse. Nous aborderons successivement :

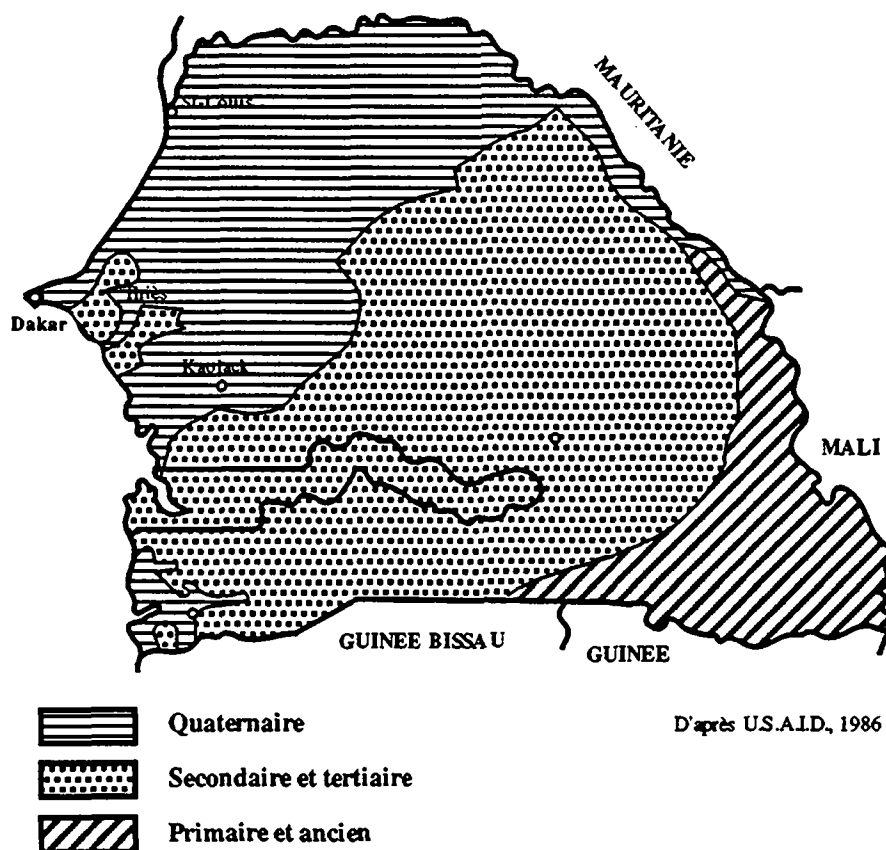
- l'érosion hydrique
- l'érosion éolienne
- la salinisation et l'acidification des sols de mangroves
- l'appauvrissement des sols suite au défrichement
- la transformation des sols rouges et le cuirassement.

Cette analyse des phénomènes de dégradation des sols débouchera sur une proposition de modélisation des dégradations des sols, qui fait intervenir le découpage géographique des ressources ligneuses naturelles, et des niveaux de risque de dégradation par mode de dégradation des sols.

3.4.1 La dégradation des sols : formes, localisation et liens avec le déboisement

Le cadre géologique et pédologique

Le Sénégal est un pays extrêmement plat. Plus de 90 % de sa surface se situent à moins de 100 m d'altitude. On y distingue trois grands *ensembles géologiques*, dont la disposition est représentée sur la carte 3.4.

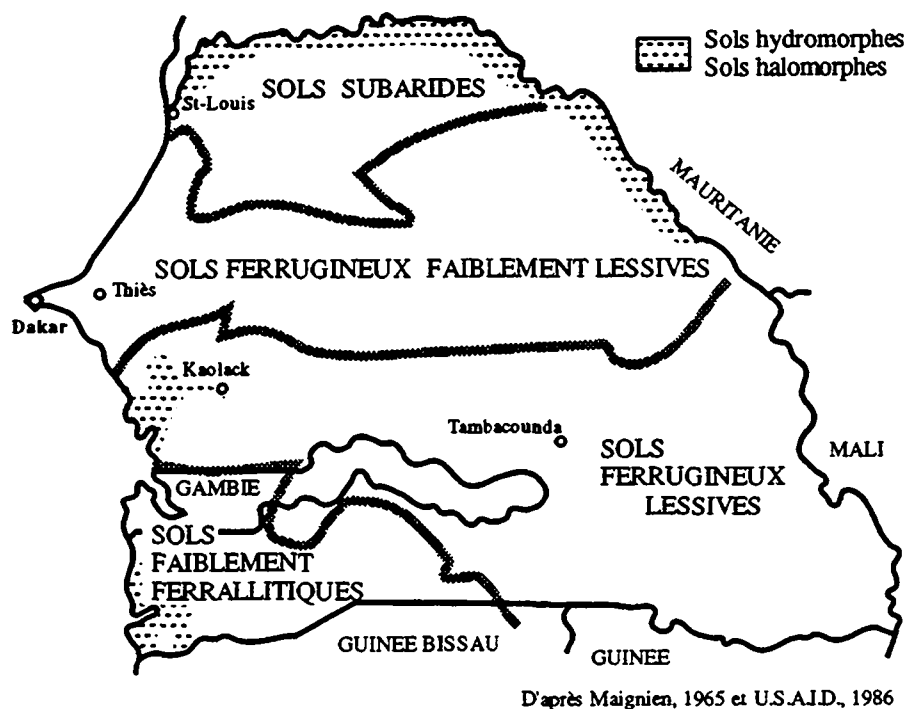


Carte 3.4 Le découpage géologique du Sénégal

- *Le socle ancien* et quelques sédiments paléozoïques affleurent dans le Sud-Est du pays. Ces formations sont les seules qui présentent un relief appréciable, mises à part quelques élévations dans la presqu'île du Cap Vert et en bordure de celle-ci.
- *Le bassin sédimentaire secondaire et tertiaire* est composé de différentes formations marines et du "Continental Terminal", la formation dominante.
- *Les formations quaternaires* regroupent :
 - les dépôts éoliens sableux qui recouvrent le Nord et l'Ouest du pays,
 - les dépôts sédimentaires littoraux et deltaïques,
 - les dépôts alluviaux et colluviaux du réseau hydrographique,
 - les formations volcaniques récentes de la presqu'île du Cap Vert.

Le découpage pédologique usuel du Sénégal (MAGNIEN, 1965, USAID, 1986), établi sur la base de la Classification Française des Sols, place au premier plan le processus pédogénétique prépondérant. Ce découpage est représenté sur la carte 3.5.

- *Les sols subarides* se sont développés sous conditions de semi-aridité prononcée et sous une végétation de type steppique. Leur morphologie est dominée par une pénétration de matière organique bien humifiée, dont la teneur décroît progressivement jusqu'à la base du profil, et par une individualisation poussée des oxydes de fer. Leur couverture végétale est une steppe arbustive, rarement arborée. Le principal mode de dégradation de ces sols formés sur les dépôts sableux quaternaires est l'érosion éolienne.



Carte 3.5 : Les grands groupes de sols du Sénégal

- *Les sols ferrugineux tropicaux faiblement lessivés* (peu ou pas lessivés) sont typiques des climats chauds à saison sèche marquée et précipitations faibles. Les argiles sont essentiellement pauvres en silice²⁴. Ils se caractérisent principalement par la présence d'un horizon B de couleur ocre formé par l'accumulation de fer rubéfié provenant des horizons de surface.
- *Les sols ferrugineux tropicaux lessivés* se distinguent des précédents par l'argilluviation et la formation d'un horizon Bt d'accumulation. La kaolinite domine largement. L'accumulation de fer est plus intense, et des cuirasses ferrugineuses affleurantes ou sub-superficielles accompagnent ces sols sur la plus grande partie de leur domaine.

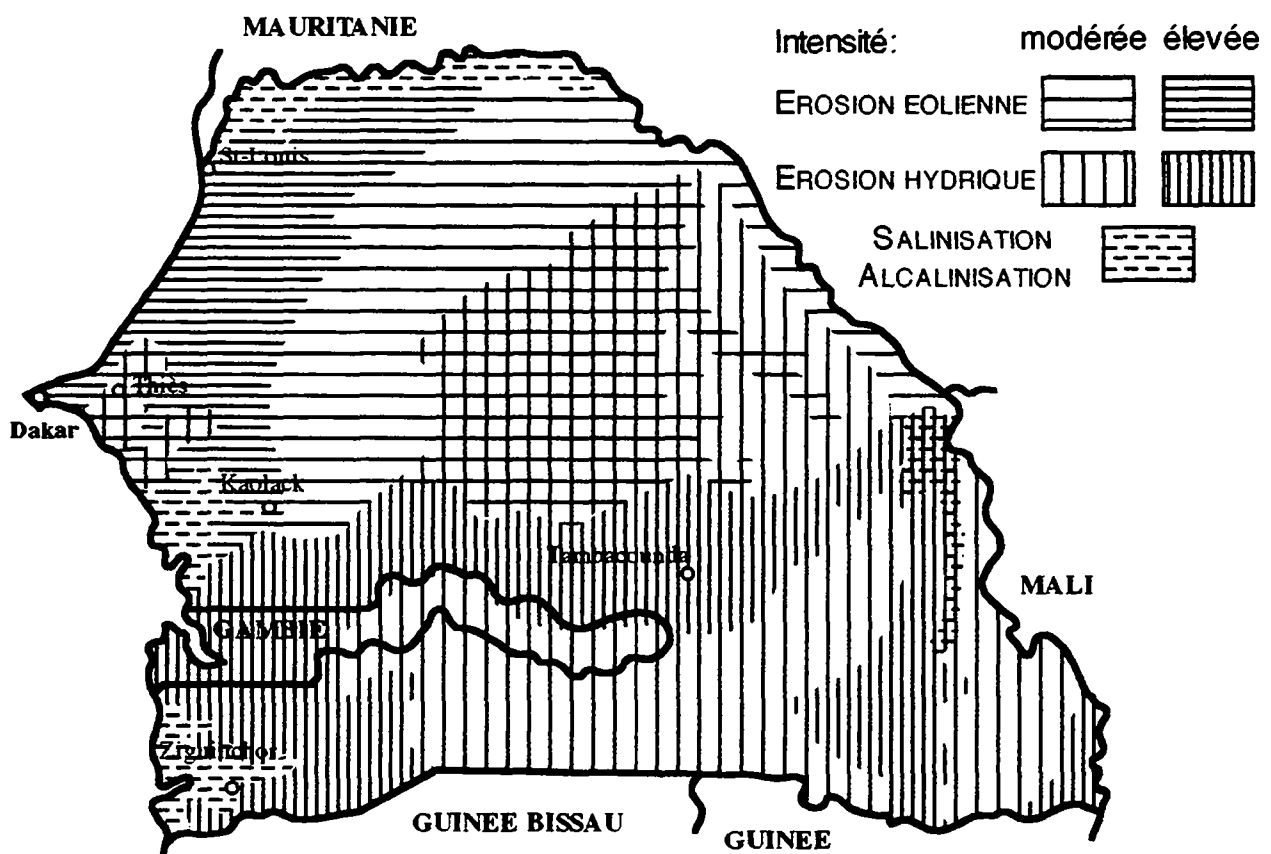
²⁴ la kaolinite, de type 1:1 (1 Si pour 1 Al), généralement néoformée, domine sur les argiles micacées résiduelles de type 2:1

- *Les sols faiblement ferrallitiques* sont caractéristiques d'un climat plus humide et ne se rencontrent que dans le Sud-Ouest du pays. Leur profil est profond, peu différencié, et ils sont généralement bien drainés. Les argiles sont presque exclusivement du type pauvre en silice (kaolinite).

Les quatre grands groupes de sols présentés ci-dessus sont zonaux, c'est-à-dire que la pédogénèse y est largement influencée par les caractéristiques de la zone climatique dans laquelle ils se situent. Parmi les sols que l'on peut qualifier d'azonaux se trouvent les sols halomorphes et les sols hydromorphes, largement représentés dans les zones estuariennes et dans les vallées des fleuves, notamment celle du fleuve Sénégal.

La dégradation par grands ensembles pédo-géomorphologiques

Les processus dominants de dégradation des sols au Sénégal et leur intensité potentielle (avec lesquelles ces processus risquent de se manifester en cas de mauvaise gestion des sols) sont représentés sur la carte 3.6.

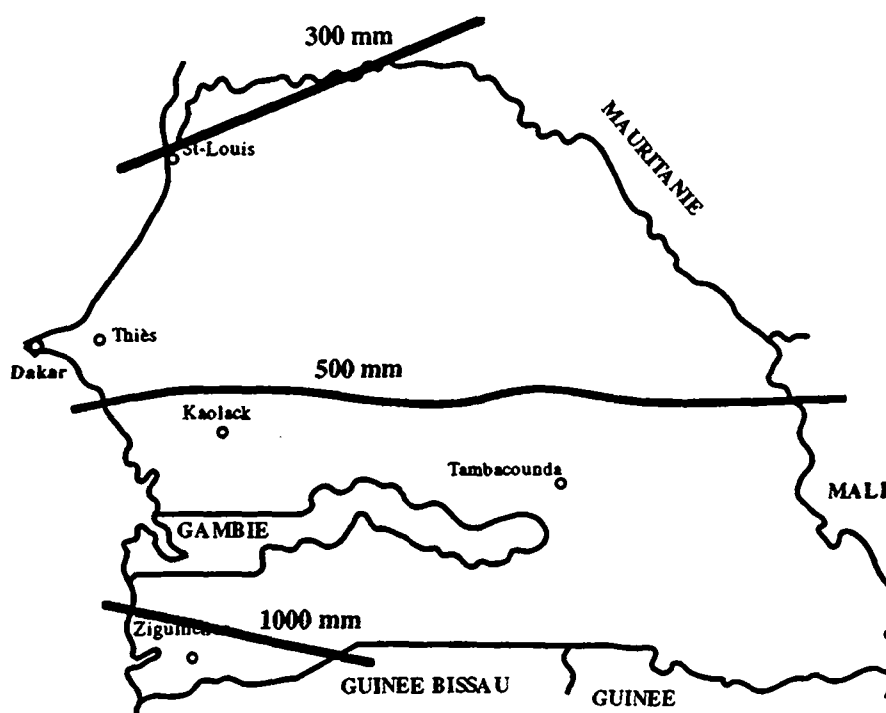


Carte 3.6 : Les risques de dégradation des sols au Sénégal - Processus dominants

Sources : DAT, 1984 (d'après FAO-UNEP-UNESCO); GAVAUD, 1989; USAID, 1986

Cette carte s'inspire essentiellement d'un découpage pédo-géomorphologique du Sénégal obtenu en croisant le découpage pédologique de la carte 2 avec un découpage géomorphologique, dont une première approximation est donnée par le découpage géologique de la carte 1. L'intensité des processus de dégradation reflète cependant aussi la distribution spatiale de certains autres facteurs, comme la pluviométrie, l'agressivité des vents, l'état de la couverture végétale. Bien entendu, des conditions locales dont il n'est pas possible de tenir compte à l'échelle utilisée ici donnent par endroits naissance à des intensités très différentes de celles qui ont été représentées, ainsi qu'à d'autres processus de dégradation, sur lesquels nous reviendrons plus loin : appauvrissement des sols et cuirassement.

L'érosion éolienne et l'érosion hydrique sont les deux principaux processus de dégradation à grande échelle des sols du Sénégal. Outre les conditions pédo-géomorphologiques sur lesquelles nous reviendrons plus loin, ces processus dépendent tous deux plus ou moins directement d'un même facteur climatique : les précipitations.



Carte 3.7 : Précipitations moyennes annuelles (1968-1984)

D'après LE BORGNE, 1988

Les précipitations annuelles croissent en gros du Nord au Sud (voir carte 3.7). Elles influencent directement l'érosion hydrique à travers les quantités d'eau pouvant atteindre le sol et indirectement les deux processus d'érosion à travers la couverture végétale.

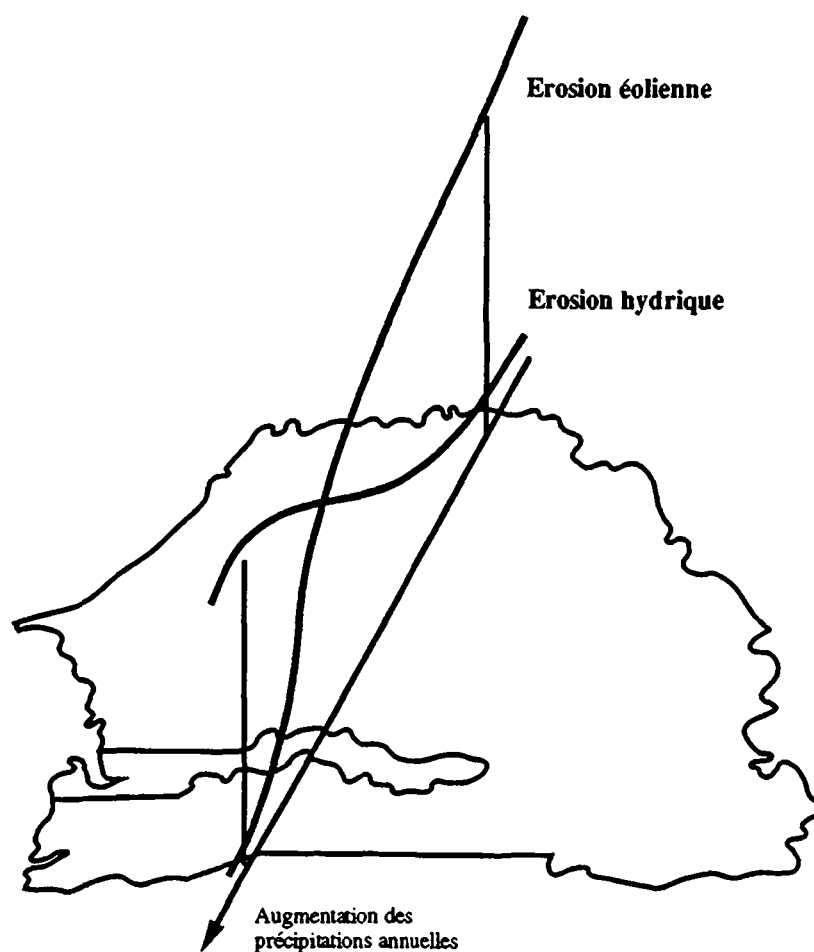


Fig. 3.12 Intensités de l'érosion hydrique et de l'érosion éolienne sous végétation naturelle

Au Nord, dans les zones des sols subarides et ferrugineux tropicaux faiblement lessivés, les précipitations sont trop faibles pour provoquer une érosion hydrique appréciable. En revanche, l'absence de végétation dense profite à l'érosion éolienne. Si nous descendons plus au Sud, la vitesse du vent au sol, et par conséquent l'intensité de l'érosion éolienne, diminuent en raison de la densité croissante de la végétation. Cette densité n'est cependant pas encore suffisante pour constituer un obstacle sérieux à l'érosion hydrique dont l'intensité augmente dans un premier temps. Ce n'est que plus au Sud que l'effet protecteur de la végétation l'emporte sur l'érosivité des pluies et que diminue l'intensité de l'érosion hydrique. Ces variations schématisées du Nord au Sud des intensités des deux processus d'érosion sont représentés à la figure 3.12.

L'érosion éolienne dépend en outre dans une large mesure d'un autre facteur climatique : la vitesse du vent. Les vitesses du vent en moyenne plus élevées le long de la côte Nord-Ouest (voir carte 5 ci-après) expliquent le niveau plus élevé du risque d'érosion éolienne dans cette zone. La nature plus cohésive des sols de l'Est sur Continental Terminal est, quant à elle, à l'origine d'une baisse progressive du niveau de risque vers l'Est du pays.

La géomorphologie explique l'augmentation du risque d'érosion hydrique vers le Sud-Est : on y rencontre en effet de nombreuses situations en pente, favorables à ce type d'érosion. Quant au domaine des sols ferrallitiques du Sud-Ouest, il est sensible en raison de la transformation potentielle des sols rouges en sols beiges, qui sera discutée plus loin.

Les risques de salinisation et d'alcalinisation, également représentés sur la carte 3.7, sont largement liés à des conditions hydrologiques et pédologiques particulières : présence de sols halomorphes, hydromorphes ou vertiques, présence d'une nappe saline, existence d'un potentiel d'irrigation élevé. Nous ne reviendrons sur les risques de salinisation et d'alcalinisation que pour traiter le cas des sols de mangrove, le seul où la végétation ligneuse semble jouer un rôle important. Par contre, nous nous attarderons d'avantage sur les processus d'érosion hydrique et éolienne, ainsi que sur la transformation des sols rouges.

L'érosion hydrique

L'érosion forte : un phénomène inacceptable

L'érosion, qu'elle soit de nature hydrique ou éolienne, n'est pas nécessairement cause de dégradation d'un sol.

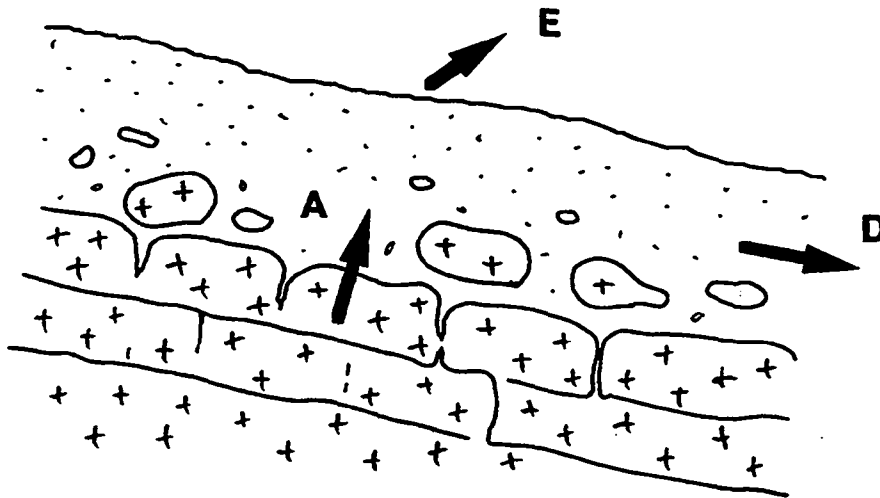


Fig. 3.13 Erosion et pédogenèse

L'illustration ci-dessus montre de façon simplifiée comment les effets de l'érosion peuvent être compensés par la pédogenèse (d'après KIRKBY, 1980) : Si la vitesse d'altération de la roche est A et si les éléments solubles sont évacués après dissolution à une vitesse D, l'érosion ne

dégradera pas le sol tant que sa vitesse E vérifie $E \leq A-D$. Une érosion dont la vitesse est proche de celle de formation du sol est donc tout à fait acceptable.

Au Sénégal cependant, sur presque tout le territoire, l'érosion dépasse de loin les valeurs acceptables : sur de grandes superficies, l'érosion enlève aujourd'hui plus de 200 tonnes par hectare et par an (D.A.T., 1984), soit une couche de plus de 1 cm, en supposant que la densité apparente du sol est de l'ordre de $1,8 \text{ kg/dm}^3$. Ce chiffre est à comparer à la vitesse de formation des sols tropicaux. En supposant qu'un mètre de sol se forme en 10 000 ans, on obtient 0,1 mm/an, soit 100 fois moins que la vitesse d'érosion ci-dessus. Pourtant, ce chiffre est encore optimiste, car les sols tropicaux ont souvent plusieurs centaines de milliers d'années.

Au rythme où va l'érosion, et surtout si elle est accentuée par le déboisement, une grande partie des sols sénégalais risque d'être sévèrement dégradée d'ici quelques dizaines d'années.

Les mécanismes de l'érosion hydrique

L'impact des gouttes d'eau sur le sol est de plus en plus reconnu comme le moteur de l'érosion hydrique alors que le ruissellement de l'eau servirait essentiellement la fonction de transport : les gouttes d'eau détachent les particules de sol qui seront ensuite emportées par le ruissellement. L'expérience de HUDSON et JACKSON en Rhodésie a permis de mettre en évidence l'effet de l'impact des gouttes d'eau, le "*splash*" ou le rejaillissement. Sur une parcelle de sol recouverte d'une gaze (ou moustiquaire) métallique tendue à 10 cm du sol, l'érosion a été environ 100 fois inférieure à celle mesurée sur la parcelle-témoin non couverte (HUDSON, cité p. ex. par RIOU, 1989).

L'action des gouttes d'eau au niveau des agrégats du sol se manifeste sous différentes formes (RIOU, 1989) :

- actions mécaniques dues à l'énergie cinétique des gouttes de pluie : taraudage, éclatement et rejaillissement de particules,
- actions liées à la nature de l'eau : désagrégation par imbibition.

Les structures superficielles initiales du sol une fois détruites, on peut assister à la formation de *pellicules de battance* par redistribution des éléments du sol en fonction de leur granulométrie. En général, les éléments fins sont rapidement entraînés en profondeur dans les fentes de retrait et autres vides, ce qui produit un colmatage du profil à quelques millimètres (argiles) ou centimètres (sables) de profondeur et déclenche le ruissellement.

Le ruissellement assure l'essentiel du transport des matériaux érodés. Cependant, sur une forte pente, le rejaillissement peut lui aussi déplacer des éléments grossiers sur des distances

remarquables. Inversement, le ruissellement contribue lui aussi à la désagrégation du sol, surtout lorsque l'écoulement est turbulent. On distingue les ruissellements en nappe, qui peuvent être à l'origine d'érosions en nappe, et les écoulements concentrés ou linéaires, à l'origine du creusement des rigoles, ravines et ravins.

L'équation universelle

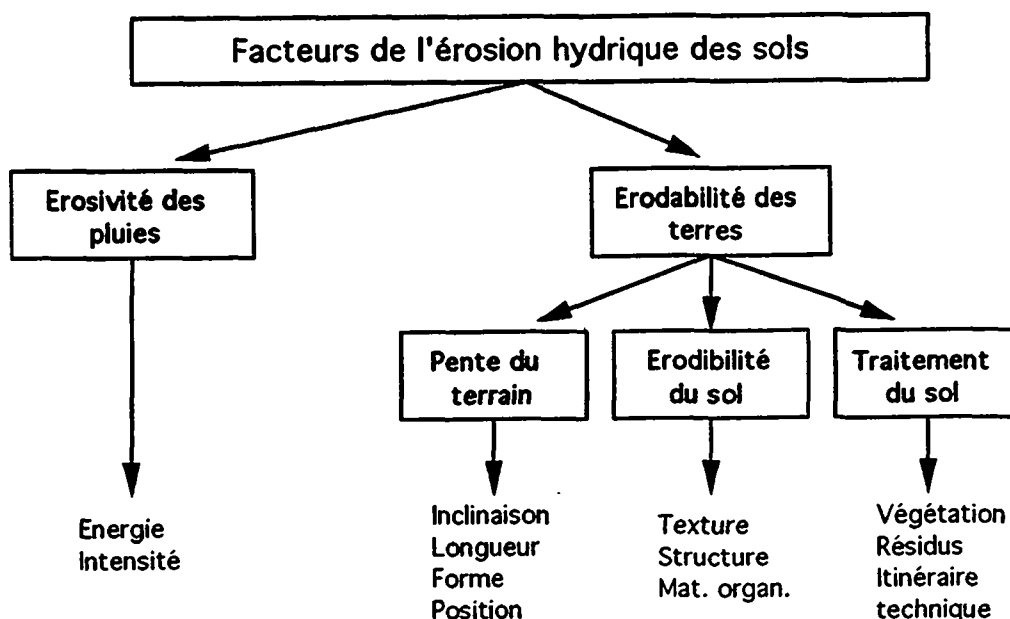


Fig. 3.14 Facteurs et paramètres d'influence de l'érosion hydrique des sols

D'après BARIL (1991)

Comme le montre la figure 3.14, les pertes de terre par érosion hydrique sont fonction de l'érosivité des pluies et de l'érodabilité du sol. Cette dernière dépend de l'érodibilité du sol (qui peut être mesurée dans des conditions standardisées) et de divers facteurs qui traduisent l'influence des conditions locales.

L'équation "universelle" des pertes de sol par érosion hydrique (Universal Soil Loss Equation, USLE) de WISCHMEIER et SMITH est donnée par :

$$A = f \cdot R \cdot K \cdot L \cdot S \cdot C \cdot P \quad (\text{voir par ex. MITCHELL et BUBENZER, 1980}).$$

Dans cette équation, les pertes de terres totales A sont estimées par le produit d'une série de facteurs supposés indépendants les uns des autres.

- A : pertes de terres
 f : constante tenant compte des unités utilisées
 R : érosivité des pluies

K	:	facteur sol (mesure l'érodibilité du sol)
L	:	facteur longueur de pente
S	:	facteur intensité de pente
C	:	facteur couverture végétale
P	:	facteur aménagements anti-érosifs.

Les sols sensibles à l'érosion hydrique

- Les sols fins sont plus sensibles à l'érosion que les sols grossiers, en raison de leur faible perméabilité. C'est pour cette raison que les sols ferrugineux tropicaux sont généralement plus sensibles que les sols ferrallitiques (ROOSE, 1981). C'est partiellement pour cette raison aussi que les sols sur dépôts éoliens récents du Ferlo Occidental sont moins sensibles à l'érosion hydrique que ceux du Ferlo-Est.
- Les sols en forte pente sont plus sensibles que les sols en faible pente, principalement en raison de l'énergie cinétique élevée que peut acquérir l'eau de ruissellement.
- Les sols dénudés sont beaucoup plus menacés que les sols couverts de végétation. Dans l'expérience de HUDSON et JACKSON citée ci-dessus, un tapis dense de graminées s'est avéré tout aussi efficace contre le splash que la gaze métallique. Lorsque les tiges des graminées sont nombreuses, ces dernières ralentissent les nappes de ruissellement jusqu'à provoquer une décantation importante et arrêter toute érosion (RIOU, 1989).

Des couvertures herbacées sont généralement présentes dans les zones de savane et de steppe du Sénégal, mais elles sont souvent détruites par des feux de brousse, dont l'effet est d'autant plus fort que les feux sont tardifs.

ROOSE (cité par ORSTOM-Unesco, 1983) fait état d'observations en Haute Volta où l'érosion passe de 30 kg/ha.an sous végétation protégée à 150 kg/ha.an avec feux précoces et 400 kg/ha.an avec feux tardifs. Le surpâturage est un autre facteur de destruction de la couverture herbacée.

Le rôle joué par la couverture ligneuse dans la prévention de l'érosion sera traité plus loin.

Les conséquences de l'érosion hydrique

La première conséquence de l'érosion hydrique est évidemment le départ irréversible de sol, surtout d'éléments fins. Cependant, les effets secondaires de l'érosion hydrique sont non moins déplorable:

- la formation de croûtes superficielles de différentes natures, dont les croûtes structurales issues des pellicules de battance déjà mentionnées, limite considérablement l'infiltration et gêne la levée des semences de tout genre (VALENTIN, 1989)
- la limitation de l'infiltration provoque un abaissement des nappes d'eau souterraines
- les cuirasses ferrugineuses sont mises à nu ou "se rapprochent" de la surface.

Les effets du déboisement

Une végétation naturelle en bon état constitue un excellent obstacle à l'érosion hydrique. Le rôle joué par la strate herbacée a déjà été mentionné. La strate ligneuse, pour autant qu'elle soit encore relativement dense (comme dans les savanes boisées), contribue elle aussi substantiellement à la limitation de l'érosion:

- Une petite part des précipitations est interceptée par la canopée (jusqu'à 15 % en forêt hygrophile, d'après RIOU, 1989). Cette eau s'évapore au contact des feuilles ou est absorbée directement par les tissus végétaux.
- La litière absorbe l'énergie des gouttes de pluie et protège le sol de la battance.
- Elle favorise l'activité de la mésofaune qui brasse et perfore les horizons superficiels du sol (ROOSE, 1981), augmentant la perméabilité du sol et favorisant ainsi l'infiltration des eaux de pluie.
- L'apport de cations et de matières organiques par la décomposition des feuilles mortes permet la formation de complexes argilo-humiques flocculés qui "cimentent" le sol. Cependant, le rôle de ce mécanisme est restreint sous les climats chauds en raison de la biodégradation rapide des matières organiques.

Quelques données quantitatives relatives à l'effet sur l'érosion d'une dégradation de la couverture végétale ont été rassemblées par ROOSE (1977). Pour le facteur C de l'USLE, relatif à la couverture végétale, il donne les ordres de grandeur suivants :

Forêt, fourré dense	0,001
Savane et prairie en bon état	0,01
Savane ou prairie brûlée ou surpâturée	0,1
Sol nu	1

A un autre endroit, il donne les intervalles suivants pour l'érosion elle-même :

Végétation "naturelle"	0,02-0,7 to/ha.an
Savane à pâturage "naturelle"	0,2-0,9 to/ha.an
Sous cultures	0,6-14 to/ha.an
Sol nu	14-35 to/ha.an

En Côte d'Ivoire, l'érosion mesurée sous une savane arbustive claire dégradée à Korhogo était cent fois plus élevée que celle mesurée sous une savane arbustive dense à Bouaké. Les sols des deux sites étaient des sols ferrallitiques sur granite et les pentes étaient à peu près les mêmes.

Il ne fait aucun doute que le déboisement peut déclencher une érosion hydrique sur des sols initialement non affectés par ce processus, et augmenter considérablement l'érosion sur des sols déjà touchés.

Si en milieu peu boisé (savanes et steppes arborées) la strate herbacée semble jouer un rôle plus important que la strate ligneuse dans la prévention directe de l'érosion, il convient de remarquer que la strate ligneuse joue souvent un rôle protecteur de la strate herbacée. Dans la "brousse tigrée", on remarque souvent la présence d'îlots de végétation herbacée autour des arbres et buissons alors que le reste de la surface du sol est complètement dénudé et présente un aspect glacé.

Les risques d'érosion hydrique liés au déboisement méritent donc une attention toute particulière lors de la mise au point d'une stratégie forestière, d'autant plus que c'est précisément l'inverse du déboisement, le reboisement, qui est reconnu comme le moyen le plus efficace pour lutter à grande échelle contre l'érosion, et qui devrait être pratiqué pour ramener les taux d'érosion actuels à des valeurs acceptables.

L'érosion éolienne

Les mécanismes de l'érosion éolienne

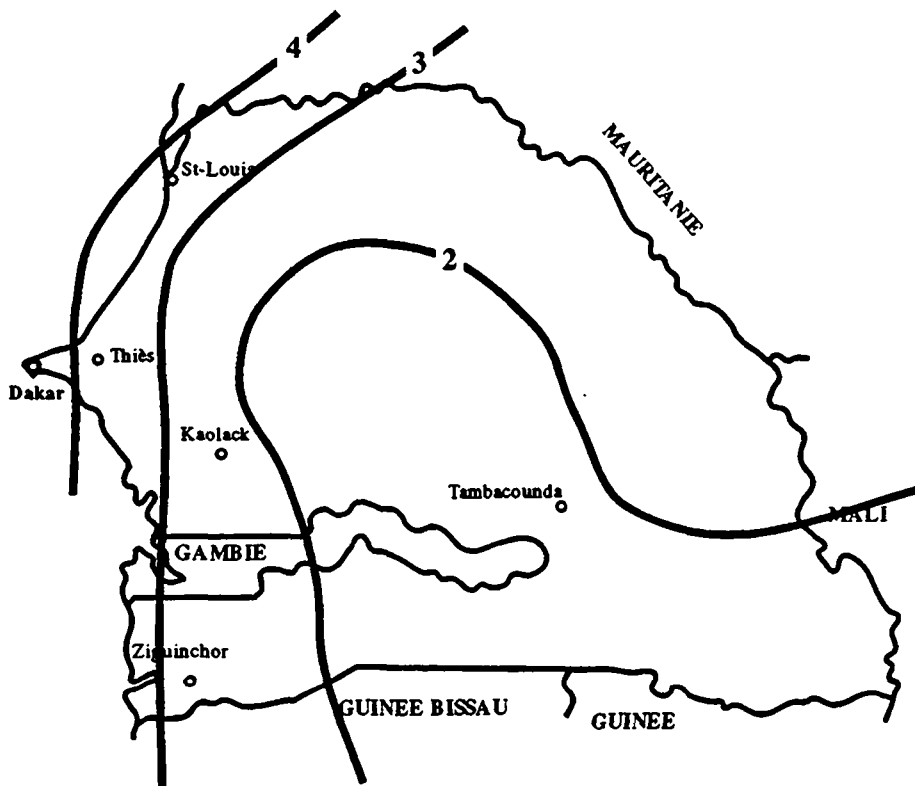
L'air s'écoulant au-dessus d'une surface plane rugueuse exerce sur cette dernière un effort rasant horizontal dans la direction du vent. Par ailleurs, les petites turbulences provoquées par la rugosité de la surface sont à l'origine de dépressions locales. C'est le phénomène de la déflation. La combinaison de ces deux actions peut détacher et mettre en mouvement des particules de sol qui seront déposées plus loin. Il faut pour cela que la vitesse du vent dépasse un certain seuil, généralement situé entre 10 et 25 km/h (WILSON et COOKE, 1986), qui dépend de la nature du sol.

Les particules de sol sont alors transportées par trois modes, selon leur diamètre (WHITE, 1987) :

- en suspension si leur diamètre est plus petit que 0,05 mm (3 à 40 % de la quantité totale transportée)
- par saltation (les particules font des bonds de plusieurs mètres) pour des diamètres compris entre 0,05 et 0,5 mm (50 % et plus)

- par reptation (les particules roulent sur la surface du sol) pour les diamètres supérieurs, jusqu'à 2 mm (5 à 25 %).

La vitesse du vent joue un rôle très important dans les phénomènes d'érosion éolienne. En dynamique des fluides, l'équation qui donne l'intensité de l'effort rasant (ou force de traînée) est $\tau = \rho U^{*2}$, où ρ désigne la densité du fluide et U^* est une grandeur proportionnelle à la vitesse du vent. Par ailleurs, des expérimentations en tunnel aérodynamique et des mesures sur le terrain ont montré que le taux d'érosion était proportionnel au *cube* de la vitesse du vent.



Carte 3.8 Lignes d'égale vitesse du vent (moyennes annuelles en m/s)

La carte 3.8 représente les lignes d'égale vitesse moyenne du vent pour le Sénégal. Cette carte ne peut donner qu'un ordre de grandeur de l'agressivité du vent. En effet, deux sites de même vitesse moyenne peuvent être soumis, l'un à des vents réguliers moyennement forts, ne provoquant que très peu d'érosion, l'autre à une alternance de vents très faibles et de vents très forts, les derniers provoquant une forte érosion annuelle. De plus, la vitesse représentée est en principe celle du vent sur une surface dégagée alors que l'érosivité réelle dépend de la vitesse au sol, fortement influencée par la végétation. Néanmoins, la région de la côte Nord-Ouest du Sénégal, dans laquelle les vitesses moyennes du vent sont les plus élevées, est précisément celle où l'érosion éolienne est actuellement la plus forte (comparer aussi avec la carte 3).

L'érodibilité des sols

L'érodibilité d'un sol dépend essentiellement de son humidité et de sa texture, ces deux propriétés étant d'ailleurs liées :

- *L'eau* dans les sols lie les particules par le jeu des forces de tension superficielle. Lorsque l'eau s'évapore, les particules du sol ne sont plus reliées les unes aux autres et le vent peut les entraîner une à une.
- Les sols à texture sableuse sont beaucoup plus sensibles à l'érosion que les sols à texture équilibrée. Sous des conditions climatiques identiques les premiers perdent rapidement l'eau par évaporation alors que des agrégats se maintiennent dans les seconds.

Au Sénégal, la texture plus sableuse des sols sur dépôts quaternaires contribue à expliquer les taux d'érosion éolienne élevés dont ils sont le siège.

Signalons encore qu'un apport régulier de matières organiques, qui rend possible la formation de complexes argilo-humiques après humification, peut avoir un effet favorable sur la résistance à l'érosion éolienne d'un sol. Nous reviendrons ci-dessous sur le rôle protecteur de la végétation ligneuse.

Les conséquences de l'érosion éolienne

Les conséquences de l'érosion éolienne sont multiples, non seulement au niveau des sols, mais aussi dans divers autres domaines:

- Départ de sol, surtout d'éléments fins et très fins, sur de grandes surfaces.
- Décapage et mise à nu des cuirasses ferrugineuses.
- Endommagement des productions agricoles et des végétaux en général :
 - déchaussement des bases des tiges dans les zones d'érosion
 - couverture des jeunes plantules obligeant les paysans à semer plusieurs fois ou submersion des champs en bon état de végétation (DELWAULLE, en 1973, cite le cas de Tahoua au Niger en 1970 où toute la récolte aurait ainsi été perdue)
 - action mécanique du sable sur les feuilles.
- Dépôts et accumulations de sable :
 - les apports de sable dans la péninsule du Cap Vert sont parfois considérables. D'après MAINGUET (1986), "*les routes des quartiers récents de Pikine et Camberene doivent régulièrement être déblayées*"

- les dunes des Niayes avancent à un rythme de 2 à 7,5 m/an (M.F. COURCEL, 1974, cité par MAINGUET, 1986), recouvrant les terres de maraîchage des bas-fonds.
- Pollution de l'air avec effets sur la santé (surtout en période d'harmattan, vent sec d'Est soufflant de novembre à mars) et modification du climat régional par transfert de rayonnement.

Le rôle de la végétation ligneuse

L'arbre joue un rôle très important dans la limitation de l'érosion éolienne et de ses conséquences :

- Essentiellement parce qu'il dévie les écoulements d'air et freine le vent près du sol. A ce sujet, le fonctionnement des haies brise-vent est un excellent exemple de ce que les arbres peuvent réaliser dans le domaine de la prévention de l'érosion éolienne (fig. 3.15).

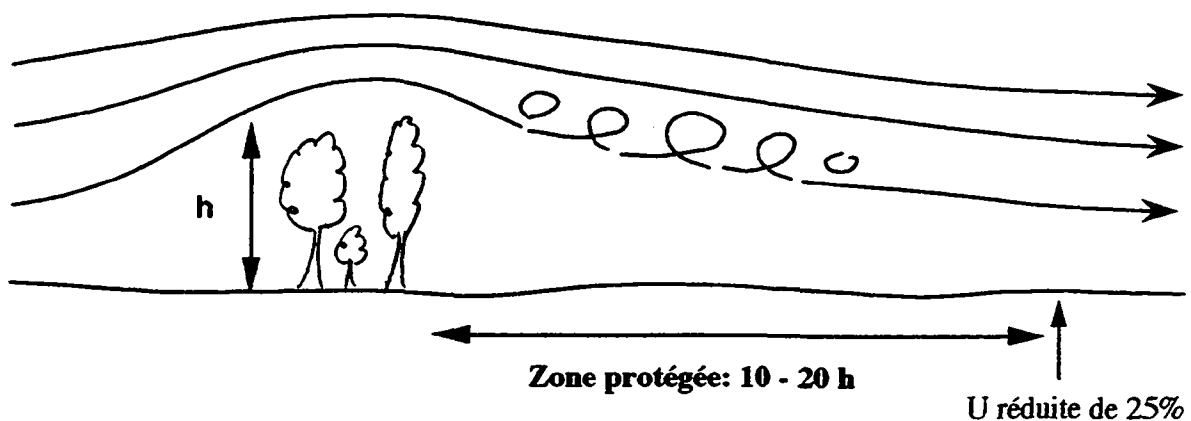


Fig. 3.15 Le fonctionnement des haies brise-vent

D'après SOLTNER, 1981

Des plantations d'arbres destinées à arrêter les effets du vent ont déjà été réalisées à grande échelle au Sénégal. C'est le cas des plantations de Filao (*Casuarina equisetifolia*) dans les Niayes. Leur efficacité n'est toutefois que partielle, entre autre en raison d'un espacement trop grand des ceintures par rapport à leur hauteur.

- Accessoirement, l'arbre protège le sol de dessiccation et le rend plus résistant par l'apport de matières organiques.

Alors que l'importance de l'arbre dans la prévention de l'érosion éolienne est reconnue à tel point que de grandes surfaces ont déjà été reboisées sur les sols sableux des Niayes, il serait absurde de s'accommoder par ailleurs de déboisements sur d'autres sols tout autant sensibles à la dite érosion. Par conséquent, la localisation et le ménagement des parcelles forestières sur

sols sensibles doivent accompagner la mise au point de toute politique énergéico-forestière cohérente.

Salinisation et acidification des sols de mangrove

Les mangroves sont l'une des formations ligneuses les plus denses du Sénégal, mais elles sont en même temps très fragiles et leurs sols risquent d'évoluer vers une hyperacidification et une salinisation les rendant totalement stériles. 162 milliers d'ha de mangroves étaient recensés fin 1978 (CTFT, 1981).

Les caractéristiques principales des sols de mangrove sont les suivantes (d'après MARIUS, 1986) :

- La marée a une influence nettement prédominante sur les apports d'eau douce. L'alcalinité ne peut se développer en raison de la circulation latérale régulière de l'eau de la nappe, dont la salinité est proche de celle de l'eau de mer.
- La présence simultanée en milieu anaérobique des sulfates de l'eau de mer et des minéraux ferriques des sols tropicaux favorise la formation par sulfatoréduction, puis l'accumulation de sulfures de fer (pyrites) FeS_2 . Ces sulfures sont à l'origine d'une très forte acidité potentielle des sols.
- Les mangroves sénégalaises sont toujours accompagnées de tannes, zones plates souvent dépourvues de toute végétation. La circulation latérale de la nappe des mangroves ne pénètre pas ces zones et la nappe locale est beaucoup plus salée que l'eau de mer. Une forte acidité ($pH < 4$) se développe par ailleurs par oxydation des sulfures.

La pauvreté en espèces végétales - il n'en existe pratiquement que trois (*Rhizophora racemosa*, *Rh. mangle* et *Avicennia africana*) - témoigne de la fragilité des écosystèmes de mangrove. Aussi, de grands peuplements ont péri entre 1972 et 1982 du fait de la sécheresse et de la salinité croissante des sols, parfois avec le concours de feux de brousse, et les sols concernés ont subi une acidification (USAID, 1986).

La riziculture sur les sols de mangrove est envisageable moyennant des aménagements destinés à corriger la salinité, le drainage et l'acidité potentielle. Toutefois, ces aménagements demanderaient un investissement considérable sans qu'un résultat positif soit garanti. Il semble, comme le dit M. STALJANSSENS (dans USAID, 1986) "*que la meilleure mise en valeur des mangroves réside dans leur protection*". Cette protection permettrait une exploitation continue de produits forestiers (*Rhizophora* est utilisable comme bois de feu), elle serait compatible avec une promotion du tourisme villageois et elle permettrait de sauvegarder la richesse en poissons, mollusques et crabes des lagunes.

En aucun cas cependant, un déboisement des mangroves pour la satisfaction des besoins en combustibles ligneux ne devrait être toléré.

L'appauvrissement des sols suite aux défrichements

De nombreuses recherches au sujet de l'appauvrissement des sols ont été menées et se poursuivent encore actuellement au Sénégal. Bien que la plupart de ces études se soient intéressées à des terres agricoles, leurs résultats peuvent être d'un grand intérêt pour les gestionnaires de la forêt. En effet, la surexploitation des formations ligneuses s'apparente parfois à un défrichement.

L'appauvrissement d'un sol se traduit par une baisse de sa fertilité. Bien entendu, l'érosion hydrique et l'érosion éolienne appauvrissent les sols dans les zones d'érosion. Mais il existe d'autres formes d'appauvrissement des sols au Sénégal :

- *La diminution de la teneur en matière organique* est un phénomène courant lors de la mise sous culture après défrichement. Le stock organique devrait également baisser en cas de surexploitation prolongée d'une formation ligneuse. Mais il est très probable que ce stock puisse se reconstituer rapidement si la formation ligneuse retrouve son état initial. En revanche, il est possible qu'une acidification soit amorcée par une baisse même passagère de la teneur en matière organique en raison de la réduction des possibilités de fixation des cations.
- *L'acidification* se traduit par une baisse du pH. Elle est liée à un déficit de bases échangeables (CaO, MgO, ...). Sous forêt, les éléments basiques sont puisés par les racines des arbres dans les horizons profonds du sol puis restitués à la surface lors de la décomposition de la matière végétale morte. Le "cycle des bases" est ainsi activé. Lorsque la forêt est défrichée et remplacée par des cultures, le sol perd ses bases par lixiviation (entraînement par l'eau) et par exportation des cultures. Au Sénégal, l'acidification des sols a été observée en différents endroits, notamment à Bambey (centre de recherches agronomiques, dans le bassin arachidier) et à Sefa (station d'expérimentation agricole, en Casamance). Dans ce dernier cas, une acidification très rapide a pu être constatée après défrichement (le pH passant de 6,4 à 5 en six ans, d'après R. FAUCK en 1956).

La surexploitation des formations ligneuses pour les besoins en combustibles ligneux se traduit par une atteinte au cycle des bases. Cependant, cette atteinte n'est pas totale, car il subsiste une végétation d'arbustes, de petits arbres et d'arbres rescapés capables d'assurer une remontée biologique des bases. Par conséquent, le risque d'acidification ne devrait pas constituer une préoccupation majeure pour la gestion des ressources ligneuses naturelles, du moins tant que d'autres processus de dégradation des sols ne risquent pas

d'en être la conséquence. Il en va autrement des plantations, où les espèces sélectionnées peuvent être acidifiantes ou au contraire améliorantes.

- *L'alcanisation* et la salinisation résultent de la concentration de sels dans les sols irrigués. C'est un problème essentiellement lié à l'agriculture.

Remarquons que les conséquences de l'appauvrissement des sols sont difficiles à mettre en évidence, ce qui rend l'appauvrissement des sols d'autant plus dangereux : une baisse des paramètres de la fertilité (teneurs en matières organiques et en bases, pH, perméabilité ...) ne conduit pas immédiatement à une baisse de la productivité agricole. La productivité ne décroît qu'après un temps d'attente qui semble être de 15 à 20 ans pour des sols initialement couverts de savane boisée (PIERI, 1992).

A coté de ces formes de dégradation, il existe une forme de dégradation physique particulière aux sols des climats tropicaux : la formation des indurations d'oxydes de fer et d'aluminium (ou sesquioxydes) aboutissant au cuirassement. Elle est traitée au paragraphe suivant.

La transformation des sols rouges et le cuirassement

Le cuirassement des sols tropicaux à sesquioxydes est un processus qui peut limiter fortement les possibilités d'utilisation de ces sols. Un simple concrétionnement rend déjà très difficile le travail de la terre, et un cuirassement continu affleurant interdit toute production végétale.

Dans la zone des sols ferrugineux tropicaux, les cuirasses sont le plus souvent anciennes et les dynamiques actuelles qui les mettent en jeu sont leur mise à nu par l'érosion et probablement un certain durcissement par l'exposition à la chaleur, qui augmente elle-même avec l'érosion.

Par contre, en Casamance, dans la zone de transition entre les sols faiblement ferrallitiques (les sols "rouges") et les sols ferrugineux tropicaux lessivés (les sols "beiges"), la transformation actuelle - et d'ailleurs très rapide - des premiers en les seconds s'accompagne de l'individualisation d'un horizon de concrétionnement du fer (CHAUVEL et PEDRO, 1978).

Les mécanismes en jeu dans cette transformation seront brièvement exposés ci-dessous, mais au préalable, il convient de rappeler la théorie de base du cuirassement, telle qu'elle a été développée notamment par MAIGNIEN (voir par ex. SOLTNER, 1981, pp. 155-157).

La théorie du cuirassement

1. Sous-forêt, des noyaux de cuirasses peuvent se former, surtout au niveau des ruptures de pente, mais ces noyaux n'évoluent guère, pour les raisons suivantes :

- La forêt active le cycle des bases, donc l'acidification est peu marquée et la solubilisation du fer réduite.
 - L'ombre protège le profil de dessiccation.
 - L'érosion est empêchée.
2. Lorsque la forêt est dégradée, le cuirassement se propage vers l'amont à partir des noyaux.
 - La rupture du cycle des bases engendre une mobilisation importante du fer. Celui-ci s'accumule dans l'horizon de concrétionnement.
 - La suppression de l'ombre permet une forte dessiccation en saison sèche qui favorise la cristallisation des oxydes de fer sous forme de goethite et d'hématite.
 3. Enfin, l'érosion accrue amenuise la couverture de terre au-dessus de la cuirasse qui affleure de plus en plus tout en durcissant.

Bien que les cuirasses de plateau, dont la formation est décrite par la théorie ci-dessus, soient les plus fréquentes, signalons aussi l'existence de cuirasses hydromorphes concentrées par l'écoulement de nappes et qui peuvent se former beaucoup plus rapidement que les précédentes.

La transformation des sols rouges en sols beiges

Les études sur la transformation des sols rouges en sols beiges en Casamance sont les seules qui mettent en évidence une formation actuelle et rapide d'un horizon de concrétionnement du fer au Sénégal dans des sols initialement dépourvus de concrétions.

Il s'agit d'une transformation de nature purement structurale, c'est-à-dire qu'elle affecte l'assemblage des constituants du sol et non leur nature minéralogique. Elle progresse latéralement et s'opère sous l'effet du pédoclimat. En voici les principaux mécanismes (d'après CHAUVEL, 1977) :

1. En dessous des horizons A et AB à texture plutôt sableuse, le sol rouge encore intact est constitué par un assemblage continu de micronodules. Ceux-ci sont eux-mêmes constitués par un plasma à base de kaolinite et d'hydrates ferriques reliant les grains de quartz du squelette. La cohésion de ces micronodules est assurée par l'eau retenue dans les vides intra-micronodulaires.
2. Par suite de pénétration d'une masse d'air très sec ou de destruction de l'écran protecteur constitué par le couvert forestier, les micronodules sont atteints d'une dessiccation extrême qui évacue l'eau des espaces intra-micronodulaires. Leur structure est alors prête à se réorganiser lors de la prochaine réhumectation. C'est l'"ultradessiccation".

3. Le très faible niveau d'humidité du sol provoque une déferrisation des kaolinites par abaissement du pH d'interface. Le fer migre vers le bas du profil où il donnera naissance à un horizon de concrétionnement.
4. Libérée par le départ du fer, l'argile colmatara la partie de l'horizon B atteinte par l'ultradessiccation. Augmentant la conductibilité hydraulique pour l'eau non saturante, le colmatage permettra à l'ultradessiccation de descendre plus loin dans le profil...

Parmi les conséquences indésirables de la transformation des sols rouges, on peut citer, outre l'apparition des concrétions ferrugineuses, la réduction de la perméabilité du sol due à l'individualisation de l'horizon illuvial colmaté. Elle favorise l'érosion hydrique. ROOSE (1981, p. 137) cite les chiffres de perméabilité suivants : sols ferrallitiques (type "rouge") : 60 à plus de 800 mm/h; sols ferrugineux tropicaux (type "beige") : 10 à 20 mm/h.

Le rôle de la couverture ligneuse

Le rôle de la dégradation du couvert forestier est fondamental à la fois dans la théorie générale du cuirassement et dans celle de la transformation des sols rouges.

La transformation des sols rouges mérite un intérêt tout particulier du fait de son imminence dans une grande partie de la Casamance. La réaction du sol à la dégradation du couvert forestier, et en particulier au défrichement, est à la fois très forte et très rapide :

- Sous-forêt, le sol est dans un état métastable. La transformation des sols rouges se produit, mais à une vitesse très lente. Sa progression latérale pourrait n'être que de quelques cm par an (CHAUVEL et PEDRO, 1978).
- Après défrichement, le sol entre pour ainsi dire instantanément dans une période active de quelques dizaines d'années qui correspond à la phase 2 des mécanismes de transformation décrits ci-dessus. Après 20 années de mise sous cultures, des sols initialement rouges de la région de Sefa ont montré un profil typique de sols de transition vers les sols beiges (SEGUY cité par CHAUVEL et PEDRO, 1978). La différenciation du sol beige à partir du sol de transition semble prendre ensuite beaucoup plus de temps.

L'étude de la transformation des sols rouges met en évidence le rôle capital joué par la dégradation du couvert forestier dans l'amorce du processus de transformation : c'est elle qui provoque l'ultradessiccation profonde du sol. Si nous nous intéressons aux processus de formation des cuirasses dans leur ensemble, nous pouvons faire une synthèse des rôles joués par la dégradation de la couverture ligneuse d'un côté dans la transformation des sols rouges et de l'autre dans la théorie générale du cuirassement :

- La dégradation du couvert forestier interrompt le cycle des bases, ce qui facilite la migration du fer.
- Quand canopée et litière ne jouent plus leurs rôles d'écran et de régulateur de l'humidité atmosphérique, les contraintes pédohydriques augmentent et provoquent l'ultradessication.
- La suppression de l'ombre favorise en outre la cristallisation des oxydes de fer après migration.
- La dégradation de la couverture ligneuse favorise l'érosion, donc la mise à nu des cuirasses.

Dans la zone des sols rouges faiblement ferrallitiques se situent les dernières "belles" forêts du Sénégal: les "forêts claires" de l'U.S.A.I.D. (1986) et les "forêts denses" du Plan directeur de développement forestier (CTFT, 1981). En revanche, sur les sols ferrugineux tropicaux lessivés, la formation végétale dominante est du type savane boisée. Bien que d'autres facteurs, en particulier la pluviosité et l'humidité de l'air, peuvent expliquer cette répartition, il est très probable que les produits de la transformation des sols rouges soient moins aptes à porter une forêt dense que les sols initiaux. Les caractéristiques physiques moins bonnes des sols beiges pourraient partiellement justifier cette hypothèse.

Ainsi une surexploitation des forêts de Casamance, en provoquant la transformation des sols rouges en sols beiges, pourrait non seulement être à l'origine de la formation de cuirasses ferrugineuses dans des sols devenus sensibles à l'érosion, mais aussi engendrer une baisse à long terme de la productivité de ces forêts.

Résumé des interactions sols-forêts

Nous avons vu l'importance de l'évolution de la couverture ligneuse pour le déclenchement et l'aggravation des principaux processus de dégradation des sols; mais nous avons vu aussi les conséquences que peuvent avoir les processus de dégradation au niveau de l'évolution de cette même couverture ligneuse. Commençons par rappeler brièvement ces dernières :

- Les pertes irréparables de sol par érosion s'accompagnent de baisses de fertilité, et donc de pertes à long terme de productivité des formations ligneuses.
- Les taux de ruissellement élevés observés en cas d'érosion hydrique et liés à la formation de pellicules de battance ont pour corollaire des taux d'infiltration diminués. La moins bonne humectation des sols après les pluies et les abaissements de nappes phréatiques qui s'en suivent entraveront la croissance des plantes - surtout celle des jeunes arbres.

- Les encroûtements superficiels, en particulier ceux associés aux pellicules de battance, peuvent empêcher la fixation des semences et rendre nécessaire un important travail du sol (soussolage par exemple).
- L'amincissement des couches de terre au-dessus des cuirasses ferrugineuses, dont l'étape finale est la mise à nu des cuirasses, peut rendre impossible toute production ligneuse.

Ces conséquences qui se manifestent à l'intérieur du domaine forestier peuvent justifier à elles seules une gestion stricte des ressources ligneuses sur sols sensibles. Cette gestion stricte devrait avoir pour objectif le maintien ou le rétablissement du pouvoir protecteur de la couverture ligneuse, qui se manifeste à travers de multiples mécanismes :

- absorption et évaporation immédiate d'eau des pluies au contact des feuilles et branches (interception)
- protection contre l'érosion hydrique par la litière et les racines
- protection contre la chaleur et la dessiccation
- atténuation de la violence des vents
- amélioration des sols (remontée des bases, apports de matière organique).

Ces considérations centrées sur le rôle des arbres ne doivent pas faire oublier le fait que les arbres ne sont qu'une partie d'un écosystème sol-végétation. A l'intérieur de cet écosystème, l'évolution de la couverture ligneuse ne pourra être qualifiée, ni de seule responsable de la dégradation des sols, ni de seul instrument de leur conservation. Au niveau de la gestion forestière, la recherche des moyens les plus efficaces de conservation d'un sol donné devrait donc passer par une étude détaillée non seulement des relations entre le sol et la végétation prise dans son ensemble, mais aussi des relations phytosociologiques entre la strate ligneuse et le reste de la végétation.

Il ne fait cependant aucun doute que le maintien d'une couverture ligneuse aussi dense que possible pourra seule empêcher la dégradation intense et irréversible de nombreux sols dans un avenir pas très lointain.

3.4.2 Modélisation des conséquences du déboisement au niveau des sols

Au paragraphe précédent, nous avons mis en évidence les retombées que le déboisement pouvait avoir au niveau des sols. L'objectif de la modélisation de ces retombées est de donner à

l'utilisateur du modèle de simulation de l'évolution des ressources ligneuses la possibilité d'évaluer un scénario selon des critères pédologiques.

La modélisation ne concernera que les ressources ligneuses naturelles. Les risques de dégradation des sols dans les forêts aménagées sont supposés maîtrisés, ou du moins modérés par les travaux d'aménagement.

Comme il a été relevé ci-dessus, les principaux processus de dégradation des sols en lien avec le déboisement sont :

- l'érosion hydrique,
- l'érosion éolienne,
- la salinisation et l'acidification des sols de mangroves,
- le lessivage et le concrétionnement, par suite de transformation des sols rouges.

Pour chacun de ceux-ci, nous définirons des niveaux de risque, mesures de l'intensité avec laquelle la dégradation est susceptible de se produire en cas de disparition de la couverture ligneuse primaire. Chaque unité de surface pourra alors se voir attribuer un niveau de risque par processus de dégradation. A partir de ces niveaux de risques et des intensités du déboisement, nous créerons des mesures de l'atteinte aux sols qui permettront de comparer entre eux différents scénarios d'évolution des ressources ligneuses et de les juger dans l'absolu, du point de vue pédologique.

Des unités pédo-végétales?

Pour que les risques de dégradation des sols puissent être pris en compte lors de la modélisation de l'évolution des ressources ligneuses naturelles, il faudrait que les unités de ressources ligneuses soient relativement homogènes du point de vue pédologique. la meilleure façon de réaliser cette homogénéité serait de croiser le découpage des ressources ligneuses déjà réalisé avec un découpage pédologique. On obtiendrait ainsi des unités pédo-végétales homogènes à la fois du point de vue de l'évolution des ressources ligneuses, et du point de vue des risques de dégradation des sols.

Dans le cadre de ce travail, plusieurs arguments plaident en faveur de la conservation du découpage des ressources ligneuses présenté au paragraphe 3.2 :

- Le croisement du découpage réalisé avec un découpage pédologique conduirait à une multiplication du nombre d'unités de ressources ligneuses (16 zones x 5 statuts légaux x (6 + 1) formations ligneuses x 2 accessibilités = déjà 1120 unités!). L'utilisateur du modèle serait alors très fortement sollicité à la fois pour l'introduction des variables

exogènes de toutes les unités et pour l'interprétation des résultats, sans parler de l'allongement des temps de calcul.

- Les sols occupés par une formation végétale donnée dans une zone donnée sont en général proches du point de vue des risques de dégradation. Il est alors possible de définir des "risques moyens" par formation ligneuse. La proximité évoquée est le fruit des relations sol-végétation. En effet, sous un climat donné - et une zone peut être considérée homogène du point de vue climatique - le développement de formations végétales différentes est en général le reflet de conditions pédologiques différentes.

Une exception importante à cette règle est constituée par les formations végétales secondaires, résultant de la dégradation par l'homme d'une végétation primaire. Une formation ligneuse donnée peut alors se rencontrer dans une même zone, à la fois sur un sol de bonne qualité en tant que végétation dégradée, et sur un sol de moins bonne qualité en tant que végétation primaire. Dans ce cas, la notion de "risque moyen" par formation ligneuse devient d'un emploi délicat.

Malgré l'existence de certains cas particuliers, pour lesquels il conviendra de trouver une solution, nous pouvons considérer qu'une approximation satisfaisante du découpage des ressources ligneuses, selon des critères de dégradabilité des sols, est donnée par le découpage en formations ligneuses déjà réalisé.

Les niveaux de risque par processus de dégradation

Etant donné le découpage des ressources ligneuses naturelles en formations ligneuses, il s'agit maintenant de décrire en langage formel les risques de dégradation des sols.

Définition des niveaux de risque

Considérons tout d'abord une parcelle de sol homogène par rapport aux risques de dégradation. Nous pouvons, à cette parcelle, attribuer un "niveau de risque", c'est-à-dire une valeur qui indique à quel point, avec quelle intensité, le sol est susceptible d'être dégradé.

Il est préférable de définir les niveaux de risque sur des échelles à valeurs discrètes, autrement dit de définir des classes de risque, plutôt que d'utiliser des échelles à valeurs continues. Cette façon de procéder correspond le mieux à la nature actuelle de l'information disponible, qui est le plus souvent qualitative, et facilitera l'utilisation de niveaux de risque.

		Niveau	Description du niveau de risque
Processus de dégradation	Erosion éolienne	1	Déflation peu importante à nulle. Sols peu sensibles et érosivité des vents faible.
		2	Déflation pouvant être assez importante. Sols sensibles avec érosivité des vents moyenne ou sols peu sensibles avec forte érosivité des vents.
		3	Déflation pouvant être très importante. Sols sensibles dans les régions à forte érosivité des vents.
	Erosion hydrique	1	Erosion peu importante même sur sol nu. Sols peu sensibles et érosivité des pluies faible, ou érosivité des pluies très faible.
		2	Erosion pouvant être assez importante. Sols sensibles et érosivité des pluies faible à moyenne ou sols peu sensibles et érosivité des pluies moyenne à élevée.
		3	Erosion pouvant être très importante. Sols sensibles et érosivité des pluies forte.
	Lessivage et concrétionnement	1	Pas de néoformation rapide de cuirasses. Sols situés en dehors du domaine des sols ferrallitiques.
		2	Transformation rapide des sols après déboisement avec concrétionnement des oxydes de fer et lessivage des argiles. Domaine des sols faiblement ferrallitiques.
	Acidification des sols de mangrove	1	Sols situés en dehors des périmètres de mangrove.
		2	Sols pouvant se dégrader par acidification et sursalure. Sols des mangroves.

Tableau 3.4: Les niveaux de risque de dégradation des sols sous formations ligneuses naturelles

Le tableau 3.4 donne la définition des niveaux de risque utilisés dans le cadre de ce travail.

Attribution des niveaux de risque

Les niveaux de risque étant définis, nous devons, à chaque formation ligneuse de chaque zone, attribuer un niveau de risque par processus de dégradation. Le problème qui se pose ici est celui de l'agrégation des niveau de risque. En effet, différents sols avec des niveaux de risque différents peuvent être présents sous une même unité forestière, alors que nous désirons caractériser une formation ligneuse d'une zone donnée par un niveau de risque unique.

Les niveaux de risque ne sont pas additifs : si la moitié des sols d'une parcelle forestière a un niveau de risque 2 pour un processus de dégradation des sols donné, et si l'autre moitié des sols a un niveau de risque 1, il serait pernicieux d'attribuer à la parcelle le niveau moyen de 1. En effet, la dégradation de la moitié sensible de la parcelle pourrait avoir à elle seule des conséquences beaucoup plus graves que celles que l'on pourrait observer sur une parcelle entière à niveau de risque uniformément égal à 1. Il convient donc d'employer un processus d'agrégation des niveaux de risque par lequel des sols de faible étendue mais à niveau de risque élevé ne seront pas "noyés dans la masse".

Nous utiliserons pour cette raison ce que nous appellerons le *niveau de risque "dominant"* : c'est le plus haut niveau de risque atteint ou dépassé par une fraction au moins égale à p de la surface totale des sols de l'unité considérée.

p est un seuil dont la valeur doit être :

- a. assez petite pour que soient pris en compte tous les phénomènes de dégradation à conséquences importantes au niveau de l'unité de ressources ligneuses considérée;
- b. assez grande pour que certaines unités pédologiques à niveau de risque élevé, mais marginales du point de vue de leur superficie, et peut-être marginales aussi du point de vue des chances qu'un déboisement y soit opéré, n'imposent pas leur niveau de risque à l'unité de ressources ligneuses toute entière.

Il me semble qu'un bon choix pour p devrait se situer quelque part entre 0.10 et 0.35. Avec un choix de 0.10, le niveau de risque ne sera sous-évalué que pour une très faible proportion des sols, inférieure à 10 %, chiffre faible vis-à-vis de l'imperfection de nos connaissances. Au-delà de 0.35, par contre, ce sont déjà près de la moitié des sols, ou plus, qui risquent de voir leurs niveaux de risque sous-évalués.

Un p de 0.20 a été utilisé pour effectuer l'attribution de niveaux de risque aux unités de formation ligneuses du Sénégal dont les résultats sont présentés dans l'annexe 3.2.

L'ampleur du déboisement par niveau de risque

Plus le niveau de risque d'une unité forestière est élevé, plus les conséquences d'un déboisement sont graves. Cela découle de la définition même des niveaux de risque. Mais, pour un niveau de risque donné, nous pouvons ajouter que plus le déboisement est intense, plus ses conséquences au niveau de la dégradation des sols seront importantes.

Pour juger un scénario d'évolution des ressources ligneuses selon des critères pédologiques il est donc nécessaire de savoir: 1.- à quel niveau de risque, et 2.- avec quelle intensité des déboisement ont lieu , et cela pour tous les principaux processus de dégradation des sols.

L'intensité du déboisement peut être mesurée par la diminution de la densité de bois vert. Cette diminution pourrait être déterminée par rapport à la densité initiale. Cependant, la densité initiale peut correspondre à un état déjà déboisé et ne constitue de ce fait pas une bonne référence. Il est préférable de prendre pour base la densité de la formation ligneuse non dégradée, sa densité d'équilibre.

On pourrait donc calculer les quantités

$$\text{IntensDebois}_{Zne\ Stu\ Frm}(t) = d_{Zne\ Stu\ Frm}(t) - d^{eq}_{Clm\ Frm}$$

pour chaque unité de ressources ligneuses naturelles.

Rappels :

d	=	densité de bois vert
d ^{eq}	=	densité d'équilibre
Zne	=	indice de la zone
Stu	=	indice du statut légal
Frm	=	indice de la formation ligneuse
Clm	=	indice du domaine climatique
Frm	=	indice de la formation ligneuse
t	=	année

Les quantités IntensDebois présentent les inconvénients :

- de ne pas être très parlantes (une même variation de densité de 5 st/ha ne signifie pas la même chose dans une forêt claire et dans une savane arborée);
- de ne pas être agrégables, c'est-à-dire de ne pas se prêter au calcul d'un indice global de dégradation des sols pour une zone ou un pays.

C'est pourquoi elles seront traduites en surfaces fictives de déboisement, obtenues en supposant qu'il existe dans chaque unité forestière une partie boisée avec une densité égale à la densité d'équilibre et une autre partie complètement déboisée, à densité nulle, dont la surface est précisément la surface déboisée fictive.

Les surfaces fictives de déboisement sont calculées par :

$$\text{SurfDebois}_{\text{ZneStuFrmAct}}(t) = \text{Surf}_{\text{ZneStuFrmAct}}(t) \cdot \left(1 - \frac{\text{DensBV}_{\text{ZneStuFrmAct}}(t)}{\text{DensBVEquil}_{\text{CImGFr}}} \right)$$

Ces surfaces permettent de calculer pour chaque processus de dégradation (indice Deg) et chaque niveau de risque (indice Ris) des "surfaces dégradées" par zone, $\text{SurfDegrZone}_{\text{ZneDegRis}}(t)$, ou globales, $\text{SurfDeg}_{\text{DegRis}}(t)$ obtenues par sommation de SurfDebois , sur les unités dont le niveau de risque est Ris pour le processus de dégradation Deg.

On s'intéressera essentiellement aux valeurs de l'année qui correspond à la fin de la période simulée. Un scénario d'évolution des ressources ligneuses sera d'autant plus respectueux des sols que les "surfaces dégradées" seront faibles pour les niveaux de risque élevés.

3.4.3 Conclusions sur l'analyse et la modélisation des interactions sols-forêts

La représentation, bien que très simplifiée, de l'influence du déboisement sur l'évolution des sols, fait entrer une nouvelle dimension dans les résultats du modèle du système énergetico-forestier : celle du très long terme²⁵. En effet, la dégradation des sols a des répercussions à très long terme sur les potentiels d'utilisation des terres, notamment au niveau de leurs aptitudes forestières ou agricoles.

La mise en évidence des risques de dégradation des sols et leur évaluation numérique permet de rechercher des variantes de politique énergetique et forestière dont les impacts négatifs au niveau des sols soit aussi bas que possible, eu égard aux autres objectifs des décideurs politiques.

Cependant, une gestion des ressources ligneuses intégrant pleinement les préoccupations pédologiques devrait se baser sur un découpage des ressources faisant intervenir des critères de

²⁵ Rappelons que dans le contexte d'analyse énergetique qui est le notre, l'expression "long terme" est déjà utilisée pour des échéances à quelques dizaines d'années.

dégradabilité des sols, et cela non seulement lors de la recherche de scénarios de gestion mais aussi - et c'est là que se situe actuellement le problème majeur - sur le terrain. Avant que ne soit affiné le découpage utilisé dans le modèle de la dynamique des ressources ligneuses, il importe donc de mettre sur pied une méthode de gestion des ressources ligneuses par petites unités géographiques. Il serait possible:

- de délimiter sur le terrain des unités géographiques dont le découpage ferait intervenir aux côtés de critères de productivité, des critères de dégradabilité des sols ;
- puis de rechercher une bonne stratégie de gestion à l'échelle de ces unités, en fixant les quantités de bois à prélever mais aussi en prévoyant des mesures de protection active des sols (aménagement anti-érosifs, reboisements avec espèces adaptées,...);
- et finalement de mettre en oeuvre la stratégie choisie.

En attendant, le découpage retenu (qui se base sur les formations végétales) permet déjà une gestion des ressources ligneuses sensiblement améliorée, dans le sens d'une prise en considération des problèmes pédologiques.

Remarquons finalement que même si cette possibilité ne devait pas être exploitée par les futurs utilisateurs du modèle, les risques de dégradation des sols seront pour le moins bien mis en évidence.

4 LES SYSTEMES D'OFFRE

Ce chapitre porte essentiellement sur les systèmes d'offre des deux principaux groupes de combustibles domestiques du Sénégal : les combustibles ligneux (section 4.1) et le gaz de pétrole liquéfié, dans ses différentes formes de conditionnement (section 4.2). Pour chacun de ces groupes de combustibles, l'analyse du système d'offre est suivie d'une modélisation de la formation des prix. Les modèles obtenus permettent d'estimer les prix en différents endroits de l'espace, en fonction notamment des ressources disponibles et des quantités consommées. Ressources disponibles et quantités consommées sont ici supposées données. L'évaluation des ressources disponibles a été traitée dans le chapitre précédent. Quant à l'évaluation des consommations, elle fait l'objet du chapitre 5, dans lequel l'importance de l'évaluation des prix sera par ailleurs clairement mise en évidence.

4.1 L'OFFRE DES COMBUSTIBLES LIGNEUX

4.1.1 La filière bois et charbon de bois

Chaque pays du Sahel connaît ses particularités dans le domaine de l'approvisionnement en combustibles ligneux des grandes agglomérations : le Niger ses chameliers, le Burkina ses charrettes à ânes... Au Sénégal, le visiteur sera surpris par l'abondance sur les routes de grands camions aux chargements impressionnants de sacs de charbon de bois, dont l'équilibre paraît tenir du prodige. Ils sont le reflet d'une caractéristique principale de la filière bois et charbon de bois dans ce pays : les distances sur lesquelles se fait le transport sont souvent très grandes¹.

Ces grandes distances, et le fait que le principal combustible produit soit du charbon, expliquent le professionnalisme de la plupart des intervenants de la filière. Une description du fonctionnement de cette filière sera donnée ci-dessous. Elle sera suivie d'un regard sur la réglementation en vigueur et son application défectueuse. Quelques mots sur la structure des prix et la répartition des revenus introduiront le paragraphe suivant, dans lequel la formation des prix dans l'espace fera l'objet d'une modélisation.

¹ L'essentiel du charbon de bois consommé à Dakar provient des régions de Kolda et de Tambacounda, éloignées de 400 à 600 km.

Le fonctionnement de la filière

Le fonctionnement de la filière d'approvisionnement en bois et charbon des grandes villes du Sénégal est bien connu. Il a été étudié par plusieurs auteurs, notamment THIAM (1984) et RIBOT (1990). Les Services des Eaux et Forêts ont par ailleurs une connaissance étendue dans ce secteur (République du Sénégal, MPN, 1990).

Une description de l'approvisionnement en charbon des grandes villes, de loin le plus important par les quantités de bois coupées sera suivie de quelques mots sur les spécificités du cas du bois de feu et sur l'approvisionnement à moyenne et courte distance.

Les étapes de la production et de la commercialisation du charbon de bois sont représentées à la figure 4.1.

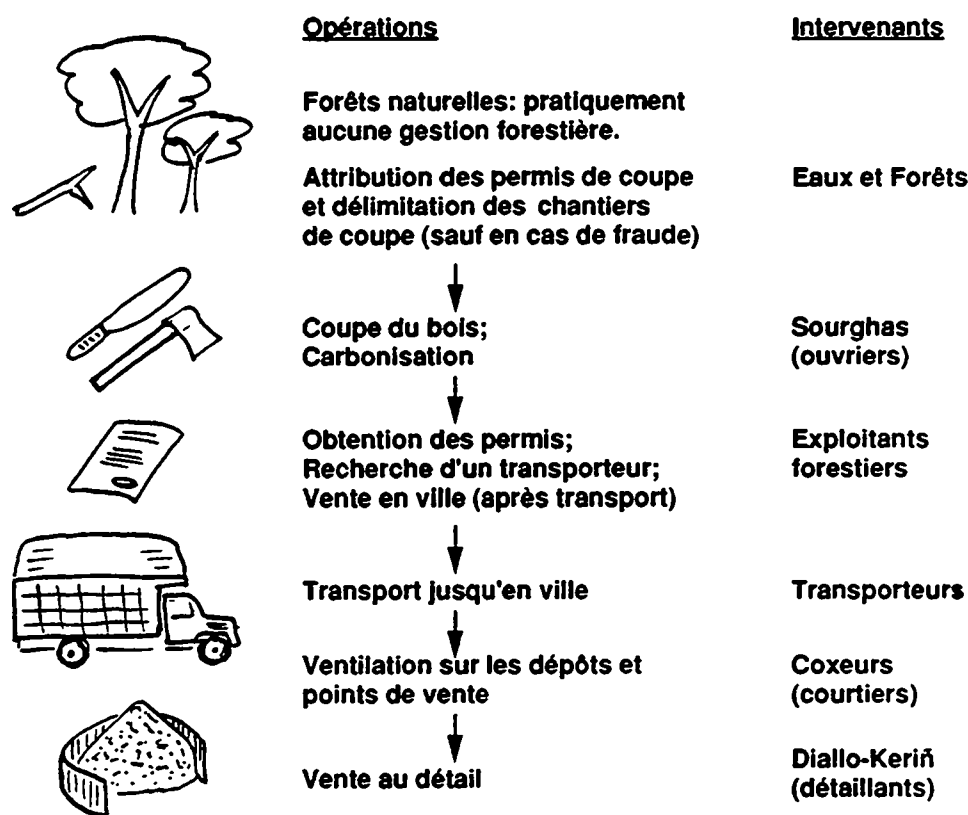


Fig. 4.1 **Fonctionnement de la filière bois de feu et charbon de bois**

La production du charbon

La production du charbon incombe aux "sourghas". Ces ouvriers sont en grande majorité des peulhs d'origine guinéenne, comme d'ailleurs la plupart des intervenants de la filière. Ils s'installent sur les "chantiers de coupe", zones délimitées par les agents des Eaux et Forêts, et procèdent aux opérations suivantes :

- Coupe des arbres et débitage du tronc et des grosses branches.
- Collecte du bois qui est ensuite entreposé autour de l'emplacement de la future meule.
- Confection de la meule, généralement de type traditionnel, aussi appelée "carrée" (RIBOT, 1990). Le rendement pondéral de la carbonisation est de l'ordre de 20 %: 5 kg de bois donnent 1 kg de charbon (MADON, 1985).
- Allumage et surveillance de la meule.
- Séparation du charbon des imbrûlés.
- Ensachage et chargement des sacs de charbon sur les camions.

La commercialisation par les exploitants forestiers

Les exploitants forestiers sont des personnes regroupées au sein de coopératives ou sociétés agréées par la DEFC (Direction des Eaux, Forêts et Chasses). Ces exploitants forestiers obtiennent divers permis et attestations de la part de l'IREF (Inspection Régionale des Eaux et Forêts) en s'acquittant des taxes et redevances réglementaires.

Chaque exploitant forestier a ses "propres" sourghas, qui lui sont attachés en ce sens qu'il s'occupe de la légalisation de leur travail. Il leur procure en outre fréquemment des avances en liquidités. En revanche, les sourghas lui "vendent" leur production. Les guillemets s'imposent non pas parce qu'il ne se produirait pas de vente réelle (l'exploitant paye bel et bien le sourgha pour son charbon), mais parce que le sourgha n'a pas d'autre choix que de vendre à son exploitant forestier, son patron en quelque sorte, et à un prix plus ou moins fixé par ce dernier. Notons que des sortes de contremaîtres, les "kontrapalace" servent d'intermédiaire entre les ouvriers et l'exploitant forestier. Après avoir acquis le charbon, l'exploitant loue les services d'un transporteur et revend, dans la localité où il sera consommé, le charbon à un "coxeur".

La distribution

La distribution du charbon est bien connue dans le cas de Dakar, qui consomme la plus grande partie du charbon produit dans le pays. A l'arrivée des camions à Dakar, les chargements entiers sont achetés par des courtiers ou agents d'affaires, les "coxeurs", qui dirigent ensuite les camions vers les entrepôts des points de vente. Là, le charbon passe aux détaillants, les "Diallo-keriñ", maillon final de la filière. Nous parlerons de la vente au détail au paragraphe 4.1.3. Signalons cependant par rapport au pictogramme de la figure 4.1, que, si la majorité des détaillants possèdent une balance, ils ne l'utilisent jamais. Nous y reviendrons.

Le "secteur économique" de l'approvisionnement en charbon

En tout, quelques 20 000 personnes travaillent dans l'approvisionnement en charbon des grandes villes. On peut parler d'un secteur économique, dont le chiffre d'affaire est de l'ordre de 10 milliards de francs CFA (MADON et MATLY, 1987 et RIBOT, 1990). Toute action sur le système d'approvisionnement du charbon aura par conséquent des répercussions importantes sur le plan socio-économique.

Le cas du bois de feu

De la production à la distribution, le bois de feu subit des opérations très semblables à celles subies par le charbon. On peut même dire que la seule différence fondamentale est l'absence de carbonisation. Le bois est chargé sur les véhicules de transport sous forme de gros morceaux. Ceux-ci sont ensuite coupés et fendus avant d'être vendus au consommateur sous forme de petites pièces. Les consommateurs peuvent cependant aussi acheter des gros morceaux. Ces derniers sont utilisés lors de certaines cérémonies (mariages, baptêmes, etc), ou fendus à domicile pour servir de combustible quotidien.

L'approvisionnement à courte et moyenne distance

Lorsque les distances sont plus courtes que dans le cas de l'approvisionnement en charbon de la capitale, les véhicules utilisés sont de moindre capacité. Lorsque la distance parcourue diminue, on passe des camions en relativement bon état et à grande capacité à des camions en moins bon état et de capacité plus faible, à des camionnettes, à des charrettes à ânes, à des vélomoteurs et bicyclettes. Lorsque la distance diminue davantage, le transport se fait par des personnes à pied. Lorsque la distance est telle que l'approvisionnement peut se faire à pied, les combustibles commercialisés s'effacent devant le bois d'auto-ravitaillement.

La législation qui s'applique aux combustibles ligneux commercialisés est la même, quelle que soit la distance. Cependant, il est évidemment plus facile d'éluder les contrôles lorsque les distances sont courtes et la fraude devrait être plus importante.

La réglementation de l'exploitation forestière et la fraude

Le système des quotas régionaux et des coopératives

L'exploitation forestière est autorisée pendant la "campagne annuelle" d'exploitation. Celle-ci va en général de décembre à juillet. La saison des pluies, phase de croissance rapide de la végétation, période pendant laquelle les ressources ligneuses sont difficilement accessibles et saison pendant laquelle la main-d'oeuvre est appelée au travail des champs, est ainsi exclue. Il

faut dire que la délimitation de la "campagne" reste très théorique. Selon RIBOT (1990), l'exploitation forestière se poursuit à un rythme à peine ralenti pendant toute la période interdite.

Comme nous l'avons déjà mentionné au chapitre 3, pour chaque campagne annuelle, la DEFC fixe par région administrative des quotas de bois de feu, de charbon de bois et d'autres produits forestiers dont l'exploitation peut être autorisée. Dans certaines régions, l'exploitation est complètement interdite, dans d'autres, elle est limitée à l'approvisionnement de la région. La répartition des quotas tient compte des besoins des différentes régions et de l'état des ressources ligneuses.

En règle générale, les IREF (Inspection Régionale des Eaux et Forêts) délivrent des permis de coupe aux exploitants désireux de prélever des produits forestiers jusqu'à épuisement des quotas qui leur sont attribués. Dans le cas du charbon de bois cependant, les quotas sont, avant même le début de la campagne, ventilés sur des organisations d'exploitants agréées par la DEFC. Ces organisations sont en général des "coopératives", parfois des "sociétés" d'exploitation forestière. En fait, qu'elles soient "coopératives" ou "sociétés", ces organisations ne sont que le biais par lequel les exploitants forestiers trouvent accès aux ressources ligneuses.

Les pièces délivrées par les services des Eaux et Forêts

Les exploitants forestiers obtiennent auprès des services régionaux des Eaux et Forêts les documents suivants :

- cartes professionnelles d'exploitant forestier, renouvelables annuellement
- attestations d'employés pour les sourghas, renouvelables annuellement
- permis de coupe, délivrés sur la base des quotas
- permis de circulation, échangés contre les permis de coupe
- permis de dépôt, en cas de stockage avant transport.

Les taxes

Les exploitants forestiers s'acquittent de différentes redevances auprès des services régionaux des Eaux et Forêts. Pour le charbon de bois, ils payent depuis 1987 (décret du 14.3.87) une taxe de 5 FCFA/kg, ce qui représente moins de 10 % du prix de vente au détail à Dakar. MADON et MATLY (1987) relèvent deux anomalies du système de taxation :

- Lors de la production de charbon, la taxe payée par unité de bois coupée est inférieure d'environ 30 % à la taxe payée lors de la production de bois de feu (400 FCFA/stère). La production de charbon est ainsi favorisée par rapport à celle du bois de feu.

- Les taxes payées sont de loin inférieures à la valeur économique du bois sur pied, calculée à partir du coût du reboisement, estimée entre 11 et 21 FCFA/kg en 1985, soit entre 55 et 105 FCFA par kg de charbon (MADON, 1985).

Une autre anomalie peut être relevée :

- En raison de la fixation des taxes au niveau national, il y a discrimination spatiale des exploitants : lorsque les exploitants bénéficient de quotas dans des zones de production proches des grands centres de consommation, ils ont moins de frais de transport et, à taxes égales, peuvent réaliser des marges bénéficiaires plus élevées.

Le dépassement des quotas et l'exploitation illégale

La production de combustibles ligneux, surtout de charbon, est toujours supérieure aux quotas initialement fixés. Les producteurs passent à cet effet par différentes voies plus ou moins légales :

- Les IREF disposent de quotas supplémentaires, "en réserve", qu'ils peuvent allouer lorsque les quotas initiaux sont épuisés.
- Des permis de coupe sont parfois délivrés alors que les quotas totaux (quota initial + réserve) sont épuisés.
- Des permis sont délivrés pour la carbonisation de bois obtenu lors de défrichements de futures terres agricoles. Ces futures terres agricoles sont parfois fictives (RIBOT, 1990).
- Du charbon produit illégalement peut être saisi par des agents des Eaux et Forêts puis revendu de gré à gré à un exploitant forestier. Cet exploitant forestier peut très bien être celui sous la protection duquel travaillent les sourghas qui ont produit le charbon. Ainsi, un exploitant forestier peut, moyennant un prix, légaliser du charbon produit frauduleusement (RIBOT, 1990).
- De nombreux permis de circulation sont probablement délivrés sans aucune base légale par les agents des Eaux et Forêts pour du charbon produit frauduleusement (RIBOT, 1990).
- Une partie du charbon produit frauduleusement échappe complètement au contrôle des Eaux et Forêts dans les zones de production. Les exploitants forestiers qui commercialisent ce charbon-là contournent les postes de contrôle des Eaux et Forêts en cours de route ou profitent d'un contrôle laxiste (THIAM, 1984).

Les flux de charbon légaux et frauduleux sont schématiquement représentés à la figure 4.2.

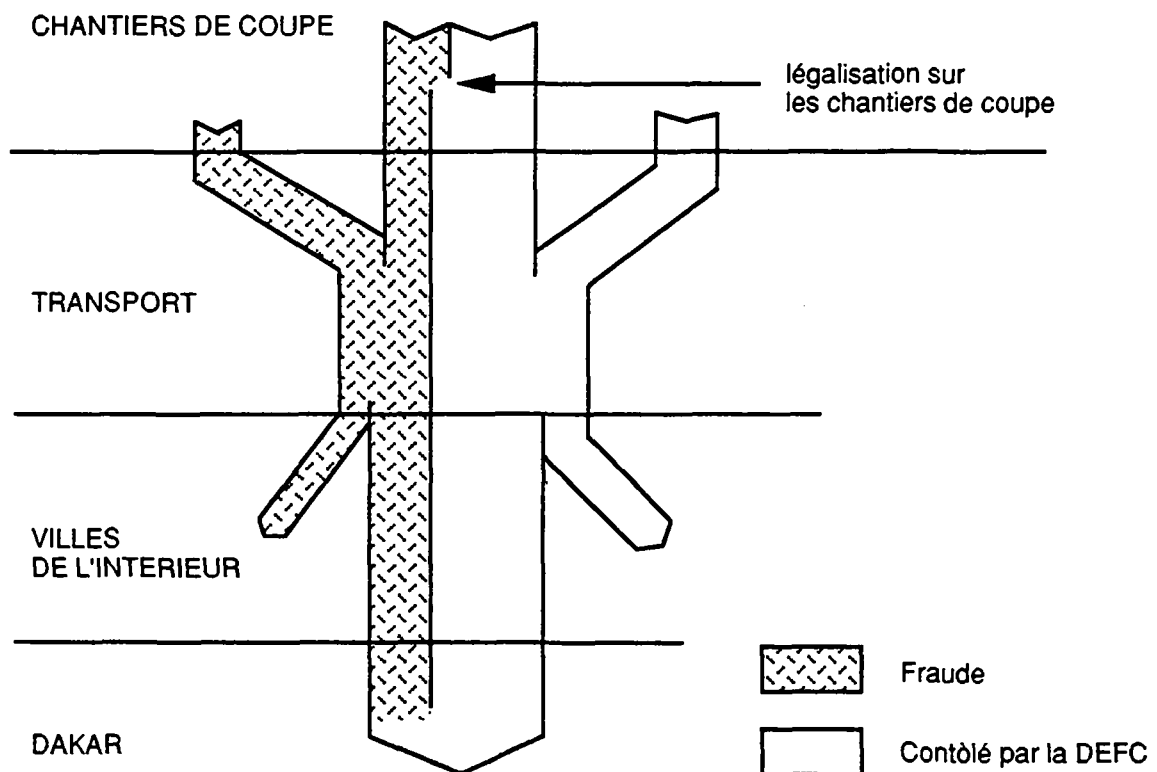


Fig. 4.2 Les flux légaux et frauduleux de charbon

Remarquons avec J.C. RIBOT (1990), et contrairement à A. THIAM (1984), que dans le cas de l'approvisionnement de Dakar, il ne devrait y avoir que peu de charbon qui circule sans permis, étant donné que les entrées de Dakar peuvent facilement être contrôlées par la DEFC, et le sont effectivement. Cette appréciation est confirmée par l'enquête sur les consommations de 1989 (projet MASENS) qui révèle que les quantités consommées à Dakar en 1989 correspondent à peu près aux entrées contrôlées par la DEFC (Tableau 5.12, § 5.2.5). Dans les villes de l'intérieur du pays, surtout dans les petites villes, il est probable que des quantités plus importantes entrent sans avoir jamais été contrôlées. Il apparaît finalement que si la production nationale commercialisée de combustibles ligneux excède largement les quotas, ce n'est pas tellement en raison de l'adresse des fraudeurs qui déjouent le système de contrôle de la DEFC, mais plutôt en raison du laxisme des agents de l'Etat. Ce laxisme s'explique par la nécessité de laisser satisfaire une demande très inélastique à court terme malgré des quotas qui, au nom de la protection de l'environnement, ont été fixés à des niveaux très bas.

La structure des prix et la répartition des revenus

La structure du prix du charbon de bois à Dakar, telle qu'elle a été observée par RIBOT (1990), est représentée au tableau 4.1. Elle se rapporte à du charbon en provenance de Koumpentoum, en 1987.

	Dépenses	Main d'oeuvre, bénéfices, revenus nets
Sourghas		
Revenu net:		470
Dépenses:	67	
- Outils	(10)	
- Vélos	(4)	
- Aide de la part de camarades	(53)	
Exploitants forestiers		
Revenu net:		445 *
Dépenses:	761	
- Transport	(663)	
- Taxes	(75)	
- Cartes d'exploitant forestier	(5)	
- Coopérative	(9)	
- Versements		
- aux chefs de village	(5)	
- aux agents des Eaux et Forêts	(2)	
- Avances non récupérées	(2)	
- Rémunération du "kontrapalace"		20
- Déchargement à Dakar		35
Coxeurs		
Revenu net:		142
Dépenses:	0	
Détaillants		
Revenu net:		332
Dépenses:	57	
- Taxes et redevances	(29)	
- Location du point de vente	(25)	
- Balances	(3)	
Totaux:	885	1444
Prix du sac à Dakar:		2329

*: Cette structure du prix s'applique aux quotas initiaux. Dans sa structure du prix, RIBOT déduit un montant de 80F de la marge bénéficiaire des exploitants forestiers, consacré selon lui en moyenne à l'obtention de quotas supplémentaires.

Tableau 4.1 Structure du prix du charbon de bois à Dakar en 1987[FCFA/SAC]

D'après RIBOT, 1990

Cette structure du prix fait ressortir l'importance du prix du transport. On remarque par ailleurs que les marges bénéficiaires des quatre intervenants mentionnés totalisent 60 % du prix de vente au détail. Leur répartition se fait à parts à peu près égales entre sourghas, exploitants forestiers et détaillants, les coxeurs recevant environ la moitié de ce que reçoivent les autres. Cependant, ces marges masquent la véritable répartition des revenus. Parce qu'ils ont moins d'argent, le nombre de sacs sur lesquels les exploitants forestiers et les coxeurs prélèvent leur marge est beaucoup

plus grand que pour les sourghas et les détaillants. De ce fait, on observe une grande disparité de revenus entre les premiers et ces derniers.

Les intervenants de la filière bois et charbon de bois peuvent être classés en trois catégories, selon leurs revenus :

1. La main d'oeuvre non qualifiée, à bas revenus :

- les sourghas
- les Diallo-keriñ

Ces personnes ont des revenus proches du minimum nécessaire à la subsistance.

2. Les personnes à revenu supérieur. (En font partie) :

- les contremaîtres
- les chauffeurs de camion (employés par les transporteurs)
- les coxeurs
- les propriétaires des points de vente (qui reçoivent un loyer de la part des Diallo-keriñ)

Ces personnes profitent d'un "capital" financier ou social qui leur permet d'accéder à une rémunération supérieure. Cette rémunération peut varier dans de grandes proportions selon la nature du "capital" en question.

3. Les privilégiés :

Ce sont les exploitants forestiers, qui profitent de l'attribution de quotas leur permettant de réaliser de grands bénéfices. Ces bénéfices sont souvent sans rapport avec ce que l'on pourrait appeler leurs moyens de production : un capital financier et un certain savoir-faire.

Les revenus des coxeurs

Il a souvent été prétendu que les coxeurs sont eux aussi des privilégiés qui, bien organisés entre eux, se partagent de très grandes marges bénéficiaires (THIAM, 1984; MADON et MATLY, 1987; SOW, 1990). Cependant, leurs revenus ont très probablement été surévalués par le passé. Même le chiffre de J.C. RIBOT (142 FCFA/sac) est à prendre avec précaution². Quoi qu'il en soit, il est peu probable qu'un démantèlement de la supposée organisation oligopolistique des coxeurs³ ferait beaucoup baisser le prix de la distribution du charbon. Nous supposons donc

² Ce chiffre a été obtenu à partir de valeurs de quatre mois, en calculant les différences des prix obtenus par enquête et en supposant que les frais des coxeurs étaient nuls. Les moyennes mensuelles de la marge des coxeurs vont de 77 à 266 FCFA/sac. Les coxeurs eux-mêmes ont prétendu ne gagner que 30 FCFA/sac, alors que les exploitants forestiers estimaient cette marge à 100 FCFA/sac (RIBOT, 1990).

³ Il est peu probable que les coxeurs s'entendent entre eux pour augmenter substantiellement leurs marges. J.C. RIBOT estime leur nombre entre 200 et 400. Cependant, même le chiffre souvent avancé d'une vingtaine de grands coxeurs me paraît trop élevé pour une entente efficace.

qu'il y a concurrence. Une marge de 142 FCFA/sac ne représente en effet qu'environ 5 % du prix de vente au détail, et, par ailleurs, les coxeurs fournissent quand-même, malgré la mauvaise réputation dont ils jouissent, certaines prestations. Ils identifient les points de vente pouvant accueillir le charbon et ils revendent à crédit aux détaillants des chargements de camion qu'ils ont payé comptant.

Les bénéfices générés par le système des quotas

Les exploitants forestiers réalisent, surtout sur les quotas de charbon qui leur sont initialement attribués, des bénéfices moyens démesurés. Ils sont encore prêts à exploiter du charbon pour des bénéfices bien inférieurs. C'est ce que démontrent le prix que bon nombre d'entre eux paient pour obtenir des quotas supplémentaires : jusqu'à 500 FCFA/sac dans le cas de l'utilisation des quittances de saisie et vente de gré à gré, d'après RIBOT. L'Etat pourrait en profiter pour augmenter ses revenus, à travers des taxes appropriées. Dans l'état actuel des choses, ce sont d'un côté les exploitants forestiers, de l'autre les agents de l'Etat qui profitent de l'écart qui existe entre le montant réellement encaissé par l'Etat et le prix que les exploitants forestiers seraient prêts à payer pour leurs quotas.

Cet écart est d'autant plus fort que les chantiers sont près des grands centres de consommation dans lesquels les bénéfices sont élevés, en raison des économies pouvant être réalisées sur le transport. Inversement, lorsqu'on s'éloigne des grands centres de consommation, les bénéfices des exploitants forestiers tendent vers des valeurs assez basses, même pour le charbon produit à partir des quotas initiaux⁴.

4.1.2 La formation des prix dans l'espace

La mise en évidence de mécanismes qui régissent la formation des prix est l'un des objectifs essentiels de la modélisation de l'offre des combustibles ligneux. Comme il apparaîtra ci-dessous, la formation des prix va de pair avec celle des flux interrégionaux de combustibles, autre ensemble de variables très importantes décrivant le fonctionnement du marché.

Etant donné le grand nombre d'acteurs qui interviennent lors de la coupe, la carbonisation, le transport et la revente des combustibles ligneux, chacun des ces acteurs pris isolément ne devrait pouvoir modifier les prix et les quantités consommées que de manière insignifiante. On peut

⁴ On peut calculer un prix au kilomètre du transport de charbon d'après les chiffres de J.-C. RIBOT, soit 663 FCFA/400 km.sac. Si on suppose que les zones de production les plus reculées se trouvaient à l'époque (1987) à 600 km de Dakar (vers Velingara), on obtient pour elles un prix du transport de 995 FCFA/sac. Toutes choses égales par ailleurs, les marges bénéficiaires des exploitants forestiers descendent alors à 113 FCFA/sac.

donc supposer que ces acteurs prennent les prix pour donnés, et ne cherchent pas, à travers les prix, à agir sur les quantités consommées. Autrement dit ces acteurs s'adaptent aux quantités consommées, ce qui permet de modéliser leur comportement en supposant que la demande est fixe - sans perte de généralité.

Le problème posé peut donc être défini de la façon suivante: Etant données les quantités de ressources ligneuses disponibles pour la commercialisation, étant données aussi les quantités consommées, quels seront les prix de vente au détail pratiqués? Ce problème a une dimension spatiale, puisque les prix de vente dans une localité dépendent des quantités consommées dans toutes les localités du marché. On peut donc parler d'une formation des prix dans l'espace qui aboutit à un équilibre spatial des prix. Il ne faudra cependant pas confondre cet équilibre spatial des prix avec l'équilibre spatial du marché qui fait le lien entre l'offre et la consommation. Ce dernier est en effet obtenu en laissant la consommation réagir et interagir avec les prix.

Formalisation

La discrétisation du temps et de l'espace

L'unité de temps la mieux adaptée pour modéliser le fonctionnement du marché des combustibles ligneux est l'année. Ce choix a déjà été justifié par la présence de cycles annuels au niveau de l'exploitation forestière. Par conséquent, il faudra entendre par quantité un total annuel et par prix une moyenne annuelle. Par ailleurs, en vue d'aboutir à une formalisation simple du problème, l'espace aussi sera discrétisé. Supposons dans un premier temps qu'il existe un ensemble fini de localités de production et un ensemble fini de localités de consommation. Les variables associées à une localité de production pourront alors être interprétées comme les valeurs moyennes des lieux de production d'une zone. Pour les lieux de consommation, les choses se présentent de façon un peu plus complexe, puisqu'à priori, les prix de vente au détail devraient varier avec la taille des agglomérations. Il conviendra donc d'associer à chaque classe de taille d'agglomération une localité de consommation.

Pour préciser le problème

Le problème de la formation des prix a été posé ci-dessus en termes très généraux. Il convient de donner ici quelques précisions sur le contexte dans lequel les prix sont supposés se former.

L'état fixe à l'avance, théoriquement du moins, des quotas de production de bois de feu et des quotas de production de charbon de bois. Il délivre aussi des permis de circulation mentionnant la destination du combustible. Théoriquement donc, les quantités prélevées et les flux sont contrôlés par l'état. Dans la pratique, comme cela a été décrit ci-dessus, les quotas ne sont pas

respectés. Par ailleurs, les exploitants forestiers ont une certaine liberté pour choisir la destination de leur production.

C'est pourquoi nous supposons pour commencer que les exploitants forestiers ne sont limités, du côté de la production, que par des quantités de bois disponible, et qu'ils décident librement de la forme (bois de feu ou charbon de bois) et des destinations qu'ils entendent donner à leur production. Nous examinerons par la suite dans quel sens il convient de modifier le modèle obtenu pour tenir compte des interventions de l'Etat à d'autres niveaux que celui des quotas.

Notations

(des explications complémentaires seront données dans le texte)

- x_i = quantité de bois prélevée dans la localité de production i
- y_{b_j} = quantité de bois de feu consommée dans la localité de consommation j
- y_{c_j} = quantité de charbon de bois consommée dans la localité de consommation j
- $q_{b_{ij}}$ = quantité de bois de feu transportée de la localité de production i à la localité de consommation j
- q_b = matrice des quantités de bois de feu transportées
- $q_{c_{ij}}$ = quantité de charbon de bois transportée de la localité de production i à la localité de consommation j
- q_c = matrice des quantités de charbon de bois transportées
- $p_{b'_j}$ = prix rendu-destination du bois de feu dans la localité de consommation j
(ne comprend pas la marge des revendeurs)
- $p_{c'_j}$ = prix rendu-destination du charbon de bois dans la localité de cons. j
- p_{b_j} = prix du bois de feu au détail dans la localité de consommation j
- p_{c_j} = prix du charbon de bois au détail dans la localité de consommation j
- R_i = quantité de bois disponible pour la commercialisation dans la localité de production i
- k_i = coefficient d'équivalence charbon-bois de la localité de production i
(quantité nécessaire à la production d'une unité de charbon)

- cb'_{ij} = prix du transport du bois de feu de la localité de production i à la localité de consommation j
- cc'_{ij} = prix du transport du charbon de bois de la localité de production i à la localité de consommation j
- $mb1_i$ = prix minimal du bois de feu dans la localité de production i
- $mc1_i$ = prix minimal du charbon de bois dans la localité de production i
- m_i = marge supplémentaire réalisée sur le bois prélevé par les producteurs de la localité de production i
- $mb2_j$ = marge des revendeurs réalisée sur le bois de feu dans la localité de consommation j
- $mc2_j$ = marge des revendeurs réalisée sur le charbon de bois dans la localité de consommation j
- m = nombre de localités de production
- n = nombre de localités de consommation

Avec les notations ci-dessus le problème étudié peut être reformulé comme suit :

Déterminer le vecteur des quantités prélevées (x_1, \dots, x_m) , les matrices des quantités transportées qb et qc et les vecteurs des prix (pb_1, \dots, pb_n) et (pc_1, \dots, pc_n) qui respectent les lois de comportement des agents économiques impliqués.

Les contraintes qui traduisent les lois de comportement des agents économiques, ainsi que certaines contraintes propres à tout problème de formation des prix, et que l'on peut appeler contraintes physiques, constituent les conditions d'équilibre des prix. Nous allons essayer de les dégager en commençant par les contraintes physiques.

Les contraintes physiques

Les contraintes de non-négativité

Toutes les quantités et tous les prix doivent être non-négatifs. Cette contrainte physique se traduit entre autres par les équations suivantes :

$$(1a) \quad x_i \geq 0 \quad (i = 1, \dots, m)$$

$$(1b) \quad m_i \geq 0 \quad (i = 1, \dots, m)$$

$$(2a) \quad qb_{ij} \geq 0, \quad pb_j \geq 0 \quad (i = 1, \dots, m) \quad (j = 1, \dots, n)$$

$$(2b) \quad qc_{ij} \geq 0, \quad pc_j \geq 0 \quad (i = 1, \dots, m) \quad (j = 1, \dots, n)$$

Les contraintes d'équilibre des flux

Le total des combustibles ligneux exportés par une localité de production exprimé en termes de bois prélevé doit être égal au bois prélevé dans cette localité de production.

Si nous appelons k_i le coefficient d'équivalence charbon-bois (quantité de bois nécessaire à la production d'une unité de charbon) dans la localité de production i , alors cette contrainte se traduit par l'équation suivante:

$$(3) \quad \sum_{j=1}^n qb_{ij} + k_i \sum_{j=1}^n qc_{ij} = x_i \quad (i = 1, \dots, m)$$

D'autre part, les totaux de bois et de charbon importés par une localité de consommation doivent être égaux aux quantités consommées de bois et de charbon respectivement (nous supposons qu'il n'y a pas de stockage interannuel). Cette contrainte donne lieu aux équations suivantes :

$$(4a) \quad \sum_{i=1}^m qb_{ij} = y_{bj} \quad (j = 1, \dots, n)$$

$$(4b) \quad \sum_{i=1}^m qc_{ij} = y_{cj} \quad (j = 1, \dots, n)$$

La limitation des ressources

Le bois prélevé dans une localité de production ne doit pas dépasser la quantité de bois disponible pour la commercialisation⁵. Cette contrainte s'écrit :

$$(5) \quad x_i \leq R_i \quad (i = 1, \dots, m)$$

⁵ Cf. paragraphe 5.3.4.

Le comportement des producteurs

Les hypothèses sur le comportement des producteurs

Les ouvriers recevant des revenus très faibles, à la limite des besoins de subsistance, on peut admettre que l'élasticité du prix de la main d'oeuvre par rapport à la quantité produite est nulle. Quant aux exploitants forestiers, qui sont les véritables producteurs au sens économique du terme, ils n'entameront la production de bois ou de charbon que s'ils peuvent réaliser une certaine marge bénéficiaire minimale en vendant leur production à un transporteur (ou en louant les services d'un transporteur pour aller vendre leur production dans une localité de consommation).

Ces réflexions nous conduisent à énoncer l'hypothèse suivante :

Hypothèse 1 : Il existe en chaque localité de production i un prix minimal mb_{1i} du bois et un prix minimal mc_{1i} du charbon pour lesquels du bois respectivement du charbon de bois peuvent être produits (jusqu'à épuisement de la quantité disponible R_i), et en dessous desquels il n'y a pas de production.

Si il y a production, les exploitants patentés d'une localité de production se partagent la quantité de bois disponible de cette localité. Nous supposons qu'il n'y a pas d'entente entre ces exploitants patentés⁶ de sorte que les producteurs ne puissent vendre leur production qu'aux prix minima tant qu'il n'y a pas épuisement du bois disponible pour la commercialisation. C'est ce que dit l'hypothèse suivante :

Hypothèse 2 : Les producteurs d'une localité de production i ne peuvent réaliser une marge supplémentaire m_i non-nulle sur le bois prélevé que lorsque la quantité de bois disponible R_i est épuisée.

Cette hypothèse se traduit par l'équation suivante :

$$(6) \quad (R_i - x_i) m_i = 0$$

Il ne peut exister de marges supplémentaires spécifiques à un combustible. Si une marge supplémentaire m_i est réalisée sur le bois de feu produit dans une localité de production i , cette même marge doit être réalisée sur le charbon produit exprimé en termes de bois prélevé. Sinon, les producteurs ne produiraient que le combustible qui leur procure la plus grande marge supplémentaire par unité de bois prélevé.

⁶ Lors de la campagne d'exploitation forestière 1988/89, les coopératives et sociétés bénéficiaires de quotas de production étaient au nombre de 35 dans la région administrative de Kolda et de 42 dans celle de Tambacounda. Il est donc très probable qu'il n'y ait effectivement pas entente au niveau des exploitants patentés qui sont membres des différentes coopératives et sociétés.

Les équations de base de la formation des prix

Lorsqu'un flux de combustible non-nul s'établit entre une localité de production i et une localité de consommation j , le prix de vente au détail en j doit être la somme du prix minimal de production, de la marge supplémentaire des producteurs, du prix de transport et de la marge des revendeurs. En prenant l'exemple du bois, cette contrainte s'écrit :

Si $q_{bij} > 0$

$$m_i + mb1_i + cb'_{ij} + mb2_j = p_{bj} \quad (i = 1, \dots, m) \quad (j = 1, \dots, n)$$

Lorsque le prix de vente au détail qui résulterait du transport d'un combustible d'une localité de production i à une localité de consommation j dépasse le prix de vente au détail effectif, le flux correspondant du combustible en question doit être nul. Toujours pour l'exemple du bois, cette contrainte s'écrit :

Si $m_i + mb1_i + cb'_{ij} + mb2_j > p_{bj}$,

$$q_{bij} = 0 \quad (i = 1, \dots, m) \quad (j = 1, \dots, n)$$

L'équivalent de ces deux contraintes s'écrit, pour le bois :

$$(7a) \quad m_i + mb1_i + cb'_{ij} + mb2_j \geq p_{bj}$$

$$(m_i + mb1_i + cb'_{ij} + mb2_j - p_{bj}) \cdot q_{bij} = 0$$

Pour le charbon, ces mêmes contraintes s'écrivent :

$$(7b) \quad k_i m_i + mc1_i + cc'_{ij} + mc2_j \geq p_{cj}$$

$$(k_i m_i + mc1_i + cc'_{ij} + mc2_j - p_{cj}) \cdot q_{cij} = 0$$

Deux composantes des prix de vente au détail ont déjà été analysées: les prix minimaux de production $mb1_i$ et $mc1_i$ et les marges supplémentaires m_i . Etudions maintenant les comportements des transporteurs et des revendeurs pour en tirer des conclusions sur les prix du transport et les marges des revendeurs.

Le comportement des transporteurs et revendeurs

Les frets "aller" : une activité marginale des transporteurs

Les camions qui font le transport du bois de feu et du charbon de bois ne sont pas exclusivement affectés au transport de ces combustibles ligneux. Selon THIAM (1984), "c'est à la suite d'un flux continu de marchandises de Dakar vers l'intérieur du pays que les camions transportent, au retour, du bois de chauffe, du charbon de bois et d'autres matières premières comme l'arachide, la gomme arabique." La Banque Mondiale (1989), sur la base d'un rapport de MADON et MATLY (1987), qui semble s'être largement inspiré de l'étude de THIAM, va jusqu'à prétendre que "les camions doivent trouver des frets "aller" pour rendre le voyage bénéficiaire". Le prix du transport des combustibles ligneux serait dans ce cas dépendant du rapport entre les flux "aller" de marchandises et les flux "retour" de matières premières (combustibles ligneux, arachide, coton, etc.). Par exemple, une augmentation des seuls flux de combustibles ligneux aurait pour conséquence un excédant de capacité de transports à l'aller, ce qui ferait baisser les prix des transports "aller" et monter les prix des transports "retour".

Cependant, tous les experts du système énergétique sénégalais ne sont pas du même avis. Dans l'étude Trans-Energ (1982), la totalité des coûts du voyage aller-retour sont visiblement imputés au transport du combustible. RIBOT, en faisant une ébauche du compte d'exploitation d'un transporteur, ne fait pas non plus état de revenus lors du voyage "aller". En fait, la répartition du prix d'un aller-retour sur les courses "aller" et "retour" n'est pas connue. C'est ce que reconnaît THIAM lorsqu'il écrit : "une analyse du compte d'exploitation de ces transporteurs permettrait certainement d'évaluer les proportions entre le transport du combustible ligneux et celui des autres marchandises. Malheureusement, de telles analyses n'existent pas. A défaut d'analyses micro-économiques nous pouvons toutefois avoir recours au raisonnement suivant : La valeur des marchandises que les habitants des villages et petites villes de l'intérieur du pays importent des grandes villes ne peut guère être supérieure au revenu monétaire qu'ils tirent de l'exportation de combustibles ligneux et autres matières premières (produits agricoles notamment). Or, les marchandises importées sont souvent des produits manufacturés et leur prix par unité de masse est bien plus élevé que le prix par unité de masse des matières premières exportées. Par conséquent, les masses transportées de l'intérieur du pays vers les grandes villes sont bien plus importantes que les masses transportées dans l'autre sens. Ce qui signifie que les camions seront pleins lors de leur trajet "retour", mais pas lors de leur trajet "aller". Cette déduction est confirmée par les observations : les camions sont toujours pleins lorsqu'ils arrivent à Dakar au terme d'un voyage "retour".

Si maintenant nous admettons qu'il n'y a pas d'entente entre les transporteurs, hypothèse qui semble acceptable vu le nombre élevé de transporteurs⁷, ceux-ci proposeront leur capacité de transport "aller" à des prix très bas proches des coûts supplémentaires occasionnés par un transport de marchandises par rapport à un aller à vide. Les coûts d'un aller à vide seront imputés au prix du transport "retour", et de nombreux voyages "aller" se font probablement avec des camions vides ou presque vides. Ainsi les transporteurs n'ont pas besoin de frets "aller" pour justifier économiquement leurs voyages, et le transport de marchandises à l'aller ne leur procure qu'un appoint de revenu.

Si nous appliquons ces réflexions au problème de la formation des prix, nous pouvons dire que les prix du transport cb'_{ij} et cc'_{ij} des combustibles ligneux d'une localité de production i à une localité de consommation j ne dépendent pas de la disponibilité de fret allant de j à i .

L'adaptation des capacités de transport au volume de la demande de transport

Le transport des combustibles ligneux procure aux transporteurs un certain bénéfice net que l'on peut considérer comme étant la rémunération du capital investi dans les camions.

Des variations du taux de rémunération du capital investi dans les camions peuvent apparaître lorsque la demande de capacité de transport s'écarte de la capacité de transport offerte par les transporteurs : le bénéfice net augmentera lors d'une brusque augmentation de la demande de capacité de transport alors qu'il baissera dans le cas contraire. Nous supposons toutefois que d'une année à l'autre des mécanismes économiques d'investissement et de retrait du capital permettent l'adaptation de la capacité de transport à la demande. Nous pouvons faire les hypothèses suivantes :

Tant que le taux de rémunération du capital investi dans les camions est supérieur au taux moyen de rémunération des capitaux comparables au Sénégal, de nouveaux investisseurs s'intéressent au transport. Dans le cas contraire, les transporteurs retirent leurs capitaux du transport pour les investir dans des branches économiques plus lucratives. Les retraits de capitaux peuvent se faire par gel de l'investissement de renouvellement : des camions arrivant au terme de leur durée de vie économique ne sont plus remplacés. Ainsi le rapport entre la capacité et la demande est maintenue à un niveau constant.

Par suite, nous pouvons considérer que les marges bénéficiaires ne dépendent pas de la demande de capacité de transport - sous réserve bien entendu de variations brusques de cette demande de capacité.

⁷ Selon MADON et MATLY (1987), le nombre des camions affectés régulièrement ou occasionnellement au transport des combustibles ligneux serait de l'ordre d'un millier et selon A. THIAM (1984), un transporteur disposerait de 1 à 2 camions. Il y aurait donc 500 à 1000 transporteurs.

Les autres constituants des prix du transport sont les coûts, dont les principaux sont :

- l'amortissement des camions
- les coûts de carburant et d'entretien
- les charges salariales liées aux chauffeurs et aux apprentis.

Nous pouvons considérer que ces autres constituants du prix du transport ne dépendent pas non plus de la demande de capacité de transport.

L'hypothèse suivante résume les réflexions faites sur le comportement des transporteurs :

Hypothèse 3 : Les prix du transport cb'_{ij} et cc'_{ij} sont des constantes (c'est-à-dire indépendants des quantités transportées) pour tout couple d'une localité de production i et d'une localité de consommation j .

Bien entendu, les prix du transport devraient varier d'une année à l'autre avec les composantes des coûts et, dans le temps, avec le taux de rémunération moyen du capital au Sénégal.

Les marges des revendeurs - coxeurs et détaillants

Les détaillants sont très nombreux et l'on peut sans autre admettre que leurs marges restent proches de ce qui est nécessaire à la subsistance, quelle que soit l'évolution des quantités échangées.

Pour ce qui est des coxeurs, les quelques réflexions présentées ci-dessus au sujet de leurs revenus permettent de supposer que leurs marges sont d'une certaine façon "justes", étant donné qu'il y a concurrence. Cependant, leurs marges pourraient varier avec les prix des combustibles, puisque l'une de leurs principales prestations semble être l'octroi de crédit aux détaillants. En supposant un taux de rémunération des crédits constant et une durée moyenne constante pendant laquelle le capital d'un coxeur est immobilisé, le montant de la rémunération des crédits par unité de produit devrait varier proportionnellement au prix du produit. Toutefois, un petit calcul peut montrer que la rémunération des crédits ne devrait représenter qu'une petite part de la rémunération totale de coxeurs. Et la rémunération totale des coxeurs ne représente qu'environ 5% du prix de vente au détail du charbon. Par conséquent, l'utilisation de marges fixes ne devrait guère porter atteinte à la qualité de la modélisation de la formation des prix. D'où l'hypothèse suivante:

Hypothèse 4 : Les marges mb_{2j} et mc_{2j} réalisées par les revendeurs d'une localité de consommation j sur le bois et le charbon respectivement ne dépendent ni des prix ni des quantités échangées.

Extension de la notion de prix de transport

Etant donné que les prix minimaux, les prix du transport et les marges des revendeurs ne dépendent ni des quantités échangées, ni des prix du marché, et sont par conséquent des constantes dans le problème de la formation des prix, nous pouvons simplifier ce problème en définissant les deux nouvelles constantes suivantes :

$$cb_{ij} = mb_{1i} + cb'_{ij} + mb_{2j}$$

$$cc_{ij} = mc_{1i} + cc'_{ij} + mc_{2j}$$

Avec ces définitions, les équations (7a) et (7b) peuvent être réécrites :

$$(7a') \quad m_i + cb_{ij} \geq pb_j$$

$$(m_i + cb_{ij} - pb_j) qb_{ij} = 0 \quad (i = 1, \dots, m) \quad (j = 1, \dots, n)$$

$$(7b') \quad k_i m_i + cc_{ij} \geq pc_j$$

$$(k_i m_i + cc_{ij} - pc_j) qc_{ij} = 0 \quad (i = 1, \dots, m) \quad (j = 1, \dots, n)$$

L'équivalence charbon - bois*L'hypothèse de l'homogénéité spatiale du rendement de la carbonisation*

L'équation (3) ci-dessus exprime la concurrence entre le bois et le charbon au niveau des ressources. Du fait que k_j est un coefficient spécifique à la localité de production, cette équation rend difficile la résolution mathématique du problème. Or, l'hypothèse que le rendement de la carbonisation, $1/k_j$, soit le même dans tout le pays, est tout à fait acceptable :

Les exploitants patentés, tout comme leurs ouvriers, les sourghas, ne sont en général pas originaires de la région dans laquelle ils sont actifs. Selon THIAM (1984), 80 % des sourghas et 60 % des exploitants étaient originaires de Guinée en 1978. Pour des raisons historiques d'une part, en raison des facilités de communication entre producteurs d'autre part, les techniques de carbonisation employées, dont dépend le rendement de la carbonisation, devraient alors être à peu près les mêmes dans tout le Sénégal. C'est ce qui nous permet de cautionner l'hypothèse de l'homogénéité spatiale du rendement de la carbonisation.

Hypothèse 5 : Le rendement de la carbonisation est le même dans toutes les localités de production. Pour toute localité de production i , $k_i = k$.

L'ensemble des conditions d'équilibre et la résolution mathématique du problème seront beaucoup simplifiées par cette hypothèse.

Les conditions d'équilibre dans le cas de l'équivalence charbon - bois

Toute quantité de charbon peut être exprimée en termes de bois équivalent. La quantité de bois équivalente s'obtient en multipliant la quantité de charbon exprimée en termes de charbon par le coefficient d'équivalence charbon - bois k_i .

Supposons désormais que dans notre problème les quantités de charbon $q_{c_{ij}}$ et $y_{c_{ij}}$ sont exprimées en termes de bois équivalent et que les coûts, marges et prix se référant au charbon sont exprimées en unités monétaires par unité de bois équivalent.

Le coefficient k_i disparaît alors des équations (3) et (7b') qui deviennent :

$$(3) \quad \rightarrow \quad \sum_{j=1}^n q_{b_{ij}} + \sum_{j=1}^n q_{c_{ij}} = x_i \quad (i = 1, \dots, m)$$

$$(7b') \quad \rightarrow \quad m_i + c_{c_{ij}} \geq p_{c_j} \quad (i = 1, \dots, m) \quad (j = 1, \dots, n)$$

$$(m_i + c_{c_{ij}} - p_{c_j}) \cdot q_{c_{ij}} = 0 \quad (i = 1, \dots, m) \quad (j = 1, \dots, n)$$

On remarque dès lors une parfaite symétrie dans les conditions d'équilibre des prix entre les termes et conditions relatifs au bois et ceux relatifs au charbon : Lorsqu'une condition est spécifique au bois on trouve une condition analogue spécifique au charbon et vice-versa, et lorsqu'une condition n'est pas spécifique à un combustible, un terme spécifique à un combustible est toujours accompagné d'un terme spécifique à l'autre combustible.

Mettons à profit cette symétrie pour simplifier l'écriture des conditions d'équilibre des prix.

Posons :

$$y_j = y_{b_j} \quad (j = 1, \dots, n)$$

$$y_{n+j} = y_{c_j} \quad (j = 1, \dots, n)$$

$$q_{ij} = q_{b_{ij}} \quad (i = 1, \dots, m) \quad (j = 1, \dots, n)$$

$$q_{i \ n+j} = q_{c_{ij}} \quad (i = 1, \dots, m) \quad (j = 1, \dots, n)$$

$$p_j = p_{b_j} \quad (j = 1, \dots, n)$$

$$p_{n+j} = p_{c_j} \quad (j = 1, \dots, n)$$

$$c_{ij} = c_{b_{ij}} \quad (i = 1, \dots, m) \quad (j = 1, \dots, n)$$

$$c_{i \ n+j} = c_{c_{ij}} \quad (i = 1, \dots, m) \quad (j = 1, \dots, n)$$

En utilisant ces notations et en éliminant la variables (définie par $x_i = \sum_{j=n}^{2n} q_{ij}$), les conditions d'équilibre des prix deviennent:

$$(1) \quad m_i \geq 0 \quad (i = 1, \dots, m)$$

$$(2) \quad q_{ij} \geq 0 \quad p_j \geq 0 \quad (i = 1, \dots, m) \quad (j = 1, \dots, 2n)$$

$$(4) \quad \sum_{i=1}^m q_{ij} = y_j \quad (j = 1, \dots, 2n)$$

$$(5') \quad \sum_{j=1}^{2n} q_{ij} \leq R_i \quad (i = 1, \dots, m)$$

$$(6) \quad (R_i - \sum_{j=1}^{2n} q_{ij}) \cdot m_i = 0 \quad (i = 1, \dots, m)$$

$$(7) \quad m_i + c_{ij} \geq p_j \quad (i = 1, \dots, m) \quad (j = 1, \dots, 2n)$$

$$(m_i + c_{ij} - p_j) \cdot q_{ij} = 0 \quad (i = 1, \dots, m) \quad (j = 1, \dots, 2n)$$

Rappelons que R_i , y_j , et c_{ij} sont supposés constants dans cette problématique.

On peut interpréter ces conditions comme étant les conditions d'équilibre des prix dans un marché à $2n$ localités de consommation dans lequel les n premières localités de consommation consomment les quantités de bois y_{bj} alors que les n localités suivantes consomment les quantités de charbon y_{cj} exprimées en termes de bois équivalent.

Le problème du transport équivalent

Soit le problème d'optimisation suivant :

$$\text{minimiser} \quad f = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{2n} c_{ij} \cdot q_{ij}$$

$$\text{sous contraintes :} \quad \sum_{j=1}^{2n} q_{ij} - R_i \leq 0 \quad (i = 1, \dots, m)$$

$$y_j - \sum_{i=1}^m q_{ij} \leq 0 \quad (j = 1, \dots, 2n)$$

Il s'agit là d'un "problème du transport" de recherche opérationnelle.

Soit L le lagrangien de ce problème d'optimisation.

$$L = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{2n} c_{ij} q_{ij} + \sum_{i=1}^m \lambda_i \left(\sum_{j=1}^{2n} q_{ij} - R_i \right) + \sum_{j=1}^{2n} \mu_j \left(y_j - \sum_{i=1}^m q_{ij} \right)$$

Lorsque f est optimale, les conditions du premier ordre ou de Kuhn-Tucker⁸ ci-dessous sont satisfaites (voir par exemple CHIANG, 1984) :

$$\begin{aligned} \text{(I)} \quad & \text{(a)} \quad \frac{\partial L}{\partial q_{ij}} = c_{ij} + \lambda_i - \mu_j \geq 0 \\ & \text{(b)} \quad (c_{ij} + \lambda_i - \mu_j) q_{ij} = 0 \qquad \qquad \qquad \text{(c)} \quad q_{ij} \geq 0 \\ \text{(II)} \quad & \text{(a)} \quad \frac{\partial L}{\partial \lambda_i} = \sum_{j=1}^{2n} q_{ij} - R_i \leq 0 \\ & \text{(b)} \quad \lambda_i \left(\sum_{j=1}^{2n} q_{ij} - R_i \right) = 0 \qquad \qquad \qquad \text{(c)} \quad \lambda_i \geq 0 \\ \text{(III)} \quad & \text{(a)} \quad \frac{\partial L}{\partial \mu_j} = y_j - \sum_{i=1}^m q_{ij} \leq 0 \\ & \text{(b)} \quad \mu_j \left(y_j - \sum_{i=1}^m q_{ij} \right) = 0 \qquad \qquad \qquad \text{(c)} \quad \mu_j \geq 0 \end{aligned}$$

$$(i = 1, \dots, m) \quad (j = 1, \dots, 2n)$$

Le problème d'optimisation étant linéaire, ces conditions sont suffisantes pour garantir l'optimalité de f ⁹.

Montrons que si les multiplicateurs de Lagrange λ_i et μ_j sont les marges m_i et les prix p_j respectivement, c'est-à-dire que si nous posons :

$$\begin{aligned} \lambda_i &= m_i & (i = 1, \dots, m) \\ \mu_j &= p_j & (j = 1, \dots, 2n) \end{aligned}$$

alors les conditions d'équilibre des prix sont respectées lorsque la fonction f est optimale.

La démonstration se fait à partir des conditions du premier ordre ci-dessus. Par substitution de m_i à λ_i et de p_j à μ_j , on fait apparaître les équivalences suivantes :

⁸ Terme habituellement réservé au cas plus général des problèmes d'optimisation non-linéaires.

⁹ D'après Kuhn et Tucker, la convexité des contraintes, associée à la concavité de la fonction objectif (conditions remplies dans le cas d'un problème linéaire) rendent ces conditions suffisantes (CHIANG, 1984).

$$\left. \begin{array}{l} \text{(Ia)} \\ \text{(Ib)} \end{array} \right\} \Leftrightarrow (7)$$

$$\left. \begin{array}{l} \text{(Ic)} \\ \text{(IIIc)} \end{array} \right\} \Leftrightarrow (2)$$

$$\text{(IIa)} \Leftrightarrow (5')$$

$$\text{(IIb)} \Leftrightarrow (6')$$

$$\text{(IIc)} \Leftrightarrow (1)$$

$$\text{(IIIa)} \Leftrightarrow (4)$$

Seule l'équivalence entre (IIIa) et (4) n'est à priori pas évidente, en raison de l'inégalité de (IIIa).

On se persuade toutefois rapidement que f ne peut pas être optimale si $\sum_i q_{ij} > y_j$

Du coup, (IIIa) peut être remplacée par $\sum_i q_{ij} = y_j$ et (IIIb) devient superflue.

Ainsi nous avons non seulement montré que les prix des combustibles ligneux étaient à l'équilibre lorsque f est optimale, mais en plus que l'optimalité de f , compte tenu des conditions du premier ordre, était équivalente aux conditions d'équilibre des prix¹⁰ Cette équivalence permet d'utiliser les algorithmes de programmation linéaire pour résoudre mathématiquement le problème.

Interprétation et enrichissement de l'équilibre spatial des prix

Interprétation de l'optimalité de f

L'existence d'un optimum global, national, du système de production et de transport des combustibles ligneux est un résultat intéressant. Rappelons la définition de la fonction minimisée:

$$f = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{2n} c_{ij} \cdot q_{ij}$$

Bien qu'un c_{ij} comprenne certaines marges bénéficiaires, on peut l'interpréter comme étant la somme des coûts par unité de produit pour un agent économique fictif qui louerait les services de tous les intervenants de la filière, entre i et j . On peut donc dire que f est une somme de coûts

¹⁰ On peut aussi montrer que les conditions d'équilibre des flux t traduisent l'optimalité du problème de transport si m_i et p_j sont les variables duales. En effet, d'après le théorème des écarts complémentaires appliqué au problème de transport, la condition (7b) implique l'optimalité d'un programme (dual) ayant

pour fonction objectif $\sum_{j=1}^{2n} p_j \cdot y_j - \sum_{i=1}^m m_i \sum_{j=1}^{2n} q_{ij}$ sous les contraintes (1) à (6')

de production, de transport et de distribution minimisée au niveau national. Une entreprise fictive qui aurait le monopole de la commercialisation des combustibles ligneux et qui chercherait à minimiser ses frais tout en louant les services des agents économiques actuels devrait arriver au même coût global que la multitude d'agents économiques actuels, et les flux q_{ij} resteraient inchangés.

Prise en compte d'interventions de l'Etat

Les conditions d'équilibre des prix ci-dessus ont été obtenues en supposant que l'Etat n'intervenait pas, ni pour imposer des quotas spécifiques à un combustible, ni pour forcer les producteurs à acheminer leur production vers telle ou telle destination. De pareilles interventions peuvent toutefois très facilement être modélisées. Il suffit pour cela d'ajouter au problème d'optimisation ci-dessus les contraintes correspondantes:

- $$\sum_{j=1}^n q_{ij} \leq Rb_i \quad (i = 1, \dots, m)$$
- $$\sum_{j=n+1}^{2n} q_{ij} \leq R_i - Rb_i \quad (i = 1, \dots, m)$$

signifient qu'une partie Rb_i de R_i est disponible pour être commercialisée en tant que bois de feu, le reste étant disponible pour être commercialisé en tant que charbon de bois.

- Des contraintes du type $q_{ij} \leq q_{max_{ij}}$ représentent des restrictions au libre choix des destinations par les producteurs.

Nous traiterons au paragraphe 4.3.2 de l'utilité de telles interventions de l'Etat et des possibilités qu'il convient d'aménager dans le modèle pour les représenter.

Dans l'immédiat, il convient de contrôler si les prix observés des combustibles ligneux au Sénégal se laissent effectivement interpréter comme le résultat d'un équilibre spatial tel qu'il a été décrit ci-dessus, et d'estimer par la même occasion les paramètres du modèle que sont les coûts c_{ij} .

4.1.3 Les prix de vente au détail et leur mesure

Les prix de vente au détail peuvent être estimés à partir de séries d'achats et de pesées de combustible. C'est ce processus qui sera appelé la "mesure" des prix. Des mesures de prix de

bois de feu et de charbon de bois ont été effectuées dans 27 villes du Sénégal afin de permettre le calage du modèle de formation des prix des combustibles ligneux.

Les chiffres obtenus seront d'autant plus fiables que certaines particularités de la vente au détail des combustibles ligneux auront été prises en considération. Certaines de ces particularités, l'augmentation des prix avec la quantité achetée et les variations saisonnières de prix, seront exposées ci-dessous. Suivra une liste des précautions qui devraient être prises pour effectuer une bonne mesure des prix, et une discussion des démarches qui ont effectivement été suivies. Au préalable, il convient cependant de dire quelques mots sur les prix officiels, afin de parer à l'objection suivante qui m'a été faite un jour au Sénégal : "Pourquoi chercher à déterminer les prix alors que ceux-ci sont fixés par l'Etat?".

Les prix officiels et leur contournement

La vente au détail du charbon de bois est soumise à la fixation autoritaire des prix. Les prix de vente au détail sont fixés pour chaque région administrative par arrêté conjoint du Ministère du Commerce et du Ministère de la Protection de la Nature. L'Etat cherche par ce biais à contrôler le prix d'un bien jugé de première nécessité. Le dernier arrêté, en date du 14 février 1986, a ainsi fixé le prix de vente du kg de charbon à Dakar à 40 FCFA.

Dans la réalité, les prix officiels ne sont pas respectés : les détaillants vendent des mesures de charbon, qu'ils appellent "kilogramme", au prix officiel du kg. Cependant, ces mesures ne sont pas pesées, et les écarts entre poids minimal et poids réel peuvent être considérables. A Dakar en 1990, le charbon était ainsi vendu à un prix réel moyen de 67 FCFA/kg (chiffre ENDA corrigé pour les quantités achetées).

Pour parer aux contrôles de prix par les agents de l'Etat, la plupart des détaillants sont équipés de balances. Certains détaillants font même le geste de la pesée, sans peser réellement. L'Etat est cependant conscient du fait que l'imposition de prix bas est incompatible avec sa politique de protection de l'environnement. Au nom de cette dernière, les quantités de bois coupées doivent être maintenues à des niveaux bas. Les prix bas en revanche favorisent la consommation de combustibles ligneux. Le respect simultané des prix officiels et des quotas conduirait infailliblement à d'intolérables situations de pénurie, d'autant plus que les quotas des zones de production les plus reculées seraient économiquement inexploitable. Signalons que des prix officiels existent aussi pour les zones de production, et qu'ils ne sont, eux non plus, pas respectés.

Dans cette étude, sauf précision contraire, le terme "prix" désignera toujours un prix réel, donc effectif, par opposition au prix officiel. En effet, les prix officiels n'ont quasiment aucune influence sur le fonctionnement du marché.

La variation des prix réels en fonction de la quantité vendue

Il est courant de rencontrer des prix unitaires qui baissent avec la quantité vendue. C'est pourtant le contraire qui semble se passer dans le cas de la vente au détail des combustibles ligneux au Sénégal. D'après de nombreuses mesures de prix, celui qui n'achète qu'un kilogramme de charbon obtient un prix significativement meilleur que celui qui en achète deux ou trois. Et celui qui achète du bois pour une grande cérémonie le paye plus cher que celui qui achète un fagot pour sa consommation journalière.

Ces phénomènes sont difficiles à expliquer. Dans le cas du charbon, SARR, DIAO et SOW (1987) évoquent une possible influence des prix officiels : "On peut affirmer que plus la quantité à acheter est élevée, plus il est difficile de contrôler de vue le poids réel vendu, ... par conséquent, l'écart entre le poids théorique et le poids réel se creuse d'avantage". Dans le cas du bois, les gros morceaux sont peut-être de meilleure qualité que les plus petits, ou simplement plus demandés, mais ce ne sont là que des hypothèses. Le tableau 4.2 donne les résultats des principales études qui ont été faites pour cerner la variation des prix du charbon en fonction de la quantité vendue.

Pesées	Quantité vendue					
	1 kg	2 kg	3 kg	4 kg	5 kg	Sac50kg
CERER et CTS, 1984	46					55
CTS et DCIP/MC, 1987 :						
• Achats chez différents détaillants	50	55	59	62	64	
• Achats chez le même détaillant	53	62	58	65	68	
DEMG/MICA et ABF, 1991 (env. 2x200 mesures; écart significatif)	50		63			

Tableau 4.2 Prix réels pour différentes quantités vendues

Sources : SARR, DIAO et SOW, 1987; DIEME, KONE et LAURA, 1991

Les quantités les plus souvent achetées par les ménages sont de 2,5 et 3 kg (DIEME, KONE et LAURA, 1991). Ce sont donc les prix pratiqués pour ces quantités-là qu'il convient de considérer dans l'étude du marché des combustibles domestiques. Malheureusement, les prix relevés par ENDA, les seules moyennes annuelles des prix réels disponibles année par année

pour Dakar, correspondent à des quantités de 1 kg. Nous les corrigerons en les majorant de 10 %¹¹.

De même, il convient d'utiliser autant que possible pour le bois de feu les prix correspondant aux quantités habituellement consommées.

Les variations saisonnières des prix

Des variations saisonnières des prix des combustibles ligneux existent, mais elles semblent être plutôt faibles. THIAM (1984) et SOW (1990) mentionnent l'effet de la traite de l'arachide (entre octobre et janvier) sur la disponibilité des camions et, par conséquent, sur les prix au détail des combustibles ligneux. La trêve officielle dans l'exploitation forestière et l'accès difficile aux ressources pendant la saison des pluies devraient eux aussi faire monter les prix. Néanmoins, les fluctuations observées au niveau des prix de vente au détail sont faibles, comme en témoignent les mesures des prix réels du charbon effectuées régulièrement par ENDA (ENDA, 1988, et communications orales de collaborateurs de l'ENDA). La figure 4.3 représente l'évolution des prix de vente au détail à Dakar en 1987 (mesures commencées par RIBOT et poursuivies par ENDA).

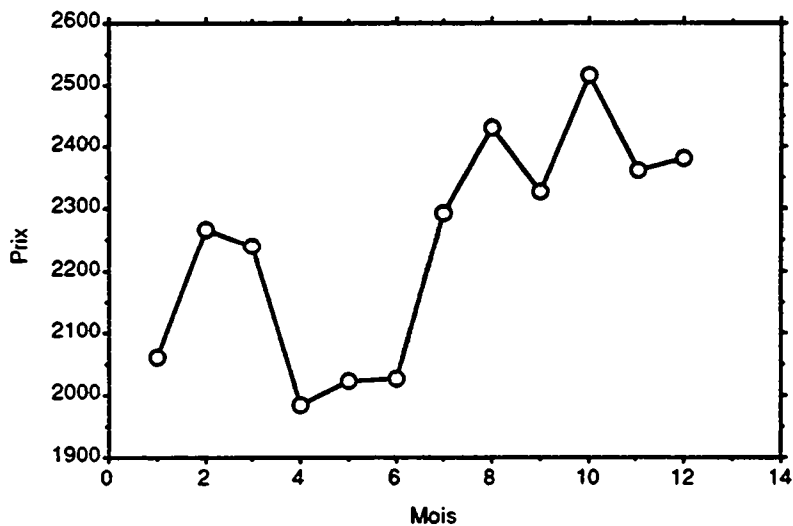


Fig. 4.3 Variations saisonnières des prix de vente au détail à Dakar en 1987

D'après RIBOT (1990)

¹¹ Ce chiffre est l'écart observé en 1987 entre le prix pour 1 kg (53 FCFA/kg) et celui pour 3 kg (58 FCFA/kg) lors d'achats successifs chez un même détaillant. De plus, il ramène le prix relevé par ENDA en 1987 (54 FCFA/kg) à la valeur moyenne donnée par CTS et DCIP/MC (SARR, DIAO et SOW, 1987) pour 3 kg (59 FCFA/kg).

Dans la deuxième moitié de l'année (de juillet à décembre) les prix sont plus élevés que dans la première moitié (de janvier à juin). La moyenne des six premiers mois (2100 FCFA/sac) est ainsi de 6 % inférieure et celle des six derniers mois (2386 FCFA/sac) de 6 % supérieure à la moyenne annuelle (2243 FCFA/sac). Les variations saisonnières des prix, bien que significatives, semblent donc être relativement faibles et l'utilisation de prix moyens annuels dans l'étude de l'offre des combustibles ligneux ne devrait pas masquer des phénomènes saisonniers importants.

La mesure des prix

"Mesurer un prix" est un raccourci du langage utilisé pour désigner tout un processus d'estimation d'un prix. Les choses sont encore assez simples lorsqu'il s'agit de déterminer le prix d'un achat isolé : la somme payée est à diviser par la quantité obtenue, cette dernière étant déterminée par pesée. Lorsqu'il s'agit d'estimer un prix moyen payé par les consommateurs d'une localité donnée, un certain nombre de précautions doivent être prises :

1. La qualité moyenne de l'échantillon devrait être proche de la qualité moyenne des achats des consommateurs. Différentes qualités peuvent être distinguées en fonction de la teneur en eau, de la provenance et de la "granulométrie" du combustible :
 - La teneur en eau des combustibles peut s'élever pendant la saison des pluies. Elle semble en revanche rester pratiquement constante pendant le reste de l'année. Il est peu probable que sa variation entraîne de grandes variations de prix pour le combustible ramené à une teneur en eau de référence, étant donné que le combustible est vendu au volume plutôt qu'au poids.
 - L'espèce ligneuse dont provient le combustible est déterminante pour son pouvoir calorifique. Le charbon de *Prosopis Africana* est par exemple très prisé. Il est utilisé par les bijoutiers et forgerons et son prix sera nécessairement plus élevé.
 - La granulométrie du charbon devrait influencer son prix, rien qu'en raison des différences d'arrangement qu'elle peut provoquer sur le plateau ou dans le récipient servant de mesure lors de la vente. De même, les gros morceaux de bois devraient avoir des prix différents des petits.

Il faut donc veiller à ce que les qualités achetées pour la mesure de prix soient les mêmes que celles habituellement achetées par les consommateurs. Cette condition peut être remplie si les achats sont faits par des consommateurs réels et comme pour leurs propres besoins.

2. Une autre raison pour laquelle les achats devraient être faits par des personnes qui ont l'habitude d'en faire est que les vendeurs risquent de modifier leur comportement - et plus particulièrement leurs prix - lorsqu'ils sont face à un consommateur inhabituel. (Important dans le cas du charbon, car les vendeurs pourraient craindre un contrôle de prix par des agents de l'Etat).
3. Les quantités achetées doivent correspondre aux quantités habituellement achetées par les consommateurs, en raison des variations du prix avec la quantité vendue. Dans le cas contraire, une correction doit être apportée aux valeurs obtenues.
4. Les achats devraient couvrir toute la période pour laquelle le prix moyen est cherché (l'année pour un prix moyen annuel), pour que le résultat ne soit pas biaisé par des variations saisonnières des prix.
5. Les achats devraient couvrir l'étendue géographique pour laquelle le prix moyen est cherché, de légères variations de prix existant probablement d'un quartier à un autre. D'assez grandes variations de prix à l'intérieur de Dakar ont été signalées en 1987 par la CTS (SARR, DIAO et SOW, 1987). Mais ces résultats n'ont pas été confirmés par DIEME, KONE et LAURA (1991).
6. Un nombre suffisant de pesées doit être fait en raison des importantes variations de poids que l'on peut constater en effectuant plusieurs achats successifs chez un même vendeur.

Toutes ces précautions ont été prises par ENDA lors de leurs mesures des prix réels du charbon à Dakar, exception faite du point 3. La correction de 10 % apportée pour cette raison aux chiffres de ENDA a déjà été mentionnée. Pour 1991, nous leur préférons cependant les chiffres obtenus par DEMG/MICA et ABF (DIEME, KONE et LAURA, 1991). Le point 4 n'est pas vérifié pour ces derniers mais les variations saisonnières des prix semblent être plus faibles que les variations des prix liées à la quantité achetée. Lors des mesures dans l'intérieur du pays, effectuées en 1990 et 1991 par DEMG/MICA et ENDA dans le cadre du projet MASENS, les quantités achetées correspondaient aux achats usuels des consommateurs. Cependant, il n'a pas été possible de couvrir l'année, et les achats n'ont été effectués qu'à un moment de la saison sèche. Pour le bois de feu, les achats ont été effectués directement par les enquêteurs¹².

Les prix qui seront utilisés pour le calage du modèle de formation des prix des combustibles ligneux sont donnés au tableau 4.3.

¹² Il est peu probable que cette démarche ait beaucoup influencé les prix, les tas ou fagots étant préparés à l'avance par les vendeurs et leurs prix étant connus de tout le monde. Les enquêteurs n'auront cependant pas toujours choisi les qualités les plus couramment achetées.

Ville	Prix du charbon			Prix du bois			Année
Dakar	63	+/-	1	27	+/-	2	1991
Kayar	57	+/-	6	26	+/-	1	1991
Diourbel	38	+/-	5	18	+/-	2	1991
Fatick	44	+/-	10	17	+/-	1	1991
Mbour	71	+/-	5	21	+/-	3	1991
Kaolack	48	+/-	1	19	+/-	1	1990
Thies	58	+/-	12	25	+/-	3	1991
Touba	51	+/-	4	13	+/-	1	1991
Gossas	70	+/-	6	12	+/-	1	1990
Tivaouan	44	+/-	3	18	+/-	4	1991
Louga	50	+/-	3	20	+/-	1	1991
Sagata	54	+/-	2	18	+/-	0	1991
Kaffrine	46	+/-	4	8	+/-	1	1990
Nioro	47	+/-	8	11	+/-	2	1991
StLouis	56	+/-	2	30	+/-	2	1991
Dagana	45	+/-	13	26	+/-	2	1991
Bakel	80	+/-	9	6	+/-	1	1991
Matam	26	+/-	2	10	+/-	2	1991
Ndioum	35	+/-	0	19	+/-	8	1991
Linguere	44	+/-	2	22	+/-	1	1991
Tamba	35	+/-	2	10	+/-	1	1990
Goudiry	66	+/-	4	7	+/-	0	1990
Kedougou	10	+/-	0	10	+/-	1	1990
Ziguinch	32	+/-	4	14	+/-	2	1991
Oussouye				9	+/-	1	1991
Marsass	26	+/-	1	5	+/-	0	1991
Kolda	57	+/-	6	7	+/-	1	1991

Intervalles de confiance à 90%

Tableau 4.3 Les prix des combustibles ligneux au Sénégal [FCFA/kg]

Sources : enquêtes MASENS; DEMG/MICA et (pour Dakar) ABF

Les prix mesurés en 1990 n'ont probablement pas changé entre 1990 et 1991. Ils seront utilisés comme s'ils étaient de la même année que ceux mesurés en 1991¹³.

4.1.4 Des relations prix - éloignement à un modèle opérationnel

Les conditions d'équilibre spatial des prix présentés au paragraphe 4.1.2 font intervenir les paramètres c_{ij} . A l'aide des prix de vente au détail dont la mesure a été décrite ci-dessus, nous allons tenter de répondre à la question suivante: Existe-t-il des règles simples pour déterminer un ensemble de valeurs c_{ij} de telle sorte que les prix résultant des conditions d'équilibre des prix soient proches des prix mesurés? Nous verrons que la réponse est affirmative, et nous

¹³ Une correction pourrait être apportée pour tenir compte de l'évolution de la valeur de l'argent. L'indice des prix à la consommation pour 1991 qu'il conviendrait d'utiliser ici n'était cependant pas encore disponible lors de l'utilisation des prix. Notons que l'indice des prix n'a pratiquement pas varié entre 1989 et 1990 (il est passé de 492,2 à 493,8).

aboutirons à un modèle opérationnel, permettant d'estimer des prix moyens par zone et classe de taille d'agglomération.

Les axes d'approvisionnement

Quand les prix de vente au détail sont les c_{ij} cherchés

Reprenons l'équation (7) des conditions d'équilibre des prix:

$$m_i + c_{ij} \geq p_j \quad (i = 1, \dots, m) \quad (j = 1, \dots, 2n)$$

$$(m_i + c_{ij} - p_j) \cdot q_{ij} = 0 \quad (i = 1, \dots, m) \quad (j = 1, \dots, 2n)$$

S'il existe, pour une localité de consommation j , une localité de production i telle que

$$(i) \quad q_{ij} > 0 \quad \text{et}$$

$$(ii) \quad m_i = 0, \quad \text{alors (7) ci-dessus permet d'écrire: } c_{ij} = p_j,$$

donc d'estimer c_{ij} à partir de la valeur mesurée de p_j .

D'après l'équation (6) $(R_i - x_i) m_i = 0$, la condition (ii) est satisfaite dans tous les cas où $x_i < R_i$. Donc, si on peut identifier une localité de production i pour laquelle la quantité de bois disponible n'est pas épuisée ou tout juste épuisée (il faut pouvoir imaginer que, en cas de besoin, les producteurs pourraient facilement obtenir quelques tonnes de combustible supplémentaire), alors $c_{ij} = p_j$ est valable pour toutes les localités de consommation approvisionnées à partir de i . Nous examinerons comment les c_{ij} évoluent lorsqu'on part d'une telle localité i , en s'éloignant d'elle le long d'un axe d'approvisionnement en combustibles ligneux.

L'éloignement des ressources

Appelons "éloignement des ressources" en j la distance qui sépare une localité de consommation j de la localité de production i (si elle existe), pour laquelle les conditions (i) et (ii) ci-dessus sont vérifiées. D'après la définition de c_{ij} ,

$$c_{ij} = c_{bij} = m b_{1i} + c'_{bij} + m b_{2j} \quad (i = 1, \dots, m) \quad (j = 1, \dots, n)$$

$$c_{ij} = c_{cij} = m c_{1i} + c'_{cij} + m c_{2j} \quad (i = 1, \dots, m) \quad (j = n+1, \dots, 2n)$$

c_{ij} comprend:

- un terme (mb_{1j} ou mc_{1j}) qui ne varie pas le long d'un axe d'approvisionnement, donc indépendant de l'éloignement des ressources;
- un terme (cb'_{ij} ou cc'_{ij}) qui représente le prix du transport et dont on peut s'attendre à ce qu'il varie linéairement avec l'éloignement des ressources;
- un terme spécifique à la localité de consommation.

D'où l'intérêt de l'étude de la relation prix de vente au détail - éloignement des ressources sur les axes d'approvisionnement en combustibles ligneux.

Les axes Sénégal Oriental - Dakar et Fleuve - St Louis

Au Sénégal, on peut identifier deux "localités" de production (en réalité on ne pourra que délimiter approximativement des périmètres) pour lesquelles la quantité de bois disponible n'est que "tout juste" épuisée, pour lesquelles par conséquent la condition (ii) est vérifiée. L'une de ces "localités" est située en Haute Casamance, dans la région de l'Anambé, près de Vélingara; la localité de consommation la plus éloignée approvisionnée à partir de là est Dakar. L'autre est située dans la Région du Fleuve, près de Matam; elle approvisionne Saint-Louis. Les axes correspondants, Sénégal Oriental - Dakar et Fleuve - Saint-Louis, sont représentés sur la figure 4.4.

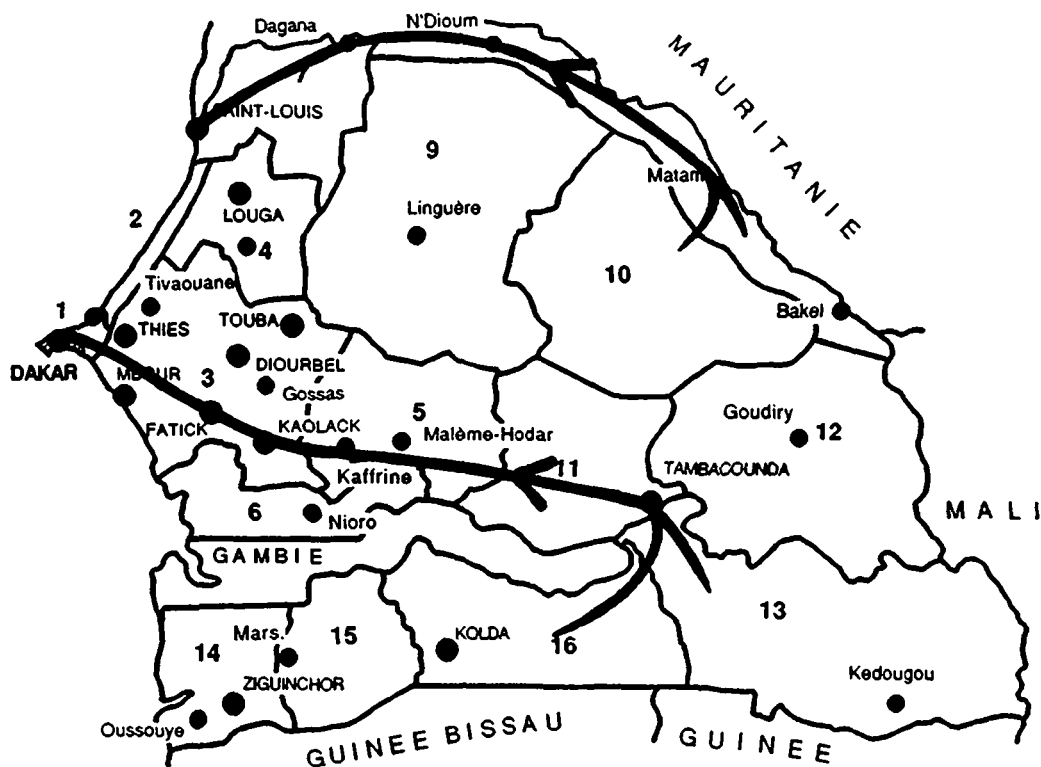


Fig. 4.4 Les principaux axes d'approvisionnement en combustibles ligneux du Sénégal

Les relations prix - éloignement pour le bois de feu

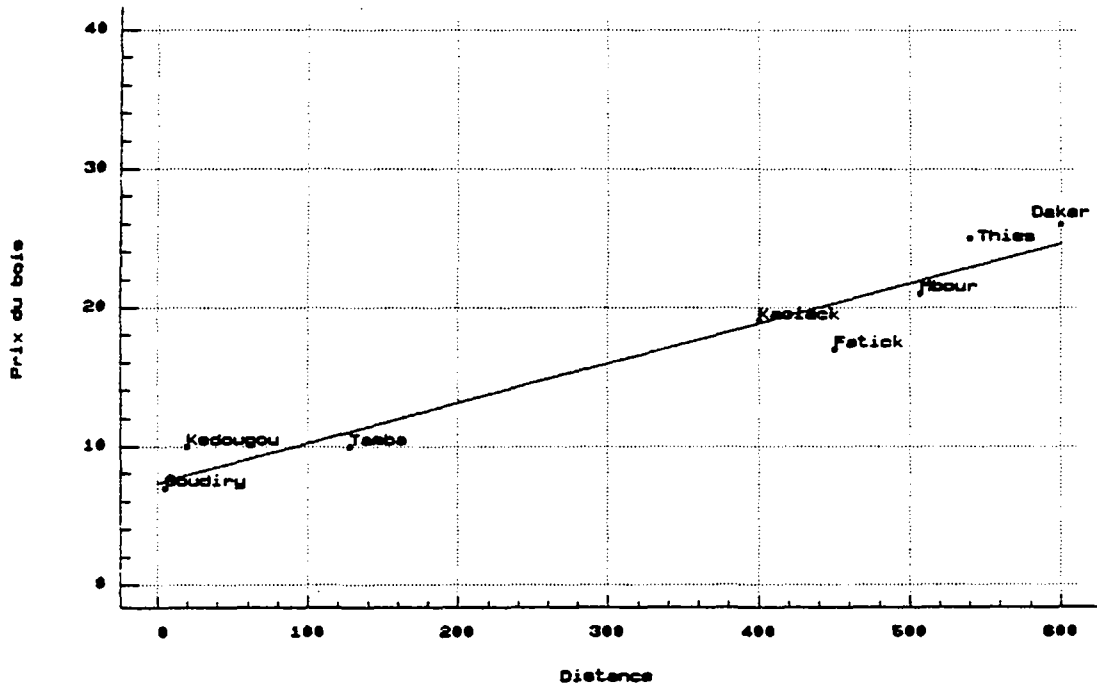


Fig. 4.5 Relation prix du bois - éloignement des ressources pour les villes de l'axe Sénégal Oriental - Dakar

Lors de la représentation des villes de l'axe Sénégal Oriental - Dakar sur un graphique distance - prix (fig. 4.5), il apparaît que les points sont remarquablement bien alignés. Les résultats de l'ajustement linéaire obtenus par la méthode des moindres carrés¹⁴, présentés au tableau 4.4, font effectivement état d'un coefficient de détermination ajusté $R^2 = 92,4 \%$ très élevé. Les valeurs du t (test de l'hypothèse que la valeur du paramètre est nulle) sont par ailleurs aussi très élevées (5,89 et 9,25), et le Durbin-Watson (test d'autocorrélation des observations) est satisfaisant (2,08).

Les prix du bois de l'axe Sénégal Oriental - Dakar peuvent donc être représentés par la loi:

¹⁴ En toute rigueur, les prix dépendent aussi des quantités consommées et les équations d'offre et les équations de consommation forment un modèle à équations multiples, dont l'estimation relève d'autres méthodes que les moindres carrés (cf. MALINVAUX, 1969, chap.20). Nous utiliserons néanmoins cette dernière méthode, considérant que:

- les erreurs de mesure ne justifient pas l'emploi de méthodes sophistiquées
- sur un axe d'approvisionnement, les prix ne devraient pas varier avec les quantités consommées.

Les conditions d'application de la méthode des moindres carrés (en particulier normalité et indépendance des ϵ), sont supposées satisfaites (la distribution des résidus permet d'ailleurs d'accepter l'hypothèse de normalité).

$$pb_j = 7,35 + 0,0288 \cdot d_{ij} + \varepsilon_j \quad (\text{en FCFA / Kg})$$

(5,89) (9,25)

d_{ij} étant l'éloignement des ressources pour la ville j . Entre parenthèses : valeurs du t de Student.

Model fitting results for: PBOIDK.PrixBois

Independent variable	coefficient	std. error	t-value	sig.level
CONSTANT	7.350297	1.247132	5.8938	0.0011
PBOIDK.Distance	0.028754	0.003108	9.2510	0.0001

R-SQ. (ADJ.) = 0.9236 SE= 1.990561 MAE= 1.435713 DurWat= 2.079

Analysis of Variance for the Full Regression

Source	Sum of Squares	DF	Mean Square	F-Ratio	P-value
Model	339.101	1	339.101	85.5811	.0001
Error	23.7740	6	3.96233		
Total (Corr.)	362.875	7			

R-squared = 0.934484 Std. error of est. = 1.99056
R-squared (Adj. for d.f.) = 0.923565 Durbin-Watson statistic = 2.07915

Tableau 4.4 Résultats de l'ajustement linéaire pour les prix du bois de l'axe
Sénégal Oriental - Dakar

Seules quatre observations de prix sont disponibles sur l'axe Fleuve - Saint-Louis, ce qui ne permet pas de faire une régression représentative. On remarquera cependant que la droite représentée sur la figure 4.6 (droite des moindres carrés), d'équation $pb_j = 7,73 + 0,0503 \cdot d_{ij}$, a une ordonnée à l'origine proche de celle de la droite de régression de l'axe Sénégal Oriental - Dakar, mais une pente environ deux fois plus forte. Cette observation laisse présumer qu'un modèle du type suivant devrait être bien adapté pour estimer les prix des deux axes :

$$pb_j = \alpha + \beta^{(1)} \cdot d_{ij}^{(1)} + \beta^{(2)} \cdot d_{ij}^{(2)} + \varepsilon_j$$

avec, si i est sur l'axe Sénégal Oriental - Dakar :

$$d_{ij}^{(1)} = d_{ij}$$

$$d_{ij}^{(2)} = 0$$

et si i est sur l'axe Fleuve - Saint Louis :

$$d_{ij}^{(1)} = 0$$

$$d_{ij}^{(2)} = d_{ij}$$

Les résultats de l'estimation du modèle sont donnés au tableau 4.5.

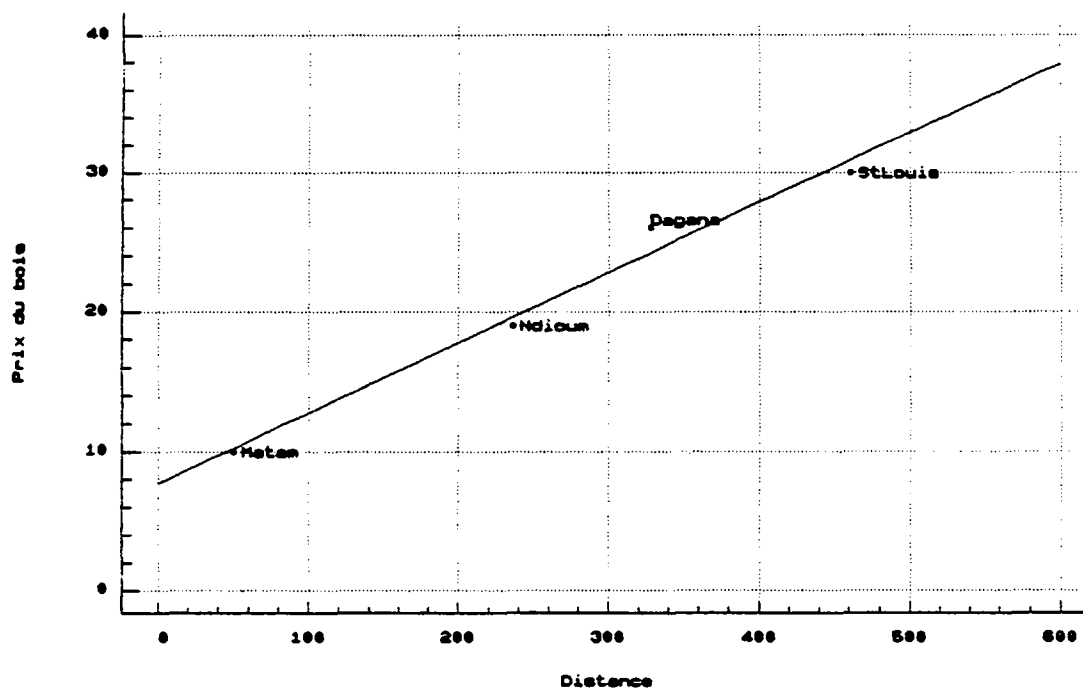


Fig. 4.6 Relation prix du bois - éloignement des ressources pour les villes de l'axe Fleuve - Saint-Louis

Model fitting results for: PBOI2.PrixBois

Independent variable	coefficient	std. error	t-value	sig.level
CONSTANT	7.452182	0.948396	7.8577	0.0000
Distance1	0.028544	0.002499	11.4204	0.0000
Distance2	0.051099	0.003946	12.9510	0.0000

R-SQ. (ADJ.) = 0.9464 SE= 1.772459 MAE= 1.241599 DurbWat= 2.172

Analysis of Variance for the Full Regression

Source	Sum of Squares	DF	Mean Square	F-Ratio	P-value
Model	616.392	2	308.196	98.1012	.0000
Error	28.2745	9	3.14161		
Total (Corr.)	644.667	11			

R-squared = 0.956141 Std. error of est. = 1.77246
R-squared (Adj. for d.f.) = 0.946394 Durbin-Watson statistic = 2.17228

Tableau 4.5 Résultats de l'ajustement linéaire pour les prix du bois des deux principaux axes (modèle à deux variables-distance)

Le coefficient de détermination (R^2 ajusté = 0,95) est encore meilleur que lors de la régression précédente (axe Sénégal Oriental - Dakar seul). Les trois valeurs du t sont excellentes et le Durbin-Watson est toujours satisfaisant.

Pour les localités de production de l'axe Sénégal Oriental - Dakar nous pourrions par conséquent utiliser la relation :

$$pb_j = 7,45 + 0,0285 \cdot d_{ij}$$

et pour les localités de production de l'axe Fleuve - Saint-Louis :

$$pb_j = 7,45 + 0,0511 \cdot d_{ij}$$

Il serait intéressant, pour mieux comprendre le système d'offre du bois de feu, de rechercher les raisons de l'apparente augmentation plus rapide du prix sur l'axe Fleuve - Saint-Louis, ce qui n'a pas pu être fait dans le cadre de cette thèse¹⁵.

Les relations prix - éloignement pour le charbon de bois

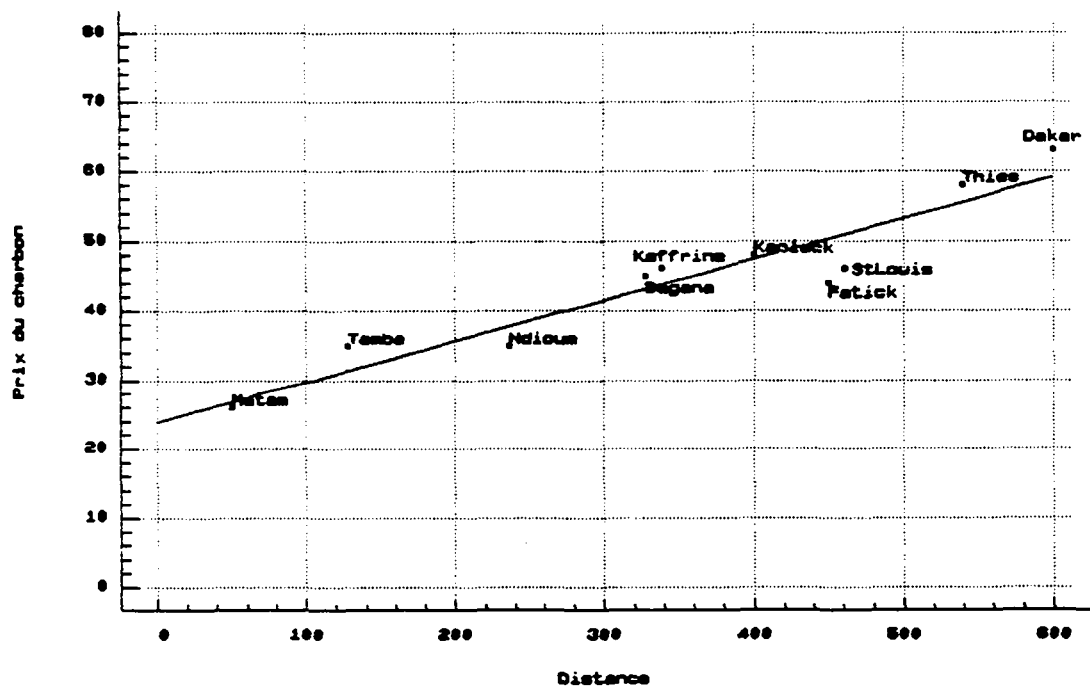


Fig. 4.7 Relation prix du charbon - éloignement des ressources pour les villes des deux principaux axes

Les villes des deux principaux axes sont représentés à la figure 4.7 sur un graphique prix du charbon - éloignement des ressources. Comme dans le cas du bois, il semble y avoir une relation

¹⁵ Il est bien possible que le coefficient de pente plus élevé soit le reflet d'un coût unitaire du transport plus élevé (carburant, pneus, pièces de rechange etc. plus chers). Les prix pourraient par ailleurs être influencés par le marché mauritanien. Il est aussi possible que ce soit le coefficient de pente de l'axe Sénégal Oriental - Dakar qui soit sous-estimé, les distances parcourues ayant été surestimées (le bois viendrait de moins loin).

- L'augmentation des prix avec l'éloignement indique que les producteurs situés dans les zones où les ressources disponibles sont épuisées peuvent réaliser des marges supplémentaires (hypothèse 2).

Confrontation des relations prix - éloignement avec une structure de prix du charbon

La structure du prix du charbon en provenance de Koumpentoum à Dakar en 1987 établie par RIBOT (1990), et qui a déjà été représentée au tableau 4.1, fait apparaître un total de 655 F que l'exploitant forestier doit dépenser pour pouvoir disposer d'un sac de charbon sur les lieux de production¹⁷. Pour actualiser ce chiffre, il faut ajouter l'augmentation de 175 F / sac des taxes sur le charbon et multiplier le tout par 0,99¹⁸ pour obtenir des francs 1990. On obtient 822 F / sac. Ce chiffre peut être comparé au prix de vente au détail d'un sac de 45 Kg obtenu à partir de la relation prix - éloignement du charbon pour un éloignement des ressources nul, soit

$$23,9 \times 45 = 1076 \text{ F/sac.}$$

Nous pouvons supposer que le prix départ - producteur (sur les lieux de production) est celui obtenu par RIBOT, soit 822 F / sac, et qu'un supplément de $1076 - 822 = 254$ F/sac est nécessaire pour la commercialisation du charbon dans une ville située à proximité immédiate des lieux de production. Ainsi, la structure du prix de RIBOT et la relation prix - éloignement sont non seulement compatibles, mais complémentaires.

La différence entre le coefficient de pente de 0,0587 F/kg.km et le prix du transport de RIBOT, 0,0368 F/kg.km (voir note 4 de ce chap.), indique par ailleurs que l'augmentation des coûts effectifs du transport (les coûts de RIBOT) ne suffit pas à expliquer l'augmentation des prix avec l'éloignement¹⁹.

Estimation des coûts du transport c_{ij}

D'après le début de ce paragraphe, les valeurs numériques obtenues par les relations linéaires prix - éloignement permettent d'estimer certains coûts du transport c_{ij} . Rappelons qu'il suffit que les deux conditions (i) et (ii) soient vérifiées pour que $c_{ij} = p_j$. Ou, en utilisant les résultats des ajustements linéaires $p_j = \alpha + \beta \cdot d_{ij}$:

$$c_{ij} = \alpha + \beta \cdot d_{ij}.$$

¹⁷ Les chiffres suivants du tableau 4.1 ont été additionnés:
 $470 + 67 + 445 + 75 + 5 + 9 + 5 + 2 + 2 + 20 = 655$.

¹⁸ Rapport des indices de prix à la consommation de type traditionnel africain (Direction de la Statistique, Min. de l'Econ. et des Fin.).

¹⁹ Une partie de l'écart pourrait être dû à des revenus supplémentaires des exploitants forestiers, voir paragraphe 4.3.3.

Il serait commode de pouvoir utiliser cette même relation pour les couples de localités ne vérifiant pas (ii). Bien que $c^*_{ij} = \alpha + \beta \cdot d_{ij}$ sous-estime dans ce cas c_{ij} , on peut montrer que l'utilisation de c^*_{ij} à la place de c_{ij} dans les conditions d'équilibre des prix ne modifie pas l'équilibre spatial des prix! La démonstration en est donnée à l'annexe 4.1.

Les flux de combustible q_{ij} et les prix p_j peuvent donc être obtenus à partir des conditions d'équilibre spatial des prix du paragraphe 4.1.2 dans lesquelles on utilisera $c^*_{ij} = \alpha + \beta \cdot d_{ij}$ à la place de c_{ij} .

Remarquons que ces conditions d'équilibre modifiées conduisent à des "marges supplémentaires" m^*_i différentes des marges m_i . Il est cependant possible de déterminer les marges m_i à partir d'estimations des coûts effectifs du transport c'_{ij} . Comme démontré à l'annexe 4.2, s'il est une localité de production telle que $m_{i1} = 0$, et si $i2$ et j sont des localités telles que $q_{i1j} > 0$ et $q_{i2j} > 0$, alors

$$m_{i2} = m^*_{i2} - \beta (d_{i1j} - d_{i2j}) + (c'_{i1j} - c'_{i2j})$$

Ainsi, nous disposons désormais d'un modèle de la formation des prix des combustibles ligneux qui permet d'estimer les prix de vente au détail et leurs principales composantes, et d'une méthode qui permet de chiffrer les paramètres du modèle à partir des distances moyennes entre localités de production et localités de consommation. Le modèle peut cependant encore être amélioré par la distinction de classes de taille d'agglomération.

L'influence des tailles d'agglomération

L'utilisation du modèle de formation des prix à des fins de simulation se fera sur la base d'un découpage de l'espace en zones. Tandis qu'à l'intérieur d'une zone, si la zone n'est pas trop grande, les prix ne devraient pas varier considérablement entre localités de même taille (on peut supposer que ces localités ont des éloignements des ressources proches), il devrait y avoir d'importantes variations de prix entre petites et grandes localités (ces dernières étant en général bien plus éloignées des ressources que les petites). Pour cette raison, la distinction de classes de taille d'agglomération est importante lors de la modélisation de la formation des prix. Le nombre de "localités de consommation" qui doit figurer dans les conditions d'équilibre des prix devient ainsi égal au produit du nombre de zones par le nombre de classes de taille d'agglomération. Le tableau 4.7 illustre les possibilités de transport entre localités de production et de consommation qui en résultent.

		Localités de consommation					
		z = 1			z = 2		
		g = 1	g = 2	g = 3	g = 1	g = 2	g = 3
Localités de production	z = 1						
	z = 2						
	z = 3						

z: zone
g: classe de taille d'agglomération

Tableau 4.7 Grille origines / destinations suite à la distinction de zones et de classes de taille d'agglomération

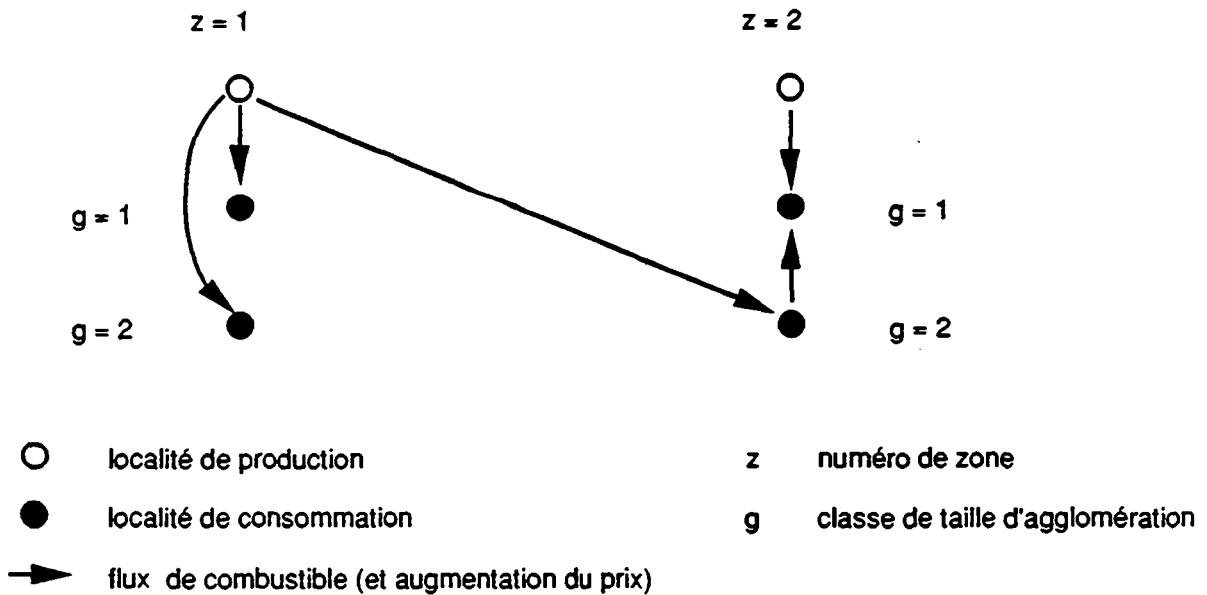


Fig. 4.8 Possibilités de transport entre localités de différentes zones et classes de taille

Il convient maintenant de définir les distances d_{ij} à utiliser dans le modèle de la formation des prix. Sur la figure 4.8 sont représentés schématiquement quelques flux possibles entre deux zones et entre différents types de localités d'une même zone. Nous admettrons que le transport de combustibles ligneux entre localités de production et localités de consommation de différentes classes de taille obéit aux règles suivantes :

- 1) Entre une localité de production et une localité de consommation de la même zone, le transport est direct, quelle que soit la classe de taille de la localité de consommation.
- 2) Le transport est également direct entre une localité de production d'une zone et une localité de consommation de la classe des plus grandes tailles d'une autre zone.
- 3) En revanche, pour les localités de consommation de taille moyenne ou petite, le combustible en provenance d'une autre zone transite toujours par les localités de la classe de taille supérieure.

Ces règles permettent d'estimer les distances moyennes d_{ij} entre localités de production et localités de consommation, nécessaires à la détermination des coûts associés c^*_{ij} pour chaque combustible ligneux. Une estimation de ces distances est faite à l'annexe 4.2.

Cette démarche peut sembler exagérément simplificatrice, mais les prix relevés au Sénégal n'ont pas permis d'estimer directement les écarts de prix sur les arcs précités avec une précision satisfaisante. Les quelques prix disponibles pour des couples de localités proches mais de tailles différentes (par exemple Goudiry et Tambacounda ou Marsassoum et Ziguinchor, voir tableau 4.3), permettent cependant de vérifier que les prix varient bien dans le sens attendu, et que l'utilisation des coefficients β des relations prix - éloignement donne des estimations satisfaisantes des prix.

Les exceptions aux lois prix - éloignement

Parmi les prix des combustibles ligneux relevés au Sénégal (tableau 4.3) on peut relever trois groupes de valeurs fort éloignées des lois prix - éloignement établies ci-dessus:

- 1) *Les observations aberrantes*: C'est le cas des prix du charbon à Kolda et Mbour (57 F/kg et 71 F/kg respectivement), beaucoup plus élevés que ceux de villes de taille et d'éloignement des ressources comparables²⁰.
- 2) *Les prix d'un certain charbon de luxe*: Les prix du charbon de Bakel, Goudiry et Gossas donnent aussi l'apparence d'observations aberrantes. Cependant, les enquêtes auprès des consommateurs font ressortir que moins de 10 % des consommateurs de ces villes utilisent le charbon comme combustible principal. Etant donné que, par ailleurs, ces villes sont de petite taille, les quantités totales de charbon qui y sont consommées doivent être faibles. On peut alors imaginer que, tant que la consommation d'une ville reste au dessous d'un certain seuil, les prix du charbon peuvent y être très élevés, ce qui rendrait très difficile la

²⁰ Comparer aux prix de Ziguinchor et Tambacounda (pour Kolda) et à ceux de Dakar (plus éloignée) et Thiès (plus proche des ressources, pour Mbour), (cf. Tab. 4.3).

modélisation de l'évolution des prix et des consommations. L'existence de nombreux contre-exemples (prix du charbon à Sagata, Nioro et Kedougou) permet cependant de douter du bien-fondé d'une telle hypothèse. Il est plus probable que les prix incriminés aient été mal mesurés: des achats pour pesées ont probablement été faits auprès de détaillants qui ne vendent que peu de charbon et qui le vendent à un prix élevé (profitant de leur situation géographique ou offrant une qualité supérieure), alors que les "grands" consommateurs de charbon peuvent se ravitailler auprès d'autres détaillants où les prix sont plus bas.

- 3) *Les prix de marchés locaux de bois*: Les prix du bois de Kaffrine, Nioro et Touba sont relativement bas, en dépit de la proximité de grandes villes où les prix sont élevés. On pourrait expliquer ces observations par l'existence de marchés locaux, qui subsistent parce que les Eaux et Forêts interdisent l'exportation de bois depuis ceux-ci vers les grandes villes. Si cette hypothèse s'avérait exacte, il serait indiqué de simuler l'existence de tels marchés locaux dans les zones 5 (Kaffrine) et 6 (Nioro) notamment. Les simulations du chapitre 6 ne feront cependant pas intervenir ces marchés locaux, étant donné d'une part l'incertitude sur les prix réels, d'autre part les comportements des consommateurs (forte part du charbon dans les consommations) qui correspondent plutôt aux prix du marché principal.

Ces exceptions aux lois prix - éloignement générales ne doivent pas masquer la pertinence du modèle de la formation des prix des combustibles ligneux qui s'appuie sur les dites lois. Nous verrons à la section 4.3 que ce modèle permet déjà à lui tout seul d'expliquer dans les grandes lignes les principaux phénomènes qui affectent le système énergétique des combustibles domestiques, et qu'il est bien adapté à l'évaluation de stratégies énergétiques.

4.2 L'OFFRE DES COMBUSTIBLES DE SUBSTITUTION

Le gaz butane est la principale alternative aux combustibles ligneux qui s'offre actuellement aux ménages sénégalais. C'est pourquoi nous examinerons en détail le système d'offre de ce combustible pour déboucher sur une modélisation de la formation des prix dans l'espace, comparable à celle de la formation des prix des combustibles ligneux. Nous dirons aussi quelques mots des autres sources d'énergie qui peuvent ou pourraient un jour être utilisées à la place des combustibles ligneux.

4.2.1 La politique de butanisation

Face à la gravité du problème du bois de feu, le Gouvernement sénégalais a opté, dans les années 70, pour une politique de promotion à grande échelle du gaz de pétrole liquéfié ou "butane" (d'après sa composante principale). Cette politique a été appelée celle de la "butanisation".

Le but était de faire baisser, par une substitution de butane aux combustibles ligneux, la pression qui s'exerce sur les ressources forestières du pays. Grâce à la diffusion d'équipements nouveaux, à des interventions sur les prix et à des campagnes publicitaires, le gaz butane est devenu, en moins de deux décennies, un combustible très populaire en milieu urbain, en passe d'y devenir le combustible principal. L'étude de l'offre de ce combustible est d'un grand intérêt puisque, à moyen terme, il restera probablement le seul concurrent des combustibles ligneux capable de se tailler une part notable du marché.

La filière du butane

Les équipements

Jusqu'en 1974, le gaz butane n'était pratiquement vendu qu'en bouteilles de 12,5 kg. Ces bouteilles sont utilisées pour alimenter des cuisinières de différentes sortes, dont la gamme peut s'étaler du simple brûleur à une flamme jusqu'à la cuisinière multi-feux avec four incorporé. On retrouve cependant une constante dans tous ces équipements : la présence d'un détendeur entre la bouteille et la cuisinière. Etant donné les prix élevés de l'équipement et de la recharge de gaz, le gaz conditionné en bouteilles de 12.5 kg est resté un combustible des classes aisées. On l'appelle aussi le "gaz traditionnel", par opposition au gaz conditionné en plus petites bouteilles et vendu moins cher que l'on appelle le "gaz populaire".

L'essor du gaz populaire a commencé en 1974, avec la commercialisation de bouteilles de 2.75 kg (type 907 de camping-gaz), et d'un fourneau adapté, le "Blip-Banekh", mis au point sous le patronage de la compagnie IRANSEN-SHELL. Un autre équipement a été lancé en 1983 avec l'appui de la compagnie TOTAL. Il s'agit de l'ensemble "Nopalé" qui comprend une bouteille de 6 kg et un fourneau spécial. Dans les deux cas, le fourneau est fixé directement sur la bouteille et la flamme est unique.

Les équipements sont mieux adaptés aux besoins des ménages sénégalais des classes moins aisées que les équipements utilisant le gaz traditionnel.

- l'investissement initial, qui comprend le prix du fourneau et le prix ou la consigne de la première bouteille, est moins élevé;
- le montant à payer pour chaque recharge peut plus facilement être épargné;
- l'équipement est plus simple, donc plus facile à utiliser et plus sûr.

L'organisation de la distribution

La Société Africaine de Raffinage (SAR) approvisionne le marché sénégalais en gaz butane. Elle exporte également vers certains pays voisins. A cet effet, la production propre de la SAR, obtenue par raffinage de pétrole brut importé, est complétée par des importations. Les ventes sur le marché intérieur ont dépassé la production propre de la SAR dès 1979 et les importations sont passées, depuis, au même ordre de grandeur que la production propre (d'après la Direction de l'Energie, des Mines et de la Géologie, MIA).

La distribution est contrôlée pour l'essentiel par deux sociétés : SENGAZ, pour les bouteilles de 12.5 kg et 6 kg et IRANSEN-SHELL pour les bouteilles de 6 kg. Ces sociétés achètent le gaz à la SAR et se chargent du remplissage des bouteilles (par l'intermédiaire de la société GALIAF pour SENGAZ). L'Etat détient une partie du capital de chacune de ces sociétés, ainsi que de la SAR.

La vente au détail est assurée par toutes sortes de détaillants : stations-service (surtout pour les bouteilles de 12.5 kg), magasins et boutiques de toutes les tailles. Ces détaillants sont approvisionnés soit directement par les sociétés distributrices, soit par grossistes interposés.

La distribution dans l'intérieur du pays

Les principaux centres de remplissage des bouteilles de gaz sont situés dans la région de Dakar. Deux centres de remplissage ont cependant récemment été mis en service dans l'intérieur du pays : l'un à Kaolack en 1989, l'autre à Saint-Louis en 1991. L'approvisionnement des localités non pourvues de centres de remplissage n'est pas pris en charge par les sociétés distributrices. Ce sont des commerçants divers ou même de simples privés qui transportent à leur compte le

gaz depuis les villes pourvues de centres de remplissage vers les autres localités, où ils revendent ce gaz ou l'utilisent pour leurs propres besoins.

La promotion du butane

La mise sur le marché des équipements à gaz populaire a représenté l'un des éléments de la politique du butanisation. Parallèlement, d'importantes campagnes publicitaires ont été menées, notamment à l'aide de la presse, de la radio et de la télévision, et les prix du gaz populaire ont été maintenus à des niveaux relativement bas.

La "subvention" du gaz populaire

La nature des interventions de l'Etat sur les prix du gaz a changé plusieurs fois depuis le lancement du gaz populaire en 1974 (d'après CISSE, 1988) :

- Au début, l'équipement (fourneaux et bouteilles) était exonéré de tout droit d'entrée mais le gaz n'était pas subventionné.
- A partir de 1976, le Gouvernement a mis en place une politique de subvention du gaz populaire, mais l'équipement n'a plus été exonéré.
- Après l'inversion de la tendance des cours des produits pétroliers, le Gouvernement a décidé de ne pas répercuter la chute des cours sur les prix payés par les consommateurs. De ce fait, le gaz populaire n'était alors plus subventionné.
- La structure des prix de juillet 1987 s'est basée sur les coûts réels d'importation et a comporté une importante subvention du gaz populaire. Depuis, les prix nominaux²¹ sont restés constants et le "subventionnement" du gaz, désormais négatif (cf. Tab. 4.7 ci-après), serait redevenu une source de revenus pour le Trésor Public²².

Une constante caractérise la politique des prix : le prix du gaz traditionnel a toujours été maintenu à un niveau supérieur à celui du gaz populaire (le rapport des prix est de 120 F/kg à 216 F/kg depuis juillet 1987, soit 1 à 1,8). Ce choix s'explique par le fait déjà mentionné que l'équipement fonctionnant au gaz traditionnel est adapté aux exigences de ménages à revenus supérieurs.

²¹ La dépréciation de la monnaie n'est pas prise en compte.

²² Communication personnelle de M. Saloum CISSE, Directeur de l'Energie, MIA.

Le succès de la butanisation

A en juger par la progression des quantités vendues, la butanisation a été un succès : entre 1974 et 1991, le total du gaz (traditionnel et populaire) est passé de 2753 tonnes à 36487 tonnes. Le taux d'accroissement annuel moyen entre 1987 et 1991 a été de plus de 20 % (chiffres communiqués à la Direction de l'Energie, des Mines et de la Géologie, MIA, par les sociétés distributrices). La plus grande partie du gaz vendu l'a été à Dakar (environ 70 % d'après les enquêtes MASENS et 85 % d'après les chiffres des distributeurs). Pour ce qui est du reste, les enquêtes auprès des consommateurs ont montré que la grande majorité en est consommée dans les grandes villes. On peut donc conclure que, grâce à la politique de butanisation, le gaz butane est passé d'un statut de combustible d'élite à un statut de combustible populaire du milieu urbain.

Les limites de la butanisation

Différentes raisons peuvent être invoquées pour nuancer le jugement sur la butanisation:

- Les enquêtes auprès des consommateurs ont montré que les ménages qui utilisent le gaz comme combustible d'appoint consomment autant de charbon que ceux qui utilisent exclusivement du charbon. MADON et MATLY (1987) en ont conclu que le passage à l'utilisation du gaz comme combustible d'appoint augmentait le confort des utilisateurs sans qu'il y ait substitution. Nous reviendrons cependant sur cette question au chapitre suivant pour montrer que, à la lumière de l'évolution dans le temps des quantités totales d'énergie consommées, cette conclusion doit être mise en doute.
- Malgré la progression rapide des ventes de gaz, la consommation nationale de combustibles ligneux n'a pas sensiblement diminué, principalement en raison de la forte croissance démographique que connaît le pays.
- Les importations de gaz ou de pétrole à raffiner pèsent dans la balance commerciale du pays. Elles nécessitent en contrepartie des exportations pourvoyeuses de devises. De plus, l'importation d'une grande partie de l'énergie domestique crée une dépendance vis-à-vis des fournisseurs étrangers, et les risques liés à cette dépendance sont difficiles à évaluer.

Néanmoins, on peut dire que la politique de butanisation a déjà fortement diminué la pression sur les ressources forestières, en comparaison avec ce que serait devenu cette pression sans l'intervention de l'Etat. Nous reviendrons au chapitre 6 sur l'orientation future qu'il convient de donner à la politique de butanisation. Dans l'immédiat, nous tenterons de comprendre comment se forment les prix du gaz, à travers son système de distribution et sous l'influence de la politique gouvernementale qui vient d'être décrite.

4.2.2 La formation des prix du gaz

Après l'analyse des structures de prix du gaz populaire et du gaz traditionnel à Dakar, il sera montré qu'un modèle similaire à celui utilisé pour modéliser la formation des prix des combustibles ligneux peut être utilisé pour expliquer la variation des prix du gaz dans l'espace. Les paramètres du modèle seront estimés à partir des prix relevés lors des enquêtes auprès des consommateurs.

Les prix officiels du gaz à Dakar

Comme pour le charbon, il existe des prix officiels de vente du gaz butane, qui varient en fonction du type de bouteille. Les marges des intermédiaires et détaillants semblent avoir été bien choisies, et les prix officiels sont respectés. Du moins pour ce qui est de la ville de Dakar.

Composante du coût	Bouteille		
	2,7 kg	6 kg	12,5 kg
Prix ex-SAR, hors-taxes	77,208	77,208	77,208
Fret et marges	89,265	91,894	106,618
Taxes:			
Taxe à la valeur ajoutée	15,859	16,129	18,921
Fonds de stabilisation (subv.)	-61,902	-64,398	13,152
Prix de vente au détail	120,430	120,833	215,899

Tableau 4.7 Structures des prix du gaz à Dakar, juillet 1987

D'après BANQUE MONDIALE / PNUD (1990)

On remarquera, en consultant le tableau 4.7, que les structures des prix des deux types de bouteilles de gaz populaire (2,75 et 6 kg) sont quasiment identiques. La taxation nette, qui représente la somme des différents droits de douane, impôts et taxes perçus par l'Etat, est l'action (directe) résultante de ce dernier sur les prix. Alors que le gaz populaire bénéficiait en 1987 de fortes subventions, le gaz traditionnel était taxé.

Les structures des prix se modifient dans le temps, déjà en raison des fluctuations de prix des produits pétroliers importés. Lorsque les prix de vente au détail sont maintenus fixes sur de

longues périodes, comme c'est le cas depuis 1987, et que la partie "fret et marges" ne varie pas, la taxation nette doit équilibrer les fluctuations du prix ex-SAR²³.

Pour modéliser la formation des prix, on peut représenter le prix ex-SAR par une variable exogène et le prix de vente au détail par une variable de décision. La partie "fret et marges" n'a, à priori, pas de raisons de varier dans des proportions importantes, et peut être considérée constante. La taxation nette devient alors une variable endogène. Sa valeur est des plus importantes pour l'appréciation d'un scénario sur le plan économique.

Le coût du transport du gaz

Les structures de prix comme celles décrites ci-dessus s'appliquent lorsque la société distributrice du gaz est en mesure de satisfaire la demande locale. En 1991, c'était le cas de la seule ville de Dakar. Lorsqu'en revanche des commerçants divers doivent faire venir le gaz depuis une autre localité, le prix au détail augmente par rapport au prix en vigueur dans cette localité. Puisque la prestation fournie qui justifie l'augmentation du prix est le transport, nous appellerons cette augmentation le "coût du transport".

Dans les localités pourvues de centres de remplissage, mais où, pour un type de bouteille donné, les ventes locales de la société distributrice sont insuffisantes, les deux structures de prix coexistent. Dans ce cas il est préférable de choisir comme prix du marché, donc comme prix qui explique le comportement des consommateurs, le prix le plus élevé, c'est-à-dire celui qui comprend le coût du transport²⁴. En effet, celui qui a la chance d'avoir pu acquérir une recharge de gaz au prix officiel, sans compter qu'il aura peut-être dû "payer" d'une façon ou d'une autre pour avoir ce privilège, pourrait - c'est imaginable - revendre sa recharge au prix élevé (ou juste un peu au-dessous) et gagner la différence. S'il consomme lui-même sa recharge, c'est donc qu'il est prêt d'une certaine façon, à dépenser la différence en question pour obtenir son gaz²⁵.

Modélisation de la formation des prix du gaz dans l'espace

La formation des prix du gaz dans l'espace présente de fortes similitudes avec celle des prix des combustibles ligneux. Dans les deux cas il existe dans certaines localités des ressources en quantités limitées (ici, les limites sont les capacités de distribution des sociétés distributrices), et

²³ Fin 1988, le prix de revient ex-SAR était passé à 50,722 F/kg (République du Sénégal, 1990). La subvention nette du gaz populaire descendrait donc à moins de 20 F/kg.

²⁴ Si le prix officiel était plus élevé que celui des commerçants divers ayant effectué le transport, la société distributrice ne vendrait pas.

²⁵ En allant au fond des choses, on peut remarquer que le fait de renoncer à gagner la différence entre le prix faible et le prix élevé n'est pas tout à fait équivalent au fait de déboursier cette même somme.

de nombreux agents économiques indépendants qui se chargent du transport. On peut établir l'analogie suivante entre les deux cas :

Exploitants forestiers	Commerçants divers effectuant le transport du gaz
Ressource disponible	Capacité de distribution de la société distributrice.
Prix minimal et marges des revendeurs	Prix officiel de vente au détail
Marge supplémentaire officiel	Différence entre le prix du marché et le prix officiel
Prix du transport	Coût du transport

En appliquant cette analogie, on vérifie aisément que l'équivalent des hypothèses 1 à 4 (paragraphe 4.1.2) se justifie pleinement dans le cas de l'offre d'un type donné de bouteilles de gaz :

Hypothèse 1g : Dans les localités où la société distributrice assure la distribution, les prix officiels sont respectés tant que la société distributrice est en mesure de satisfaire la demande.

Hypothèse 2g : Dans ces mêmes localités, lorsque la quantité distribuée atteint le maximum que la société distributrice est prête à fournir, le prix peut monter d'une certaine marge supplémentaire non-nulle.

Hypothèse 3g : Le coût du transport est indépendant de la quantité transportée.

Hypothèse 4g : Les marges des grossistes et détaillants d'une localité donnée ne dépendent ni des autres composantes du prix, ni des quantités vendues. (Elles peuvent être supposées égales aux marges officielles).

Les conditions d'équilibre spatial des prix qui découlent de ces hypothèses peuvent être obtenues par analogie, en simplifiant les conditions obtenues dans le cas des combustibles ligneux pour qu'il n'y ait plus qu'un seul combustible. En utilisant les mêmes notations avec un petit g distinctif, on peut écrire:

$$f = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{2n} c_{ij}^g \cdot q_{ij}^g \quad \text{est minimum}$$

$$\text{sous contraintes : } \sum_{j=1}^{2n} q_{ij}^g - R_i^g \leq 0 \quad (i = 1, \dots, m)$$

$$y_j^g - \sum_{i=1}^m q_{ij}^g \leq 0 \quad (j = 1, \dots, 2n)$$

Ces conditions définissent les flux q_{ij}^g à partir desquels les prix p_j^g peuvent facilement être déterminés à l'aide de l'équivalent pour le gaz des conditions (6) et (7) du paragraphe 4.1.2.

Les relations prix - éloignement du gaz

Comme dans le cas des combustibles ligneux, les paramètres c_{ij}^g peuvent être estimés à partir des prix. Les prix payés pour les différentes bouteilles de gaz ont été demandés aux consommateurs lors des enquêtes MASENS. Toujours comme dans le cas des combustibles ligneux, les prix moyens par localité permettent de mettre en évidence des relations prix - éloignement. L'éloignement des ressources ligneuses est remplacé par la distance depuis Dakar, seule localité où les limites de capacité des sociétés distributrices ne sont pas atteintes. Pour plus de clarté, le prix de vente au détail est par ailleurs remplacé dans les graphiques ci-dessous par la différence avec le prix à Dakar, donc le coût du transport.

La relation prix éloignement pour le gaz traditionnel

Les coûts du transport du gaz traditionnel sont représentés à la figure 4.7 en fonction de la distance à Dakar.

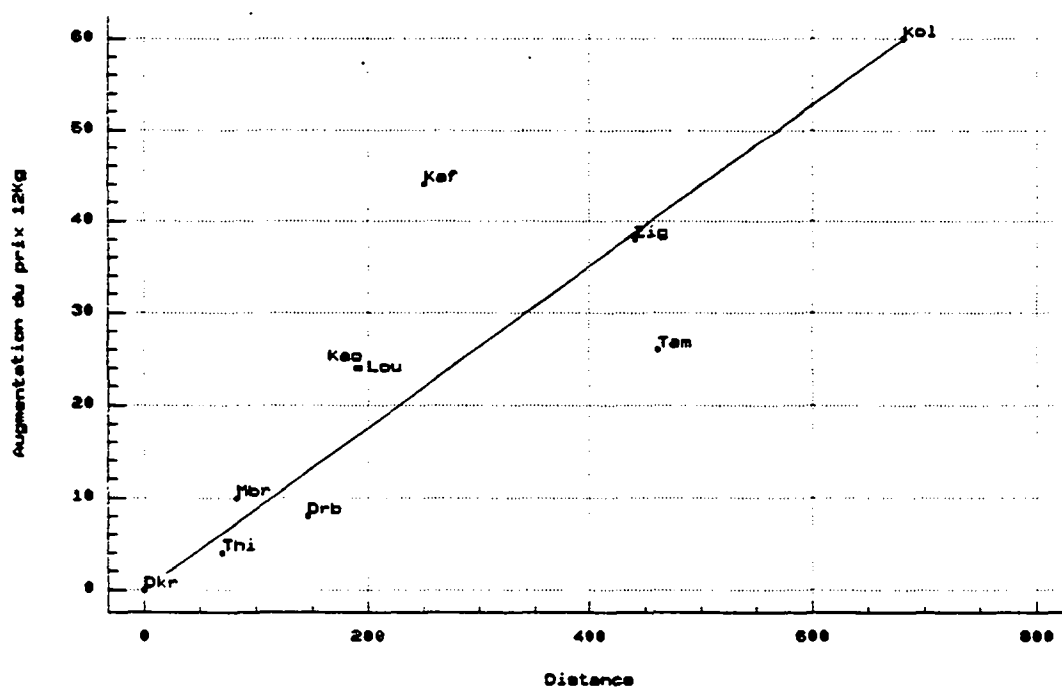


Fig. 4.7 Relation coût du transport - distance pour le gaz traditionnel (12,5 kg)

Un modèle linéaire donne une représentation satisfaisante de cette relation, comme le montrent les résultats de l'ajustement linéaire (sans constante) du tableau 4.8.

Model fitting results for: PGAZSEN1.VarPr12Kg

Independent variable	coefficient	std. error	t-value	sig. level
PGAZSEN1.Distance	0.088503	0.009429	9.3867	0.0000
R-SQ. (ADJ.) = 0.9073 SE= 9.620514 MAE= 6.184864 DurWat= 2.439				
Previously: 0.0000 0.000000 0.000000 0.000000 0.000				
10 observations fitted, forecast(s) computed for 18 missing val. of dep. var.				

Analysis of Variance for the Full Regression

Source	Sum of Squares	DF	Mean Square	F-Ratio	P-value
Model	8155.01	1	8155.01	88.1106	.0000
Error	832.989	9	92.5543		
Total	8988.00	10			

R-squared = 0.907322

R-squared (Adj. for d.f.) = 0.907322

Std. error of est. = 9.62051

Durbin-Watson statistic = 2.4392

Note : R^2 ajusté est égal à R^2 parce qu'il y a 0 paramètres de plus que dans un modèle à une constante

Tableau 4.8 Résultats de l'ajustement linéaire pour le gaz traditionnel

Nous pouvons donc admettre que, si d^{trad}_{ij} est l'éloignement des centres de distribution "officielle" pour une localité j , alors le prix de vente au détail en j est donné par:

$$p^{\text{trad}}_j = m1^{\text{trad}}_i + 0,0885 \cdot d^{\text{trad}}_{ij} + \varepsilon \quad (\text{en F / kg})$$

(9,39)

où $m1^{\text{trad}}_i$ est le prix de vente officiel.

Le fait que le prix observé à Kaffrine (Kaf) est très élevé alors que celui de Tambacounda (Tam) est très bas (par rapport au modèle) n'est guère facile à expliquer: on pourrait imaginer que le prix de Tambacounda est bas parce que le transport peut se faire par rail. Mais Kaffrine est sur la même ligne ferroviaire que Tambacounda, beaucoup plus près de Dakar, et le prix y est plus élevé...

La relation prix - éloignement pour le gaz populaire

Les figures 4.8 et 4.9 représentent les coûts du transport du gaz populaire en fonction de la distance à Dakar pour les conditionnements en bouteilles de 2,75 et 6 kg respectivement. Des modèles linéaires (toujours sans constante) donnent de très bonnes représentations de ces

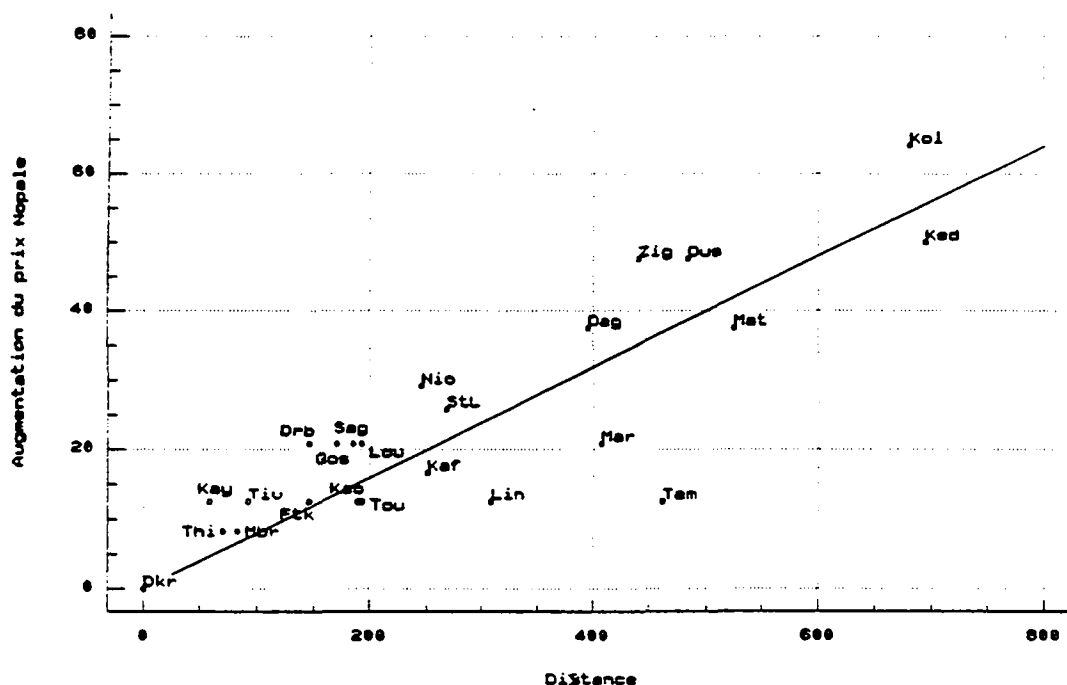


Fig. 4.9 Relation coût du transport - distance pour le gaz en bouteilles de 6 kg

Model fitting results for: PGAZSEN.VarPrNop

Independent variable	coefficient	std. error	t-value	sig.level
PGAZSEN.Distance	0.080059	0.005259	15.2221	0.0000
R-SQ. (ADJ.) = 0.9097 SE= 8.668738 MAE= 6.835394 DurWat= 1.442				
Previously: 0.0000 0.000000 0.000000 0.000000 0.0000				
24 observations fitted, forecast(s) computed for 4 missing val. of dep. var.				

Analysis of Variance for the Full Regression

Source	Sum of Squares	DF	Mean Square	F-Ratio	P-value
Model	17412.6	1	17412.6	231.714	.0000
Error	1728.38	23	75.1470		
Total	19141.0	24			

R-squared = 0.909703
R-squared (Adj. for d.f.) = 0.909703

Std. error of est. = 8.66874
Durbin-Watson statistic = 1.44204

Tableau 4.10 Résultats de l'ajustement linéaire pour le gaz en bouteilles de 6 kg

En comparant les tableaux 4.9 et 4.10, on constate que la différence des deux coefficients (celui relatif au gaz en bouteilles de 6 kg et celui relatif au gaz en bouteilles de 2,75 kg) est peu

significative, eu égard aux erreurs standard²⁷. On peut donc admettre que les coefficients des deux types de gaz populaire sont égaux. Le tableau 4.11 donne les résultats d'un ajustement linéaire pour tous les prix de gaz populaire, bouteilles de 2,75 et 6 kg confondues.

Model fitting results for: PGAZSEN2.VarPrPop					
Independent variable	coefficient	std. error	t-value	sig.level	
FGAZSEN2.Distance	0.088922	0.003573	24.8845	0.0000	
R-SQ. (ADJ.) = 0.9281	SE= 8.778580	MAE= 6.013643	DurbWat= 2.021		
Previously: 0.0000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000	
49 observations fitted, forecast(s) computed for 7 missing val. of dep. var.					
Analysis of Variance for the Full Regression					
Source	Sum of Squares	DF	Mean Square	F-Ratio	P-value
Model	47720.5	1	47720.5	619.237	.0000
Error	3699.05	48	77.0635		
Total	51419.6	49			
R-squared = 0.928062			Std. error of est. = 8.77858		
R-squared (Adj. for d.f.) = 0.928062			Durbin-Watson statistic = 2.02127		

Tableau 4.11 Résultats de l'ajustement linéaire pour le gaz populaire

La qualité de l'ajustement est à nouveau très bonne. Nous utiliserons le coefficient obtenu pour modéliser la relation prix - éloignement dans le cas du gaz populaire:

$$p^{gPOP}_j = m1^{gPOP}_i + 0,0885 \cdot d^{gPOP}_{ij} \quad (\text{en F / kg})$$

(24,88)

Mise au point d'un modèle opérationnel

Les relations prix-éloignement ouvrent la voie, comme dans le cas des combustibles ligneux, à la détermination de coûts c^{trad}_{ij} et c^{gPOP}_{ij} sur la base des distances moyennes entre les localités de consommation des différentes zones et classes de taille d'agglomération. Les valeurs numériques des distances sont légèrement différentes de celles pour les combustibles ligneux, étant donné que les grandes villes sont cette fois les plus proches des ressources.

La simulation de la formation des prix et des flux du gaz traditionnel et du gaz populaire, à consommations et capacités de distribution données peut donc finalement se résumer à la détermination de l'optimum d'un problème de recherche opérationnelle relativement simple -

²⁷ La valeur du t de Student calculée à partir des valeurs des tableaux 4.9 et 4.10 est de 1,597, ce qui signifie qu'au seuil 5 % (valeur de la loi du t à grand nombre de degrés de liberté: 1,645) la différence des moyennes n'est pas significativement différente de zéro.

comme dans le cas des combustibles ligneux. Les marges supplémentaires m^{*trad}_i et m^{*gPOP}_i sont cette fois égales aux "vraies" marges m^{trad}_i et m^{gPOP}_i , puisque les coûts c^{*trad}_{ij} et c^{*gPOP}_{ij} sont les coûts effectifs du transport (c').

4.2.3 L'offre des autres sources d'énergie

Le bois de feu, le charbon de bois et le gaz butane sont les seuls combustibles commercialisés couramment utilisés dans la cuisine au Sénégal. De nombreuses autres sources d'énergie sont cependant susceptibles d'être utilisées à l'avenir. Malgré qu'il soit difficile, sinon impossible, d'analyser et de modéliser leur système d'offre potentiel sur la base d'observations actuelles, il serait utile de pouvoir simuler l'offre d'un agent énergétique nouveau; en particulier lorsque les réactions des consommateurs à l'offre du nouveau concurrent peuvent être simulées parallèlement.

Les sources d'énergie envisageables

Le kérosène, concurrent défavorisé du butane

Le kérosène, ou pétrole lampant, présente de nombreux points communs avec le gaz butane, à la fois pour ce qui est de la structure du système d'offre et des possibilités d'utilisation. Comme pour le gaz butane, une partie du kérosène consommé au Sénégal est produite par la SAR, le reste étant importé. La distribution se fait essentiellement à travers les stations d'essence, où viennent se ravitailler les détaillants. Ces derniers revendent le pétrole dans leurs boutiques ou sur le marché.

Si le pétrole n'a pas connu le même essor que le gaz butane, c'est essentiellement parce qu'un équipement adapté a jusqu'à ce jour manqué (MADON et MATLY, 1987; SOW, 1990). Lorsqu'un tel équipement sera disponible, le pétrole représentera une réelle alternative au gaz. D'autant plus que, hors taxes, la cuisson au pétrole devrait revenir bien meilleur marché que celle au gaz²⁸. Remarquons cependant que, d'après les enquêtes de la Banque Mondiale (MADON et MATLY, 1987), les ménagères sénégalaises ont en général une bien moins bonne opinion du pétrole que du gaz, ce qui laisse présager qu'il faudra attendre encore longtemps avant que le pétrole ne devienne un combustible couramment utilisé pour la cuisson au Sénégal.

²⁸ MADON et MATLY (1987), sur la base de tests de cuisson effectués au CERER, ont estimé que le coût du combustible pour la préparation d'un plat standard s'élevait à 32,7 FCFA contre 48,3 FCFA avec un Blip Banekh.

L'électricité, énergie de luxe

L'électricité est, au Sénégal, une source d'énergie très chère. Même les ménages sénégalais les plus aisés ne l'utilisent pas pour cuisiner²⁹. Cette situation ne devrait guère changer au cours des prochaines décennies, à moins qu'il ne devienne possible de proposer aux ménages sénégalais un courant très bon marché - ce qui semble pour le moins improbable.

Les briquettes de tourbe

Le Sénégal possède un gisement de combustibles fossiles qui pourrait être utilisé pour couvrir une partie de ses besoins en combustibles domestiques: celui de la tourbe des Niayes. Pour faciliter l'allumage du combustible et réduire les émanations de fumée et les quantités de cendres, les études faites par la Compagnie des Tourbières du Sénégal (CTS) ont montré que cette tourbe pouvait être carbonisée, dessalée et mise en briquettes. Selon MADON et MATLY (1987), le coût du combustible pour la préparation d'un plat standard serait aujourd'hui encore d'environ 40% plus élevé que pour le charbon de bois. Les briquettes de tourbe ne pourront donc devenir compétitives qu'une fois que les prix des combustibles ligneux auront sensiblement augmenté. En outre, elles ne devraient pouvoir remplacer qu'une petite partie des combustibles ligneux consommés, vu l'étendue relativement faible du gisement³⁰.

Les énergies nouvelles

Une expérimentation intense se poursuit depuis de nombreuses années à travers le monde pour mettre au point des cuisinières solaires adaptées aux besoins des pays en voie de développement. Qu'il s'agisse de miroirs paraboliques ou de boîtes emmagasinant la chaleur, les cuisinières solaires sont en général très mal perçues par les ménagères: Elles dégagent beaucoup de chaleur, de lumière, cuisent lentement, et leur utilisation est tributaire des conditions d'ensoleillement. Toutefois, il n'est pas à exclure qu'un bon modèle de cuisinière solaire sera un jour mis au point. Il pourrait alors faire le bonheur des ménagères du Sahel, du moins pour la préparation du repas de midi, lorsqu'il y a du soleil.

La technologie du biogaz, elle, n'est plus à inventer. Mais ce sont les possibilités d'application qui font défaut. Les biodigesteurs nécessitent en effet un apport continu de matière organique. Ils seraient donc plutôt destinés au milieu rural. Or, c'est en milieu rural que les combustibles ligneux sont le plus difficile à concurrencer: ces derniers sont proches des villages, donc plutôt

²⁹ Lors des enquêtes MASENS, aucun ménage n'a déclaré utiliser l'électricité comme combustible principal de cuisson.

³⁰ MADON et MATLY proposent un scénario d'exploitation de la tourbe dans lequel la production se stabiliserait à 30 000 tonnes de briquettes par an. (La consommation actuelle de charbon de la seule ville de Dakar est de l'ordre de 100 000 tonnes / an).

bon marché, alors que les technologies nouvelles, l'assistance technique et les pièces détachées correspondantes doivent venir de loin.

Les possibilités de modélisation

Parmi les sources d'énergie qui viennent d'être passées en revue, le kérosène, les briquettes de tourbe et l'énergie solaire sont certainement celles qui ont le plus de chances de faire, dans les 10 ou 20 années à venir, une percée sur le marché sénégalais.

La "distribution" de l'énergie solaire est tout ce qu'il y a de plus décentralisé. Elle est en ce sens comparable à celle, tout aussi fictive, du bois de feu des ménages auto-ravitailés. Il n'est guère possible d'expliquer la réaction possible des utilisateurs potentiels de cette énergie nouvelle, pour l'utilisation de laquelle il faut et il suffit d'acquérir une cuisinière solaire. Lors d'une simulation de l'avenir énergétique du Sénégal, il faudra donc faire des hypothèses directement au sujet de la part future de cette nouvelle énergie dans les différentes classes de consommateurs.

Le système de distribution actuel du kérosène et celui, à venir, des briquettes de tourbe, en revanche, s'apparentent fortement à celui du gaz butane. Le combustible est vendu dans certaines localités à des prix connus que peut influencer l'Etat à travers des taxes. De petits commerçants peuvent ensuite se charger d'acheminer le combustible vers d'autres localités, où ils le revendent à un prix majoré. Pour utiliser un modèle de formation des prix dans l'espace comme celui du gaz, les données essentielles suivantes doivent être réunies:

- quantités que les sociétés distributrices sont prêtes à fournir, par localité
- prix hors taxes fixés par les sociétés distributrices et taxes
- prix du transport entre localités.

Alors que des scénarios peuvent être faits au sujet des deux premiers ensembles de données, les prix de transport peuvent être grossièrement évalués à partir de ceux, actuellement pratiqués, du gaz butane. Il a été montré que le prix de transport du gaz était relativement homogène et s'établissait autour des 0,09 F / kg.km. En tenant compte du transport de la bouteille vide à l'aller comme au retour, on peut estimer que le prix de transport à l'unité de poids dans le sens Dakar - province est d'environ 0,045 F/kg.km³¹.

³¹ En considérant que la bouteille vide retourne à Dakar au prix du transport du bois de feu, soit 0,0288 F / kg.km, et que le rapport de la tare au poids net est de 0,6, le prix du transport dans le sens Dakar - province est déterminé par l'équation:

$$(1 + 0,6) \text{ kg} \cdot x + 0,6 \text{ kg} \cdot 0,0288 \text{ F / kg.km} = 0,09 \text{ F / km.}$$

Si la modélisation de l'offre de certains combustibles non encore présents sur le marché semble relativement aisée, il faut se rappeler que cette modélisation n'a d'utilité que si, de l'autre côté, les réactions des consommateurs à ces offres peuvent être modélisées de façon satisfaisante, ce qui est loin d'être évident. Nous verrons au chapitre consacré à la consommation que la modélisation du comportement des consommateurs vis-à-vis des combustibles actuellement disponibles laisse de la place à d'assez grandes incertitudes. C'est pourquoi les exemples de simulations présentés au chapitre 6 ne feront pas intervenir de modélisation d'offre de combustibles nouveaux mis à part le kérosène. Cependant, la possibilité de simuler la formation des prix dans l'espace d'un combustible nouveau pourrait être d'une grande utilité à ceux qui désirent étudier en détail les chances de succès d'une nouvelle source d'énergie. Quelques enquêtes préliminaires, sur la base d'une diffusion restreinte du nouveau combustible, pourraient dès lors être utilisées pour cerner les réactions possibles des consommateurs.

4.3 L'OFFRE, CLE DU MARCHE

En faisant appel à des fonctions de consommation simplifiées à l'extrême, selon lesquelles les consommateurs choisissent le combustible le moins cher, il est déjà possible d'expliquer, dans les grandes lignes, les principaux phénomènes qui caractérisent le système énergétique des combustibles domestiques au Sénégal; par exemple le passage du bois de feu au charbon de bois dans les villes de l'intérieur du pays. Nous montrerons en effet qu'il existe un éloignement critique des ressources, à partir duquel la cuisine au charbon devient plus économique que la cuisine au bois, et dont la valeur peut être calculée à partir de paramètres obtenus lors du calage des modèles de formation des prix.

Comprendre les phénomènes actuels est l'un des buts de la modélisation de l'offre. Mais cette modélisation doit aussi servir à tester différentes mesures que peut prendre l'Etat dans le but de modifier l'offre et, par là, les consommations. Nous dresserons une liste des possibilités d'intervention qui s'offrent à l'Etat, et nous montrerons que les plus importantes d'entre elles peuvent aisément être simulées. Nous terminerons ce chapitre par quelques conclusions sur l'étude des systèmes d'offre.

4.3.1 La compétition spatiale des combustibles

L'objectif de ce paragraphe est d'illustrer l'utilisation des modèles de formation des prix en montrant que ces modèles constituent une bonne base pour l'explication des deux principaux phénomènes de substitution entre combustibles domestiques actuellement observés au Sénégal:

- le passage du bois de feu au charbon de bois dans les villes de l'intérieur du pays
- le passage du charbon de bois au gaz à Dakar.

Grâce aux modèles de formation des prix, on peut en effet délimiter des régions de l'espace à l'intérieur desquelles un combustible est plus avantageux que ses concurrents, et on peut constater que les phénomènes de substitution font suite à des déplacements des limites de ces régions.

La compétition bois - charbon

En comparaison avec ses voisins, le Sénégal est un pays où le charbon est déjà utilisé depuis fort longtemps pour la cuisson. Cependant, avant la Seconde Guerre mondiale, le charbon n'était guère utilisé que par les colons et les notables indigènes (SOW, 1990). C'est donc entre 1940 et 1980 que le charbon est devenu le combustible principal des dakaroises, à la place du bois. Dans

d'autres villes d'Afrique de l'Ouest, le charbon est actuellement en train de se substituer au bois: à Bamako, au Mali, par exemple, où le charbon n'est pas encore très répandu, mais est de plus en plus apprécié (SOW, 1990); dans les grandes villes de l'intérieur du Sénégal, aussi, comme l'ont fait remarquer MADON et MATLY (1987).

Bien entendu, la décision d'utiliser tel combustible à la place de tel autre est du ressort des consommateurs, et il faudrait disposer des conclusions sur l'analyse de leur comportement pour expliquer convenablement les phénomènes de substitution entre combustibles. Toutefois, comme nous le verrons en détail au chapitre suivant, les prix relatifs des combustibles font partie des variables explicatives les plus importantes du choix des combustibles.

Or, les prix de l'énergie utile du bois et du charbon peuvent être calculés en fonction de l'éloignement des ressources, à partir des données figurant dans le tableau 4.8, soit les paramètres des relations prix - éloignement, les pouvoirs calorifiques (M) et les rendements (η).

	Prix de vente au détail ³²			
	α	β	M [MJ/kg] ³³	η ³⁴
Bois	7,45	0,0285	17	12 %
Charbon	23,9	0,0587	29	20 %

Tableau 4.8 Bases de la détermination des relations prix de l'énergie utile - éloignement des ressources pour les combustibles ligneux

On obtient les prix suivants par unité d'énergie utile [F/MJ]:

$$p^{\text{ut}}_{\text{bois}} = 3,60 + 0,0141 \cdot d$$

$$p^{\text{ut}}_{\text{char}} = 4,12 + 0,0101 \cdot d$$

où d est l'éloignement des ressources. Ces relations sont représentées graphiquement à la figure 4.9.

³² D'après tableaux 4.4 et 4.6

³³ Pouvoirs calorifiques, cf. annexe 2.1

³⁴ Rendements, cf. annexe 2.1

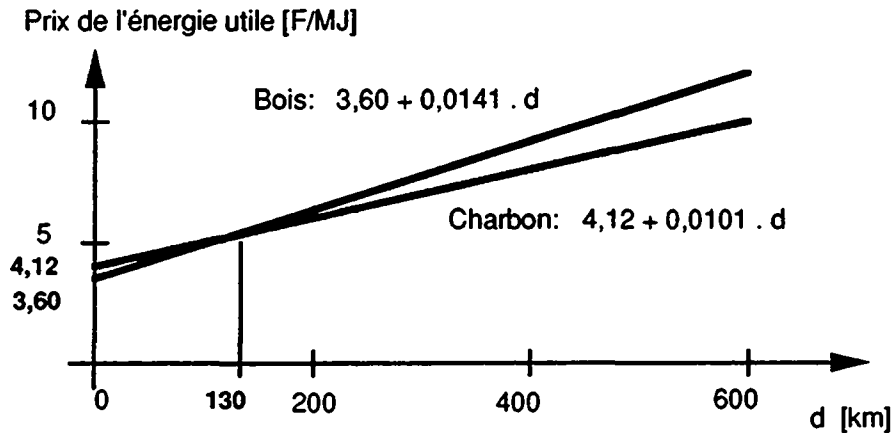


Fig. 4.9 Prix de l'énergie utile du bois et du charbon en fonction de l'éloignement des ressources

On identifie sur cette figure un éloignement critique $d^* = 130 \text{ km}^{35}$ à partir duquel la cuisine au charbon devient plus économique que la cuisine au bois. POULSEN (1978) a déjà souligné l'importance de ce seuil³⁶. Son dépassement conduit, en l'absence d'interventions efficaces de l'Etat, et si les consommateurs choisissent réellement le combustible le moins cher, à une augmentation considérable des quantités de bois coupées. En admettant que le rendement pondéral de la carbonisation est de 18 % (annexe 2.1), et en utilisant les valeurs de rendement et de pouvoir calorifique du tableau 4.8, on peut calculer qu'il faut couper 2 fois plus de bois lorsqu'on veut satisfaire à partir de charbon de bois des besoins précédemment satisfaits à partir de bois de feu³⁷.

Remarquons que, en raison de la faible différence des pentes observables sur la figure 4.9, les marges d'erreur conduisent à une assez grande incertitude quant à la valeur exacte du seuil.

³⁵ $d^* = (4,12 - 3,60) \text{ km} / (0,0141 - 0,0101)$

³⁶ Selon PIRES (1990). Cet auteur a déterminé pour le Mali un éloignement critique de 1620 km. Il a cependant tenu compte de la valeur économique du bois sur pied, c'est-à-dire du prix qu'il faut payer pour reconstituer les ressources ligneuses. Sa valeur n'est donc pas comparable à celle que nous avons ici.

³⁷ $(17 \text{ MJ / kg} \cdot 12 \%) / (29 \text{ MJ / kg} \cdot 20 \% \cdot 18 \%) = 1,954$

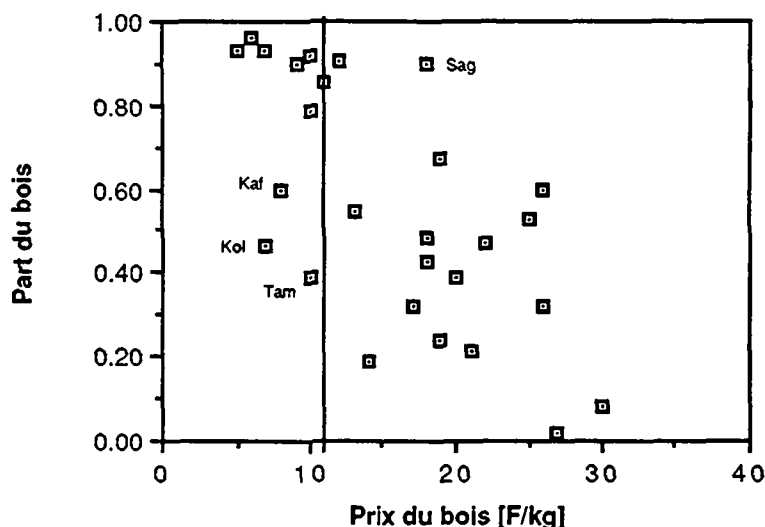


Fig. 4.10 Part des ménages ayant choisi le bois (et non le charbon) comme combustible ligneux principal, en fonction du prix de vente du bois, par ville
D'après les enquêtes MASENS - voir aussi tableau 4.9.

Cependant, le chiffre de 130 km semble être assez réaliste. Il lui correspond un prix de vente au détail du bois de 11 F/kg. La figure 4.10 permet de constater que, dans les villes où le prix du bois est inférieur à 11 F/kg, le bois est bien, en général, pour plus de 80 % des ménages, le combustible ligneux principal. On remarquera cependant quelques exceptions importantes: celles des villes de Kaffrine, Tambacounda et Kolda. Ce sont des villes relativement grandes, proches des zones de production de charbon. La faible différence de prix à l'énergie utile entre bois et charbon y a vraisemblablement conduit bon nombre de ménages à opter pour le second, ce qui laisse supposer que d'autres variables interviennent (confort, prestige ...).

La compétition charbon - gaz

Le charbon se substitue progressivement au bois lorsque l'éloignement des ressources dépasse une certaine distance, qui a pu être estimée à 130 km environ. De même, il existe des régions où le gaz se substitue progressivement au charbon. Ce phénomène peut, comme le précédent, faire l'objet d'une explication simplifiée sur la base des modèles de formation des prix dans l'espace.

Cette fois, les sens de variation des prix des deux combustibles sont inversés: Alors que le prix du charbon augmente dans le sens province - Dakar, celui du gaz augmente dans le sens Dakar - province. Imaginons un axe routier reliant Dakar à sa localité de production de charbon la plus éloignée, supposée se trouver à 600 km (dans les environs de Vélingara). Cet axe est représenté par l'axe des abscisses sur la figure 4.11.

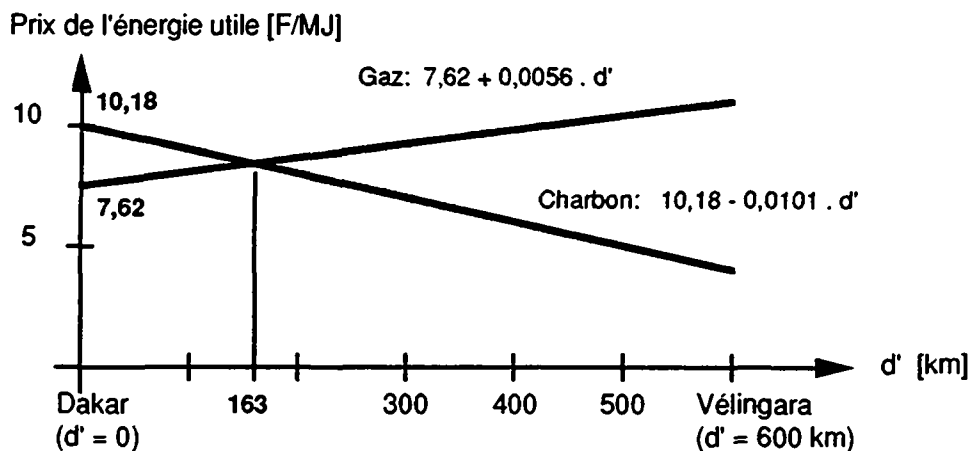


Fig. 4.11 Prix de l'énergie utile du charbon et du gaz sur un axe Dakar - province

Sur cette figure sont aussi représentés les variations des prix à l'énergie utile du charbon et du gaz, en fonction de la distance depuis Dakar:

- Pour le charbon, d a été remplacé par $600 \text{ km} - d$ dans l'équation utilisée ci-dessus (compétition bois - charbon). D'où:

$$p^{\text{ut}}_{\text{char}} = 10,18 - 0,0101 \cdot d'$$

- Pour le gaz, les paramètres de la relation prix - éloignement du gaz populaire, un pouvoir calorifique de 45 MJ / kg et un rendement de 35% ³⁸ conduisent à la relation:

$$p^{\text{ut}}_{\text{gpop}} = 7,62 + 0,0056 \cdot d'$$

La distance critique, à laquelle le charbon et le gaz ont le même prix à l'énergie utile, s'établit à $d^* = 163 \text{ km}$. C'est une distance relativement faible par rapport à l'éloignement des ressources ligneuses (600 km), ce qui explique pourquoi le gaz entre en concurrence avec le charbon plutôt qu'avec le bois.

Les résultats des enquêtes MASENS auprès des ménages confirment que la distance-seuil, depuis Dakar, jusqu'à laquelle s'étend la "propagation"³⁹ du gaz, se situe entre 100 et 200 km : Alors qu'à Thiès (70 km) les ménages utilisant le gaz comme combustible principal totalisent 31% du total, ils font encore 16% à Diourbel (146 km), mais plus que $7,8\%$ à Kaolack (190 km). Par ailleurs, dans aucune localité à plus de 200 km de Dakar les ménages utilisant le

³⁸ Voir annexe 2.1.

³⁹ Au sens de "devenir un combustible couramment utilisé par une part non-négligeable des ménages (par ex. 10%).

gaz comme combustible principal ne dépassent pas les 8 % (mise à part Oussouye: 9 ménages sur 60). Ces chiffres sont tirés du tableau 4.9.

Ville	Combustible principal			Total
	charbon	bois	gaz	
Kayar	45	21	4	70
Diourbel	139	105	47	291
Fatick	101	47	2	150
Mbour	138	37	115	290
Kaolack	723	230	81	1034
Thiès	161	182	157	500
Touba	110	132	17	259
Gossas	37	346	15	398
Tivaouane	44	41	95	180
Louga	113	73	45	231
Sagata	8	72	0	80
Kaffrine	127	190	19	336
Nioro	15	87	8	110
St Louis	316	27	27	370
Dagana	54	80	1	135
Bakel	3	75	2	80
Matam	20	73	4	97
Ndioum	19	39	0	58
Linguere	45	40	4	89
Tambacounda	373	235	18	626
Goudiry	18	251	16	285
Kedougou	26	284	0	310
Ziguinchor	293	69	28	390
Oussouye	5	46	9	60
Marsassoum	4	56	0	60
Kolda	104	91	5	200

Tableau 4.9 Nombre de ménages par combustible principal

D'après enquêtes MASENS

L'importance de la compétition spatiale des combustibles

L'étude des deux compétitions spatiales bois - charbon et charbon - gaz se prête à une synthèse. La figure 4.11, représentant les prix à l'énergie utile de l'axe Dakar - Vélingara, peut être complétée par les prix à l'énergie utile du bois. On obtient la figure 4.12.

Les deux seuils, à 163 et 470 km de Dakar, délimitent trois zones où le gaz, le charbon et le bois sont respectivement les plus compétitifs. Les chiffres obtenus sont à utiliser avec précaution. Rappelons que les consommateurs ne choisiront pas forcément le combustible le meilleur marché, comme l'illustrent les parts non-négligeables des ménages cuisinant au charbon dans les villes de Kaffrine, Tambacounda et Kolda. Rappelons aussi que les relations prix - éloignement

ne donnent que des valeurs approchées des prix de vente au détail. Par ailleurs, les seuils sont assez sensibles aux paramètres utilisés. Par exemple, si le rendement du gaz est supposé être de 30 % plutôt que de 35 %, d^* passe de 163 à 77 km.

Le côté qualitatif de la figure 4.12 appelle cependant quelques réflexions intéressantes:

- Il n'est guère facile, pour une quelconque source d'énergie, de faire concurrence au bois de feu près des zones non-épuisées de production de ce combustible.
- Toutes choses égales par ailleurs, un éloignement croissant des ressources ligneuses conduit à une extension de la distance sur laquelle le gaz est le combustible le moins cher, mais aussi de celle sur laquelle le charbon est le moins cher.
- Un combustible peut être rendu plus attrayant qu'un autre, sur une grande étendue de territoire, moyennant une petite variation de prix.
- Ainsi, le domaine dans lequel le charbon est le plus compétitif, et qui peut être très étendu, pourrait être fortement réduit, voire totalement éclipsé, par une progression des domaines du gaz et du bois.

Ces réflexions laissent entrevoir l'importance de la modélisation des interventions de l'Etat sur les systèmes d'offre.

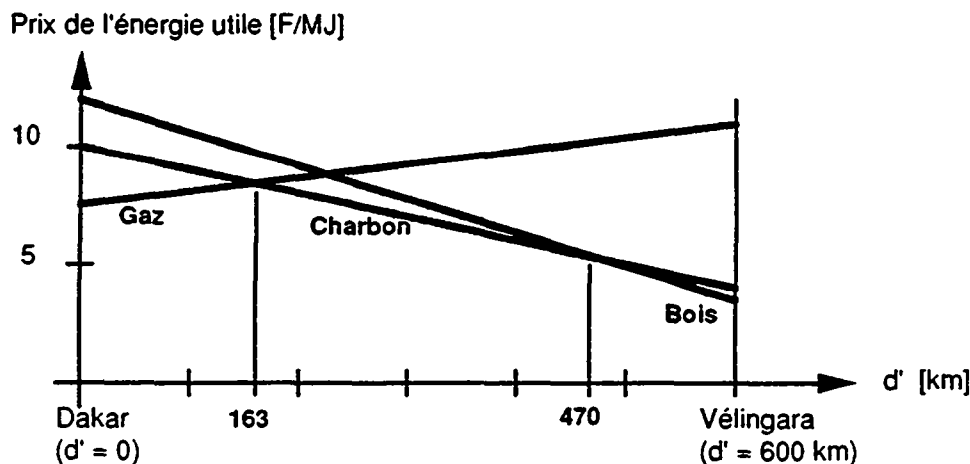


Fig. 4.12 Prix de l'énergie utile des trois principaux combustibles domestiques sur un axe Dakar - province

4.3.2 Les possibilités d'intervention de l'Etat

Dans ce paragraphe seront examinées les possibilités qui s'offrent à l'Etat pour intervenir sur les systèmes d'offre: les taxes, qui se répercutent directement sur les prix; les quotas, qui limitent la

disponibilité d'une ressource ou réduisent les flux sur certains itinéraires; enfin les actions sur les technologies, et plus particulièrement sur la méthode de carbonisation du bois. Il sera montré que les plus importantes de ces possibilités d'intervention de l'Etat peuvent aisément être représentées dans les modèles de formation des prix. Pour finir, les importations de combustibles ligneux se verront également traitées.

Les actions directes sur les prix

La fixation autoritaire des prix n'est pas un outil efficace pour la régulation des prix. Il a déjà été signalé que les prix fixés par l'Etat pour les combustibles ligneux n'étaient respectés ni dans les zones de production, ni dans les localités de consommation. Par contre, les taxes (au sens large, subventions comprises), pour autant qu'elles puissent être perçues, permettent de ramener un prix du marché à une valeur voulue. Parmi les multiples taxes qui peuvent être perçues tout au long des filières des combustibles ligneux ou du gaz, les suivantes sont probablement les plus judicieuses:

(p1) Les taxes de régulation des prix du gaz

S'ajoutant au prix ex-raffinerie, elles permettent à l'Etat d'influencer les prix des différentes bouteilles de gaz, et même de stabiliser complètement ces prix, comme c'est actuellement le cas. En fait, l'Etat a plutôt tendance à fixer les prix et laisser varier la taxation nette.

(p2) Les taxes sur l'utilisation des ressources nationales

Ces taxes sont en fait le prix de vente, par l'Etat, des ressources énergétiques nationales. Dans le cas des combustibles ligneux, leur niveau devrait un jour atteindre la valeur économique du bois, ce qui permettrait à l'Etat d'assurer le renouvellement des ressources ligneuses nationales.

(p3) Les taxes anti-charbon

Tant que les taxes sur le bois coupé pour la production des combustibles ligneux n'atteint pas la valeur économique du bois, il est souhaitable de taxer d'avantage le bois servant à la production de charbon, dans le but de favoriser la consommation de bois (plutôt que de charbon) et de limiter ainsi les quantités de bois coupées.

(p4) Les taxes pour encaisser les marges supplémentaires

Les marges supplémentaires m_i (paragraphe 4.1.2), dont profitent actuellement les exploitants forestiers bénéficiaires de quotas bien situés, peuvent être encaissées par l'Etat à travers des taxes correspondantes sur le bois coupé. Des marges supplémentaires peuvent aussi être récupérées dans le cas du gaz: lorsqu'un centre de distribution de l'intérieur du

pays n'a pas la capacité nécessaire pour satisfaire la demande locale, une taxe supplémentaire peut permettre de ramener le prix officiel au prix du marché.

Si toutes ces taxes peuvent paraître souhaitables, la mise en vigueur de celles qui s'appliquent aux combustibles ligneux n'est point aisée, en raison des difficultés à les percevoir que risquent de rencontrer les agents de l'Etat: la partie de la production qui échappe au contrôle de l'Etat risque de croître. Toute simulation d'augmentations de taxes doit donc s'accompagner d'une nouvelle évaluation de la fraude.

Les autres possibilités d'intervention de l'Etat

Parmi les moyens d'action dont dispose l'Etat pour intervenir sur l'offre des combustibles domestiques figurent aussi, à côté des taxes, les recommandations et les règlements. La filière bois et charbon de bois est, comme cela a été décrit, fortement réglementée. Certaines règles, comme l'interdiction de couper du bois vert, ne sont guère respectées, ou ne peuvent même pas être respectées⁴⁰. En revanche, la limitation des productions et des flux par les quotas, malgré la persévérance de la fraude, s'avère déjà plus performante.

Les quotas sur les productions et les flux

Les principaux types d'actions que peut prendre l'Etat pour limiter les productions et les flux sont:

(q1) La limitation des quantités produites

L'utilité des quotas de production des combustibles ligneux (en termes de bois) est évidente. Elle a déjà été discutée au chapitre 3. Il a aussi déjà été montré au paragraphe 4.1.1 comment les quotas sont dépassés, particulièrement dans les cas où, au niveau national, la somme des quotas fixés est insuffisante. D'où la nécessité de prendre en compte la fraude lors de la définition des quantités de bois disponibles pour la commercialisation (§ 3.3.4).

(q2) La limitation des quantités transportées ou transformées

Grâce aux permis de circulation, l'Etat contrôle une grande partie des flux (ou transports) de combustibles ligneux. Il pourrait dès lors imposer des contraintes aux flux, et les modifier par rapport à leur état d'équilibre libre. Cependant, l'optimalité du système de production et de transport libre mise en évidence au paragraphe 4.1.2, veut que toute

⁴⁰ Les exploitants forestiers sont généralement installés par les Eaux et Forêts dans des zones délimitées dans lesquelles la densité de bois mort ne leur permettrait de produire à partir de bois mort qu'une infime partie des quotas qui leur sont alloués (observations personnelles de l'auteur).

contrainte supplémentaire engendre une augmentation du coût global de production et de transport. Par conséquent,

- ni des quotas spécifiques à un combustible ligneux, qui imposent une répartition, entre bois et charbon, d'un quota d'équivalent-bois,
- ni une modification des flux entre localités de production et de consommation, mise en oeuvre sur la base des permis de circulation

ne constituent des actions bénéfiques sur le plan macro-économique. Etant donné que de telles actions, exception faite de l'isolement de marchés régionaux (point q3 ci-dessous), ne se justifient pas non plus sur d'autres plans, il n'y a pas lieu de les modéliser pour pouvoir les simuler.

Remarquons toutefois que la fixation de quotas spécifiques à un combustible peut être une aide précieuse lors de l'organisation d'une campagne de production forestière. Pour les raisons évoquées ci-dessus, ces quotas devraient alors, autant que possible, correspondre aux quantités du libre équilibre des flux.

(q3) *L'isolement de marchés régionaux*

Si des limites sont imposées aux flux à des niveaux proches des flux libres, le coût global de production et de transport ne s'écartera guère de son optimum. Par contre, de telles limites peuvent faire baisser considérablement les prix de vente au détail d'une région, en isolant un marché régional, de même nature que les marchés locaux, dont il a été question au paragraphe 4.1.4, mais à une plus grande échelle.

Supposons que les ressources disponibles de bois soient épuisées dans les localités de production de toutes les zones d'une région, et que l'équilibre spatial des prix conduise à de grandes marges supplémentaires. Si nous limitons maintenant les exportations de cette région à un niveau légèrement inférieur à leur niveau initial, il va se trouver au moins une zone de la région dans laquelle les ressources de bois disponibles ne seront plus épuisées. La marge m_i correspondante tombera à zéro, et les prix de vente au détail baisseront également. Un marché régional aura été isolé.

L'isolement de marchés régionaux peut être utilisée pour éviter de faire subir à certaines régions les effets (au niveau des prix) de la demande croissante de grands centres de consommation⁴¹. Actuellement au Sénégal, l'exportation de combustibles ligneux des régions du Fleuve et de Louga vers Dakar et le centre du Bassin arachidier est interdite, de

⁴¹ Notons cependant que la baisse des prix peut avoir pour effet secondaire une augmentation des quantités consommées, ce qui peut ne pas être un effet désiré de l'isolement d'un marché régional.

même que l'exportation de combustibles ligneux depuis la région de Ziguinchor. Il est difficile de dire dans quelle mesure ces interdictions agissent sur les prix⁴².

L'amélioration du rendement de la carbonisation

Les actions par lesquelles l'Etat cherche actuellement à faire améliorer le rendement de la carbonisation sont des recommandations plutôt que des règlements. La Meule Casamançaise, mise au point en Casamance avec l'appui de l'USAID, permettrait d'économiser environ 20 % de bois (MADON et MATLY, 1987). L'utilisation de cette meule est encouragée par l'information sur ses avantages, la formation à son utilisation, et des incitations comme l'attribution de quotas à des groupements d'ouvriers (RIBOT, 1990). Néanmoins, la meule casamançaise n'est guère utilisée (RIBOT, 1990 et observations personnelles). Les auteurs cités évoquent plusieurs raisons à cela, dont la plus importante semble être d'ordre financier: les utilisateurs de la meule ont de la peine à trouver les fonds pour acquérir et renouveler les cheminées métalliques.

Dans ces conditions, une augmentation des taxes sur les produits forestiers pourrait faire changer l'attitude des producteurs. Si les taxes sur les produits forestiers étaient relevées (taxes t2 et t3 ci-dessus), la meule casamançaise, comme toute autre technique permettant une amélioration du rendement, gagnerait en attrait: elle permettrait d'économiser une ressource plus coûteuse.

La représentation des interventions de l'Etat

- Les quotas de production des combustibles ligneux (point q1 ci-dessus) interviennent déjà, en tant que variables exogènes, dans la détermination des quantités de bois R_i disponibles pour la commercialisation.
- Les prix officiels du gaz, dans les localités où il y a distribution officielle, seront des variables exogènes. Ils permettront de calculer la taxation nette à partir de ces autres variables exogènes que sont le prix hors-taxes ex-raffinerie et les coûts de distribution.
- Les taxes sur les ressources ligneuses (points p1 et p2 ci-dessus) interviendront comme variables exogènes dans les coûts c^*_{ij} (paragraphe 4.1.4). Leurs valeurs viendront s'ajouter aux valeurs détaxées des c^*_{ij} , calculées sur la base des distances moyennes d_{ij} de l'annexe 4.3. Ces taxes pourront être introduites séparément pour le bois et le charbon de bois.

⁴² Les prix observés sont proches des prix auxquels on pourrait s'attendre sans les interventions. Le prix du charbon à Ziguinchor (isolée), 32 F/kg, est proche de celui de Tambacounda (exportant vers Dakar et située à peu près à la même distance de Dakar), 35 F/kg.

- Les taxes pour encaisser les marges supplémentaires m_i (point p4 ci-dessus) ne modifient pas l'équilibre des prix et des flux. Il n'est donc pas utile de modéliser leur introduction. Cependant, une variable exogène désignera la part des revenus supplémentaires récupérés par l'Etat. Elle sera utilisée pour l'évaluation économique des scénarios.
- L'isolement d'un marché régional (point q3 ci-dessus) peut être simulé, dans le cas d'un isolement total (pas d'exportations), par l'attribution, à ce marché régional, d'un modèle de formation des prix indépendant⁴³.

Les importations de combustibles

Le gaz et le kérosène en attestent, les importations de combustibles domestiques conventionnels ne sont pas étrangères à la politique énergétique sénégalaise. Mais, depuis peu, les produits pétroliers ne sont plus les seuls combustibles domestiques importés: le premier chargement de charbon bissau-guinéen est arrivé à Dakar en janvier 1991 ("Le Soleil" du 12.02.91).

Deux variantes sont possibles pour la modélisation des importations de combustible, selon la nature du combustible importé:

- Si tout le combustible consommé dans le pays est importé, comme c'est le cas du gaz et du pétrole lampant, les quantités disponibles dans les zones où il y a distribution seront les variables exogènes qui rendent compte de l'importation. On peut admettre que dans une localité de distribution au moins la quantité disponible est illimitée. (Ce sera Dakar pour les deux combustibles cités).
- Si le combustible importé est déjà produit dans le pays, comme c'est le cas des importations de charbon de bois, il convient, pour éviter les confusions, de modéliser son importation à l'aide d'une zone supplémentaire fictive. Les coûts c_{ij} à partir de cette zone doivent être déterminés. Ils devront indiquer les prix de vente au détail minimaux dans les localités de consommation susceptibles d'être approvisionnées en combustible importé. Dans les exemples d'application du chapitre 6, il a été supposé que le charbon importé n'est vendu qu'à Dakar. A première vue, la marge supplémentaire éventuelle du combustible importé peut être considérée entièrement encaissée par l'Etat, moyennant des droits de douane. Remarquons toutefois que le pays exportateur risque bien, si elle est non-nulle, de récupérer lui la marge supplémentaire en augmentant son prix à l'exportation. Il est donc plus prudent de ne pas compter sur cette marge supplémentaire du côté des recettes de l'Etat.

⁴³ La simulation d'isolements partiels serait plus ardue, à la fois sur le plan de la modélisation (nécessité de faire apparaître des contraintes sur les flux), et sur le plan de l'utilisation du modèle (nécessité de chiffrer les contraintes sur les flux).

4.3.3 Conclusions sur l'étude des systèmes d'offre

L'objectif principal de la modélisation de l'offre des combustibles domestiques, qui était d'expliquer quantitativement la formation des prix dans l'espace en faisant intervenir les quantités consommées, a été atteint. Les modèles de formation des prix des combustibles ligneux et du gaz, qui sont des modèles de formation des prix dans l'espace, conformément à la dimension spatiale des systèmes d'offre, font en effet intervenir des marges "supplémentaires" (m_j), nulles lorsque les ressources disponibles ne sont pas épuisées, et qui peuvent prendre des valeurs importantes lorsque les ressources locales sont épuisées et qu'un appoint de combustible doit venir de loin. La régularité avec laquelle les prix observés croissent en fonction de la distance a non seulement permis de créer un schéma simple d'estimation des principaux paramètres; elle justifie aussi certaines hypothèses sous-jacentes à la modélisation, et laisse présager que de bonnes estimations de prix futurs pourront être réalisées.

Le champ d'application des modèles de formation des prix ne s'étend cependant pas au cas des marchés locaux, sur lesquels les prix échappent à l'interconnexion spatiale. De tels marchés locaux existent pour le bois de feu en milieu rural, et, comme le font penser quelques prix observés, pour le bois de feu toujours dans les petites villes de certaines zones. Les prélèvements de bois occasionnés par le bois de feu vendu sur les marchés locaux doivent être traités comme ceux qui relèvent de l'auto-ravitaillement. Des marchés régionaux, de même nature mais plus étendus que les marchés locaux, peuvent en revanche être isolés dans le cadre des modèles de formation des prix.

Résumons la procédure à suivre pour mettre en oeuvre les modèles développés:

1. Evaluer les distances d_{ij} moyennes de zone à zone entre les localités de production et les localités de consommation des différentes classes de taille.
2. Estimer les paramètres α_i et β des relations linéaires prix - éloignement qui seront généralisées aux relations prix - distance $c^*_{ij} = \alpha_i + \beta \cdot d_{ij}$
3. Déterminer l'optimum sous contraintes de la fonction objectif $f = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{2n} c^*_{ij} \cdot q_{ij}$ pour trouver les flux q , puis les prix de vente au détail p .

Bien que de structure relativement simple, les modèles de formation des prix dans l'espace permettent de représenter cette particularité du système d'offre des combustibles ligneux qu'est la concurrence spatiale, observée à un moment donné, des formes d'énergie bois de feu et charbon de bois au niveau des ressources ligneuses. Ils permettent également une représentation aisée des principales interventions de l'Etat sur les systèmes d'offre.

Il est déjà possible, à ce stade, de tirer quelques enseignements de l'analyse et de la modélisation des systèmes d'offre:

Sous réserve de validité des hypothèses faites au sujet de la formation des prix des combustibles ligneux, on peut dire que l'imposition de quotas sur les flux de combustibles ligneux ou les quantités de bois transformées en charbon ferait subir une perte de performance au système de production et de transport, en raison de l'optimalité globale de ce dernier.

En revanche, des taxes non-uniformes sur le bois coupé permettraient de récupérer, du moins en partie, les marges supplémentaires m_i qui profitent actuellement aux heureux bénéficiaires de quotas de production bien situés.

Région	Production contrôlée* (quintaux)	Lieux de production	Economie de distance (km)	Bénéfices supplémentaires** (F CFA)
Kolda	188'335	Vélingara	0	0
Tamba.	1'214'271 <	Koussanar (50 %)	150	335'138'796
		Missira (50 %)	69	154'163'846
Kaolack	49'398	Nganda	280	50'899'699
Total				540'202'341

*: Sans les quantités saisies et les quantités exploitées gratuitement

** : Bénéfices supplémentaires = Production x Economie de distance x 0.0368 F/kg.km

A titre de comparaison, les recettes totales de l'Etat dues aux taxes sur le charbon s'élevaient à:

$$1'508'188 \text{ q}^2 \cdot 2 \text{ sacs/q}^1 \cdot 250 \text{ F/sac} = 754'094'000 \text{ F.}$$

Tableau 4.12 Bénéfices supplémentaires engendrés par les taxes uniformes sur le charbon en 1989 Sources : DEFC; RIBOT (1990) et estimations personnelles

Le tableau 4.12 donne une idée du total des revenus supplémentaires en jeu, sur la base d'un coût du transport de 0,0368 F/kg.km⁴⁴: de l'ordre de 500 millions de FCFA par an sont abandonnés aux producteurs et sont à l'origine d'une discrimination spatiale de ces derniers. Ce chiffre est du même ordre de grandeur que le total des recettes actuelles provenant des taxes sur le charbon! Certes, l'imposition de taxes par lesquelles l'Etat pourrait encaisser les marges supplémentaires risque de provoquer un accroissement de la fraude. Mais les taxes encaissées pourraient elles-mêmes financer un contrôle plus strict de l'exploitation forestière. Et même si une politique de taxes non-uniformes ne devait pas faire croître les recettes de l'Etat, elle serait

⁴⁴ D'après RIBOT (1990).

encore doublement bénéfique: elle mettrait un terme à la forte discrimination spatiale des exploitants forestiers, tout en créant les bases d'une meilleure protection des surfaces forestières qui, en raison de leur situation, ont le plus souffert.

Relevons que l'estimation ci-dessus des bénéfices supplémentaires est prudente, car, bien que la formation des prix ait pu être modélisée, une question importante sur la composition de ces prix reste sans réponse: pourquoi la pente de la relation prix - éloignement du charbon est-elle plus forte que le coût effectif du transport relevé par RIBOT (1990) ? Il ne semble pas y avoir de raison à ce que le coût de la distribution dans les localités de consommation augmente avec l'éloignement des ressources. Il se pourrait donc que ce soient les exploitants forestiers dont la marge bénéficiaire (hors marges supplémentaires) augmente avec la distance parcourue par leur production. Une telle situation pourrait s'expliquer par une immobilisation plus longue de leur capital lors du transport, par le désagrément de voyages plus longs, par des pertes plus importantes sur les avances accordées aux ouvriers, en raison d'un contrôle moins facile de ces derniers... La question est importante, car si la réponse se trouvait effectivement être du côté des exploitants forestiers, les revenus supplémentaires dus aux marges supplémentaires seraient encore bien plus élevés que le chiffre estimé ci-dessus: on serait en droit d'utiliser le coefficient β de la relation prix - éloignement à la place du coût de transport de RIBOT!

Malgré cette question non-éclaircie, les modèles de formation des prix se sont déjà avérés très utiles pour expliquer, en simplifiant à l'extrême le comportement des consommateurs, les principaux phénomènes de substitution de combustibles dans l'espace: La substitution du charbon au bois a lieu dans des zones encore relativement proches des ressources ligneuses, où la cuisine au charbon devient petit à petit moins chère que celle au bois, tandis que la substitution du gaz au charbon à Dakar et dans les grandes villes proches de la capitale s'explique par une forte compétitivité du prix du gaz dans ces villes. Voilà qui nous incite à nous intéresser de plus près aux comportements des consommateurs que nous verrons au chapitre suivant.

5. LA CONSOMMATION

L'objectif de ce chapitre est de cerner l'évolution des consommations des différents combustibles domestiques dont dépendent, rappelons le, les prélèvements de combustibles qui affectent l'évolution des ressources ligneuses. L'accent est mis sur les consommations des ménages qui s'approvisionnent sur le marché des combustibles domestiques. Les principales relations analysées sont: 1) celle entre les besoins d'énergie, exprimés en termes d'énergie utile, et les caractéristiques socio-économiques des ménages; 2) celle entre le choix des équipements et son contexte, défini par les caractéristiques socio-économiques des ménages et les prix des combustibles, ces derniers étant supposés donnés. L'analyse de la deuxième relation permet de modéliser les phénomènes de substitution entre les combustibles, alors que celle de la première permet de représenter les variations des besoins dans un contexte socio-économique évolutif.

5.1 ANALYSE DE LA CONSOMMATION

La consommation de combustibles domestiques est le résultat d'un ensemble de processus de consommation qui diffèrent selon la région géographique dans laquelle ils opèrent, selon le secteur économique auquel ils se rattachent, selon la nature des consommateurs auxquels ils sont attribuables. La désagrégation de la consommation, qui fait l'objet du premier paragraphe de cette section, permet de tenir compte par la suite des spécificités des ensembles de consommateurs qui auront été isolés. Les processus de consommation domestique seront analysés au paragraphe suivant, ce qui permettra de mettre en évidence les trois phénomènes principaux dont dépendent les consommations : l'évolution des besoins, le choix des équipements et l'évolution des rendements. La situation des ménages auto-ravitailés ou s'approvisionnant sur des marchés locaux sera étudiée au paragraphe 5.1.3. Au dernier paragraphe de cette section sera présentée une formalisation de la consommation des combustibles domestiques en général qui permettra de mieux situer les objets d'étude des sections suivantes.

5.1.1 Désagrégation de la consommation

Les classes de consommateurs

L'intérêt de la distinction des zones et des classes de taille d'agglomération a déjà été mis en évidence au chapitre 2. Rappelons que non seulement les prix, qui résultent du système d'offre, et auxquels les consommateurs sont sensibles, mais aussi le comportement des consommateurs à prix constants, varient avec la zone et la taille de l'agglomération. De plus, il sera montré que le comportement des consommateurs varie avec leur standing. Cette notion sera précisée ci-dessous. On arrive alors à une désagrégation de l'ensemble des consommateurs en classes représentée à la figure 5.1.

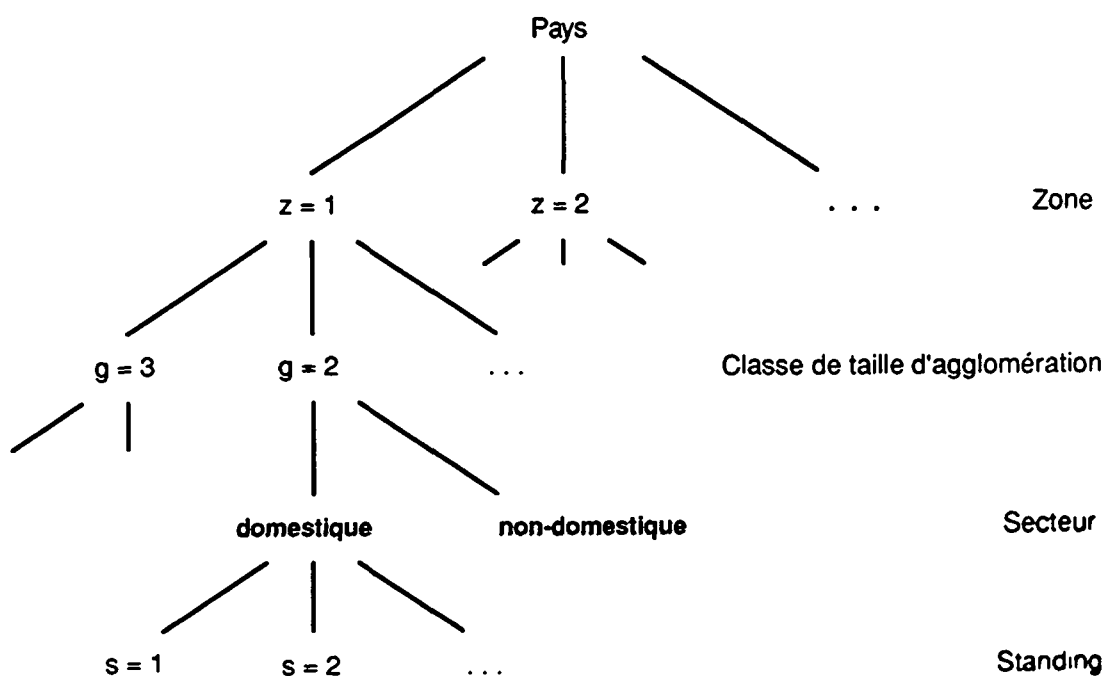


Fig. 5.1 Les classes de consommateurs

Le comportement des consommateurs varie aussi avec la taille du ménage, mais une distinction de classes de taille de ménage compliquerait sensiblement l'utilisation d'un modèle de simulation, alors que les tailles moyennes des ménages ne devraient pas varier dans des proportions considérables aux horizons considérés. Une distinction de classes de taille de ménage ne se justifie donc pas. Remarquons que les effets de l'évolution des tailles des ménages peuvent néanmoins être représentés en faisant varier les tailles moyennes par classe de consommateurs.

La figure 5.1 fait également apparaître les consommations à usages non-domestiques. Bien que relativement faibles par rapport aux consommations des ménages, ces dernières doivent être prises en compte lors de la modélisation de l'équilibre du marché. Les systèmes d'offre réagissent en effet à l'ensemble des consommations de combustibles domestiques, et non pas uniquement aux consommations des ménages. Puisqu'il n'est guère possible d'établir des liens entre les consommations à usages non-domestiques et des variables explicatives, ces consommations, exprimées en termes d'énergie distribuée, seront des variables exogènes lors de la modélisation de la consommation.

Définition du standing

La notion de standing sert à caractériser le niveau de vie d'un ménage. Elle sert à indiquer si un ménage se comporte comme un ménage de riches (standing élevé) ou comme un ménage de pauvres (standing bas). Bien qu'un ménage puisse théoriquement disposer de revenus importants et se comporter comme un ménage pauvre, les revenus d'un ménage caractérisent assez bien son standing.

Le standing est une variable explicative importante du comportement des ménages : les ménages de standing élevé auront tendance à accorder une importance moindre au prix d'un combustible et une importance accrue au confort et au prestige liés à l'utilisation d'un équipement. Les choix des équipements et la manière de les utiliser dépendront donc du standing, tout comme la nature et l'ampleur des besoins satisfaits.

Différentes caractéristiques mesurables d'un ménage seront utilisées pour définir le standing d'un ménage en milieu urbain : revenus, dépenses, facture d'électricité. En milieu rural, les résultats des enquêtes n'ont pas permis de définir de standing.

Les revenus : Il n'est pas facile de saisir les revenus d'un ménage à travers une enquête : Ils sont souvent mal connus de la personne qui répond (quel est le bénéficiaire net de la nièce qui vend des beignets ?), ils sont en partie non-monétaires (vivres ramenés du village, ...), et les questions à leur sujet peuvent éveiller des craintes chez les personnes interrogées¹. Les dépenses ménagères conviennent mieux à la modélisation du comportement des ménages.

Les dépenses : Le terme de "dépense" est familier à de nombreuses ménagères sénégalaises, sans que celles-ci parlent pour autant le français. Il signifie pour elle l'argent reçu du chef de ménage pour les dépenses quotidiennes. Ce sont ces dépenses-là qui étaient visées par les

¹ Lors des enquêtes MASENS de 1989 à 1991, la classe de revenu du chef de ménage a été demandée. L'information demandée au sujet des revenus a ainsi été allégée par l'agrégation en classes. Néanmoins, la proportion des ménages n'ayant pas répondu est restée souvent assez grande (jusqu'à 50 % !).

questions sur les dépenses ménagères dans les questionnaires des enquêtes MASENS (1990 et 1991) et de la Banque mondiale (1987)².

La facture d'électricité : La facture d'électricité est un bon indicateur du standing pour les ménages disposant de l'électricité. Elle prendra la place des dépenses lors de l'exploitation de l'enquête MASENS menée à Dakar en 1989, lors de laquelle les questions sur les dépenses n'ont pas été posées.

Revenus par tête et revenus par ménage

Revenus, dépenses et facture d'électricité d'un ménage pourraient être divisés par la taille du ménage. On pourrait croire à priori que des valeurs "par tête" soient plus représentatives du standing que des valeurs "par ménage". Toutefois, l'utilisation de valeurs par ménage, qui permet de conserver la taille du ménage comme variable explicative indépendante, a permis de mieux expliquer les variations des consommations d'énergie³.

Les liens entre les variables caractérisant le standing

Plusieurs variables sont donc disponibles pour caractériser le standing :

- les dépenses ménagères pour un mois, en 1987
- les dépenses ménagères pour un mois, en 1990 et en 1991
- la facture bimestrielle d'électricité de 1987
- la facture bimestrielle d'électricité de 1989.

La variable "Dépenses" qui sera généralement utilisée ci-dessous pour caractériser le standing, désignera les dépenses ménagères mensuelles en francs 1987. Des relations ont pu être établies entre les différentes variables-standing, sur la base des caractéristiques de leurs distributions, de sorte que la valeur de l'une peut être "convertie" en valeur de l'autre. Le tableau 5.1 donne, à titre d'illustration, les seuils correspondants pour les différentes variables-standing utilisés pour séparer les classes de standing (ou, plus simplement, "les standings") lors des

² Les achats de recharges de gaz ne sont en général pas couverts par ces "dépenses", alors que les achats quotidiens de charbon le sont. Nous considérerons par la suite que nous avons affaire à des dépenses corrigées, comprenant les achats de combustibles.

³ Remarquons que la taille du ménage sera par la suite abandonnée en tant que variable explicative de certains déterminants majeurs de la consommation (les parts des combustibles dans la satisfaction des besoins en énergie utile), pour lesquels elle n'explique qu'une faible part de la variance (cf. § 5.3.2).

simulations. Les seuils sur la variable Dépenses 87 ont été déterminés à l'aide d'une méthode de classification⁴.

Variable-standing	Standing 1	Standing 2	Standing 3	Standing 4
	Seuil 1	Seuil 2	Seuil 3	
Dépenses 87	25 000	50 000	100 000	
Dépenses 90	24 739	49 479	98 958	
FactEl 87	7 653	15 306	30 612	
FactEl 89	5 102	10 204	20 408	

Tableau 5.1 Les seuils délimitant les standings [F / mén.mois]

L'évolution démographique et socio-économique

Représentation de l'évolution

Chaque classe de ménages possède un comportement propre en matière de consommations énergétiques, dont dépendent ses quantités consommées. Cependant, quel que soit ce comportement (nous l'analyserons dans les paragraphes suivants), les quantités consommées évolueront avec les caractéristiques de la classe de ménages considérée : nombre de ménages, valeur moyenne de la variable-standing, taille moyenne des ménages. La représentation de l'évolution démographique et socio-économique constitue de ce fait un élément important de la modélisation de la consommation.

Deux options fondamentales s'offrent pour la représentation de l'évolution des classes de ménages :

- (a) modifier les effectifs des classes (ce qui s'impose lorsque les classes sont définies par des seuils fixes sur certaines variables caractérisant les ménages)
- (b) modifier les caractéristiques des classes (chaque classe est alors généralement assimilée à un ensemble de ménages donné).

⁴ L'établissement des relations entre les différentes variables, le choix des seuils et la justification de l'utilisation de seuils nationaux figurent dans une note non-publiée de l'auteur : "Projet MASENS, la délimitation du standing", LASSEN, EPFL, Décembre 1991

Lorsqu'il y a évolution démographique, les effectifs des classes varient nécessairement⁵, et il ne peut pas y avoir, au sens strict, d'association d'un ensemble de ménages à une classe. D'un autre côté, modifier les caractéristiques des classes est une démarche très facilement mise en oeuvre : il suffit par exemple de multiplier les moyennes des variables-standing de toutes les classes par une même valeur pour représenter une augmentation des revenus à structure socio-économique inchangée. Les deux options (a) et (b) se complètent donc mutuellement et devraient être utilisées simultanément pour obtenir l'évolution voulue.

Au Sénégal, l'évolution socio-économique future peut certes faire l'objet de scénarios relativement contrastés. Cependant, certaines tendances lourdes de la démographie et certaines relations entre les variables démographiques et socio-économiques devraient persister dans les années à venir. Examinons-les de plus près.

L'urbanisation rapide

L'évolution démographique du Sénégal se caractérise globalement par un taux de croissance démographique très élevé: près de 3% par an. Ce taux reflète essentiellement une fécondité élevée (taux de fécondité générale proche de 7), la mortalité n'étant pas particulièrement basse (espérance de vie: moins de 50 ans - d'après DAT et Nations Unies, 1989).

Au niveau des classes de taille d'agglomération par zone, la croissance de la population est fortement influencée par les migrations dans le sens campagnes - villes. Ainsi, la plupart des grandes villes connaissent des taux d'accroissement annuels entre 4 et 6%. La population de l'agglomération de Dakar passe de 1,4 millions en 1988 à 5,4 millions en 2021 (!) dans le scénario tendanciel de "l'Esquisse Finalisée du Plan National d'Aménagement du Territoire" (DAT et Nations Unies, 1989). Dans le scénario "équilibré" le chiffre pour 2021 passe à "seulement" 4,3 millions.

Tailles de ménage et évolution démographique

Les tailles de ménage utilisées dans le cadre de ce travail sont des données recueillies lors d'enquêtes auprès des consommateurs⁶. La comparaison des tailles moyennes obtenues pour

⁵ A moins, bien entendu, de créer de nouvelles classes pour les ménages nouveaux.

⁶ Question posée (enquêtes MASENS) : "Combien de personnes mangent en général chez vous chaque jour (à midi)?" Le nombre de personnes était en général le même à midi, le soir, et pour le petit déjeuner. Le nombre moyen de personnes avait toutefois tendance à être légèrement inférieur pour le petit déjeuner.

Dakar lors de différentes enquêtes semble indiquer une tendance à la hausse :

1983	ENDA (THIAM, 1984):	7,6
1987	Banque Mondiale (1987):	9,7
1989	MASENS:	10,3

Toutefois, quelques réserves doivent être émises vis-à-vis de cette comparaison: l'échantillon n'a pas été tiré selon les mêmes règles lors de ces trois enquêtes; les enquêteurs et les questionnaires étaient différents.

En supposant qu'il y ait eu une réelle baisse des tailles de ménage à Dakar, celle-ci pourrait s'expliquer par le phénomène d'urbanisation: les ménages installés à Dakar accueillent en leur sein de nouveaux arrivants, membres de la famille (au sens large) ou venant du même village. Il existe donc très probablement un lien entre l'évolution des tailles de ménage et les migrations.

L'évolution des tailles de ménage est en outre liée à l'accroissement naturel de la population: si la natalité baissait, le nombre d'enfants par femme baisserait, entraînant une tendance à la baisse des tailles de ménage. Bien que des mécanismes compensatoires (par exemple: enfants quittant le ménage de leurs parents à un âge plus élevé) pourraient stabiliser les tailles de ménage, rien ne permet a priori de penser que tailles de ménage et évolution démographique soient indépendants.

Les interrelations entre les variables démographiques et socio-économiques

Comme nous venons de le voir, l'évolution des tailles de ménage est liée à l'évolution démographique. D'autres interrelations existent dans l'ensemble des variables démographiques et socio-économiques: par exemple, les revenus par ménage devraient baisser lorsque les tailles de ménage baissent.

L'étude de ces relations n'a pas été un des objectifs principaux de cette thèse. Par ailleurs, il serait difficile d'établir des relations quantitatives significatives à partir des données disponibles. Nous nous limiterons par conséquent à remarquer que ces relations existent, sans les modéliser. Il s'en suit qu'un certain effort est demandé à l'utilisateur du modèle pour éviter que certains scénarios ne manquent de réalisme. Par exemple, une forte baisse du taux d'accroissement démographique ne devrait pas s'accompagner d'une augmentation de la taille des ménages⁷. Des recherches approfondies dans ce domaine pourraient par ailleurs permettre une extension future de la modélisation.

⁷ Le logiciel mis au point parallèlement à cette thèse est couplé à un système expert ("MAGES" = Méthode d'Aide à la Génération de Scénarios) qui permet de garantir le respect de telle règles lors de la génération des scénarios (cf. document [14]).

L'effet de l'absence de certaines variables dans le modèle

La représentation de l'évolution démographique et socio-économique, telle qu'elle a été décrite ci-dessus, masque les déterminants de cette évolution: en représentant le comportement d'une classe de consommateurs, nous faisons appel aux caractéristiques de cette classe, mais nous négligeons les facteurs qui sont à la base de ces caractéristiques. Par exemple, nous utiliserons l'effectif d'une classe pour évaluer la consommation totale d'une classe à partir d'une consommation moyenne par ménage, sans représenter l'influence des migrations (l'un des déterminants de l'effectif) sur la consommation moyenne. Or, les migrations font croître dans certaines villes la part des personnes venues d'ailleurs, ayant d'autres habitudes alimentaires, d'autres habitudes en matière de cuisine.

L'absence de certaines variables explicatives implique donc que la représentation obtenue par le modèle ne sera satisfaisante que pour autant que ces variables ne se modifient pas trop (dans le cas d'un modèle statique) ou conservent la tendance qu'elles présentaient au cours de la période qui a servi de base à l'estimation des paramètres (dans le cas d'un modèle dynamique). Heureusement, les variables démographiques présentent généralement des tendances "lourdes": leurs tendances ne se modifient profondément qu'à très long terme.

5.1.2 La consommation domestique

Le processus complexe de la consommation domestique

La figure 5.2 représente un essai de décomposition du processus de consommation de combustibles domestiques d'un ménage. Les consommations des différents combustibles, qui constituent l'énergie distribuée du ménage, résultent de la satisfaction de besoins d'énergie utile pour différents usages, de choix d'équipements et de l'adoption de certains modes d'utilisation pour les équipements. Besoins en énergie utile, choix des équipements et modes d'utilisation dépendent à leur tour du revenu du ménage, de la taille du ménage, des prix des combustibles, etc.

Faute de données à leur sujet, les relations entre les différents facteurs qui influencent les consommations d'un ménage ne peuvent cependant pas être modélisées de la façon dont elles sont représentées sur la figure 5.2. La plus importante simplification consiste certainement en l'agrégation des usages.

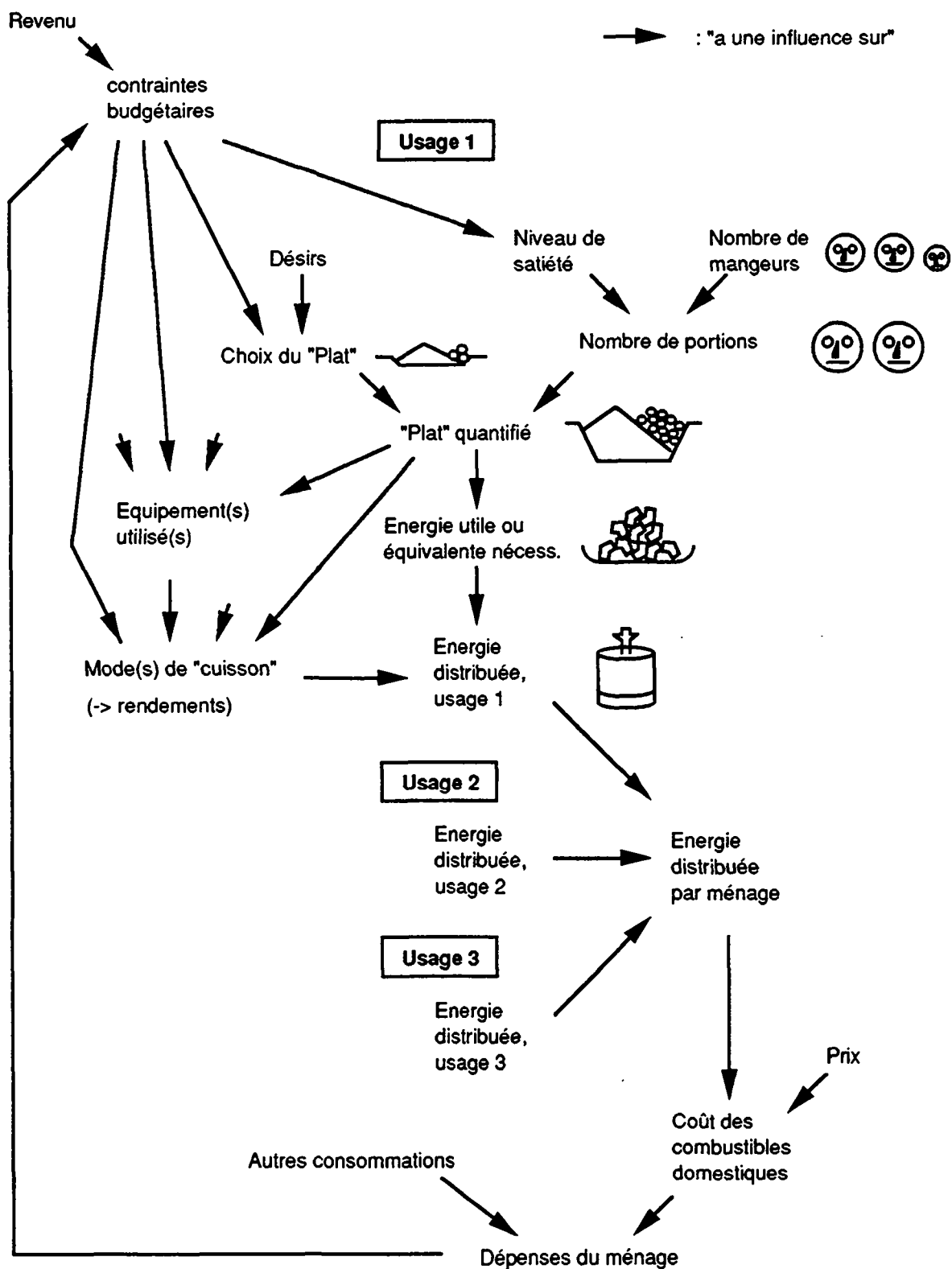


Fig. 5.2 Analyse de la consommation domestique

Les usages et leur agrégation

Les enquêtes auprès des consommateurs (Banque Mondiale, 1987 et MASENS, 1989 à 1991) ont clairement montré que les combustibles choisis par les ménages varient selon les usages. Ainsi, les foyers à gaz, dont le feu est vite allumé, sont beaucoup utilisés pour le petit déjeuner parce que les gens n'ont souvent que peu de temps le matin. Ainsi, le thé traditionnel est généralement préparé avec du charbon de bois...

Cependant, les enquêtes n'ont pas permis de savoir quelle quantité d'énergie est consommée pour chaque usage. Les questions posées aux ménagères n'ont permis d'évaluer que la quantité totale consommée par combustible tous usages confondus. C'est pourquoi les usages ne seront pas distingués dans la suite de cette étude, en particulier lors de la modélisation de la consommation.

Signalons en outre que les consommations saisies par enquête ne concernent que les usages courants :

- préparation des plats principaux (midi et soir)
- préparation du petit déjeuner
- préparation du thé
- repassage⁸.

Certains usages sont saisonniers ou occasionnels :

- chauffage
- chauffage de l'eau sanitaire
- cérémonies familiales, religieuses, ...

Pour tenir compte du chauffage et du chauffage de l'eau sanitaire, les consommations d'énergie utile pour les usages courants seront majorées⁹. Les consommations pour les autres usages non courants ne sont pas connues avec précision. Les quantités en jeu sont cependant très petites en comparaison avec les consommations pour les usages courants (cf. § 2.1.1), elles seront donc considérées négligeables.

⁸ Au Sénégal, le repassage se fait habituellement au charbon de bois, avec des fers spéciaux que l'on remplit de braises. Ces mêmes fers sont parfois chauffés au gaz.

⁹ D'après le Corps de la Paix (1982), les consommations augmentent de 10 à 20 % en saison froide. Le chiffre de +15 % x (4 mois/12 mois) = +5 % a été utilisé lors des simulations.

Les équipements, les technologies et les combustibles

Pour la satisfaction de leurs besoins, les ménages choisissent d'utiliser certains équipements avec certains combustibles¹⁰. Ils adoptent en outre un mode d'utilisation de l'équipement. L'ensemble - équipement, combustible, mode d'utilisation - est appelé ici une "technologie". Une modélisation détaillée du processus de consommation devrait rendre compte des choix des technologies. Cependant, de la même façon dont les consommations saisies par enquête étaient agrégées selon les usages, elles le sont aussi, d'une certaine façon, selon les technologies. La solution consiste ici à ne modéliser qu'un choix parmi des groupes d'équipements pour lesquels les consommations peuvent être évaluées. Le choix qui sera modélisé par la suite portera sur les groupes d'équipements suivants:

- foyers à bois
- foyers à charbon
- foyers à gaz populaire (Blip Banekh et Nopalé)
- foyers à gaz traditionnel (12,5 kg).

Chaque groupe comprend des équipements de différents types dont les performances peuvent être voisines (groupe des foyers à gaz) ou au contraire assez différentes (foyers traditionnels et foyers améliorés dans les cas des groupes de foyers à bois et à charbon). Par ailleurs, un même équipement peut consommer plus ou moins d'énergie pour la satisfaction d'un même besoin, selon le mode d'utilisation. Le rendement moyen d'un groupe d'équipement est donc différent d'une classe de consommateurs à l'autre et varie dans le temps.

Remarquons que les groupes d'équipements définis ci-dessus correspondent chacun à un combustible, à condition de considérer que gaz populaire et gaz traditionnel sont deux combustibles distincts. Pour simplifier, nous parlerons de "choix de combustibles" pour désigner un choix de groupe d'équipements.

Les consommations de pétrole pour l'allumage des foyers constituent une exception à la règle "un combustible - un foyer". Cependant, ces consommations seront négligées, car elles sont très faibles¹¹.

Les équipements à sources d'énergie "du futur" (kérosène, tourbe, solaire, cf. § 4.2.3) ne figurent pas parmi les groupes énumérés ci-dessus : le choix de ces équipements ne pouvant

¹⁰ On peut imaginer qu'un même foyer puisse être utilisé avec deux combustibles différents, bien que ce ne soit généralement pas le cas.

¹¹ En énergie distribuée, la consommation domestique de pétrole représentait en 1986 moins de 1% de la consommation totale d'énergie domestique au Sénégal. Et le pétrole consommé sert principalement à l'éclairage. (Banque Mondiale, 1989)

pas être observé actuellement, les parts de ces équipements dans la satisfaction des besoins d'énergie utile seront des variables exogènes.

Aperçu général de la modélisation

Les réflexions faites ci-dessus nous amènent à distinguer trois phénomènes principaux lors de la modélisation de la consommation domestique : l'évolution des besoins, le choix des équipements et l'évolution des rendements. Ils sont représentés à la figure 5.3 avec les variables explicatives et les variables qui en dépendent.

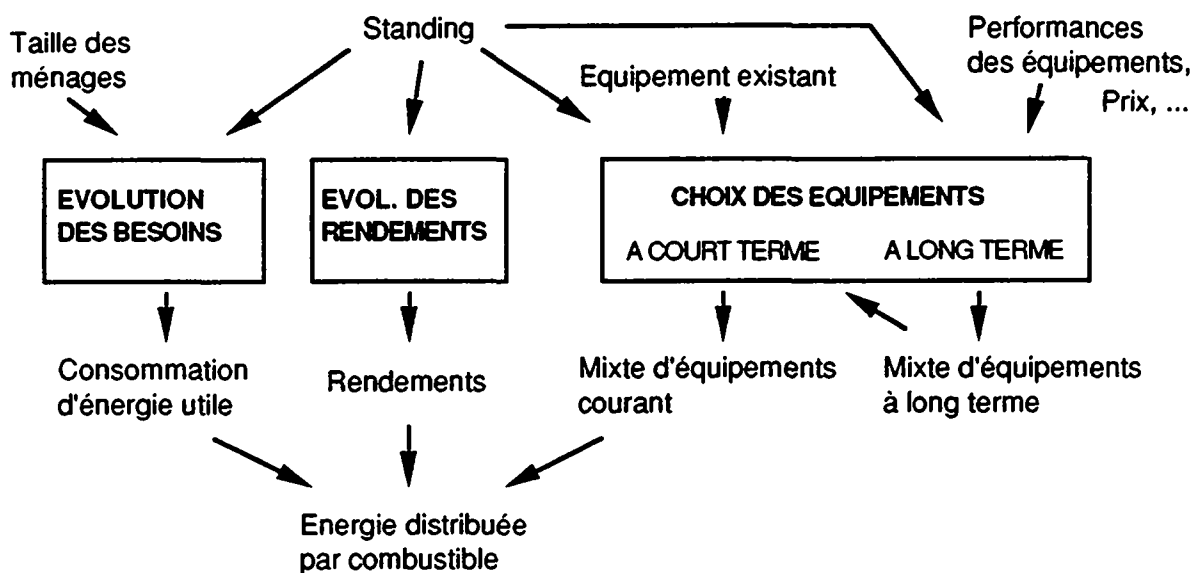


Fig. 5.3 Consommation domestique : schéma d'ensemble de la modélisation

L'évolution des besoins

Les besoins d'énergie d'un ménage peuvent se mesurer en énergie utile. Cette notion sera précisée à la section 5.2 où seront étudiées les variations de l'énergie utile avec la taille du ménage et le standing.

L'évolution des rendements

L'évolution des rendements traduit à la fois l'évolution des parts des types d'équipement à l'intérieur d'un groupe d'équipements et les changements de mode d'utilisation des équipements.

Le choix des équipements

Les choix d'équipements par les consommateurs d'énergie sont généralement des phénomènes dynamiques : A variables explicatives constantes, la part d'un équipement dans la satisfaction des besoins d'énergie utile d'un groupe de ménages tend vers une part d'équilibre à long terme. Il est commode de modéliser d'une part la formation des parts d'équilibre à long terme qui ne dépendent que des valeurs des variables explicatives pour l'année considérée et d'autre part le rapprochement au cours du temps des parts de leurs valeurs d'équilibre à long terme. Cette décomposition de la modélisation des choix a été représentée sur la figure 5.3.

En traitant séparément l'évolution des besoins et le choix des équipements, on fait implicitement l'hypothèse que l'un est indépendant de l'autre. Le bien-fondé de cette hypothèse controversée fera l'objet d'une discussion dans la section 5.2.

5.1.3 L'auto-ravitaillement et les marchés locaux

Spécificités de l'auto-ravitaillement et des marchés locaux

Les ménages qui s'auto-ravitailent en combustibles ligneux et ceux qui s'approvisionnent sur les marchés locaux (§ 4.1.4) méritent un traitement particulier, lors de la modélisation de la consommation, pour deux raisons :

- (i) L'accès aux ressources ligneuses est beaucoup plus aisé pour ceux qui s'auto-ravitailent ou ravitaillent des marchés locaux que pour ceux qui ravitaillent le marché interconnecté. Les premiers échappent quasiment à tout contrôle des agents de l'Etat. La nécessité de distinguer entre les prélèvements correspondants, au niveau de la modélisation de la dynamique des ressources ligneuses, a déjà été soulignée (paragraphe 3.3.3).
- (ii) La modélisation des processus de consommation pour les ménages auto-ravitailés et les ménages des marchés locaux ne pourra pas atteindre le même degré de complexité que pour les ménages du marché interconnecté :
 - parce que les prix des combustibles ligneux n'existent pas ou alors échappent à notre connaissance,
 - et parce que les enquêtes en milieu rural n'ont pas permis de distinguer des standings¹².

¹² Les indications données par les ménages sur leurs revenus sont fantaisistes, à moins qu'il n'y ait eu des erreurs lors du codage et de la saisie des réponses: elles varient dans des proportions de 1 à 20 dans un même village, pour des ménages de taille comparables

De l'auto-ravitaillement à l'achat

Alors que l'auto-ravitaillement est la règle en milieu rural, il cède rapidement la place à l'achat au fur et à mesure que la taille des agglomérations augmente. Dans les localités de plus de 5000 habitants il ne concerne en général plus que des minorités : dans la plupart des villes des enquêtes MASENS, la part des ménages se procurant du bois par auto-ravitaillement se situe aux alentours de 15 %.

Le passage de l'auto-ravitaillement à l'achat est lié d'une part à la raréfaction du bois disponible pour l'auto-ravitaillement, d'autre part à la disponibilité de revenus monétaires permettant l'achat. Il n'est pas étonnant que le taux de ménages auto-ravitailés à Kedougou, à l'extrême Sud-Est du pays¹³ (37 %) soit le plus élevé détecté lors des enquêtes urbaines MASENS.

L'influence de la distance à parcourir

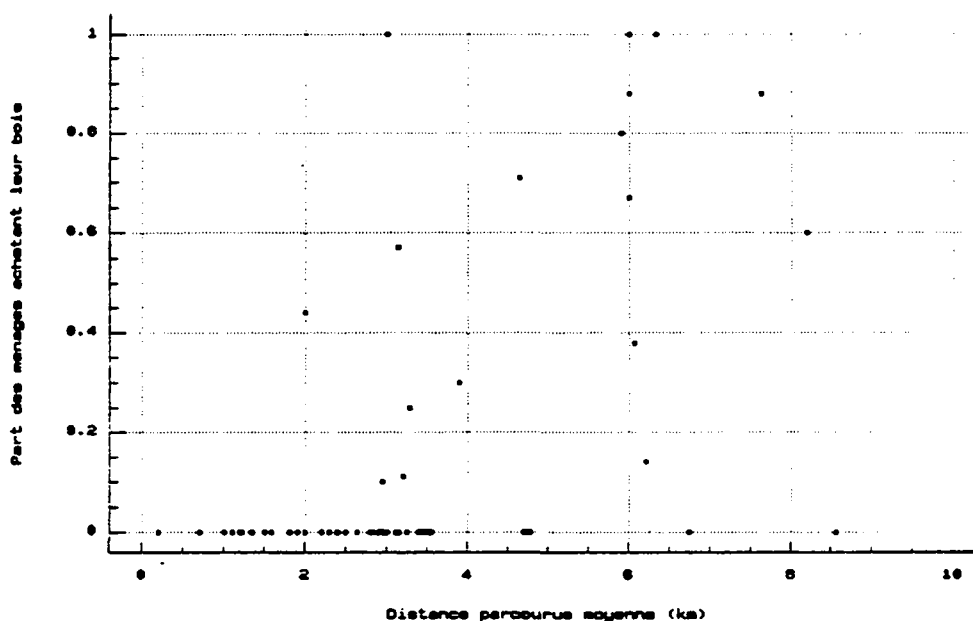


Fig. 5.4 Part des ménages achetant leur bois en fonction de la distance parcourue (Enquête rurale MASENS)

La raréfaction du bois entraîne avec elle l'augmentation des distances que doivent parcourir les villageois pour s'auto-ravitailer, et l'augmentation du temps nécessaire à la collecte du bois. Elle fait donc croître l'attrait de l'achat auprès de personnes qui se spécialisent dans la recherche et le transport du bois. A la figure 5.4, la part des ménages achetant leur bois est représentée, par village, en fonction de la distance moyenne parcourue par les ménages auto-ravitailés.

¹³ Région très boisée et relativement isolée.

A une exception près, l'achat de bois ne fait son apparition qu'à partir d'une distance de 3 km. Par contre, dès 5 km déjà, l'achat supplante l'auto-ravitaillement dans la plupart des villages.

Ces constatations se laissent cependant difficilement exploiter à des fins de modélisation, étant donné que la distance parcourue dépend elle-même d'une multitude de conditions locales qu'il serait difficile de formaliser : comment la distance parcourue croît-elle avec les prélèvements ? à quelle distance commencent les forêts exploitées par le village suivant ? etc.

L'influence du revenu

Le montant des dépenses ménagères mensuelles peut servir d'indicateur de la disponibilité de revenus monétaires pour l'achat de bois. Bien que les dépenses mensuelles se soient généralement avérées plus élevées chez les ménages achetant leurs combustibles, les résultats des enquêtes MASENS ne permettent pas de dégager de relations quantitatives. Les résultats pour le grand village de Malem-Hodar illustrent cette situation :

	Nombre de ménages	Moyenne des dépenses	Ecart-type
Auto-ravitaillement	43	23 640	24 459
Achat	56	25 714	20 460

En raison de la forte variance des dépenses de chaque groupe, l'écart entre les moyennes des dépenses n'est même pas significatif (les dépenses sont en F/mén.mois). L'impossibilité de mettre en évidence des relations quantitatives entre la propagation de l'achat et les dépenses ménagères est certainement imputable en premier lieu à la mauvaise qualité des informations obtenues sur les dépenses¹⁴.

Les limites du marché interconnecté

Il n'est pas gênant de ne pouvoir modéliser le passage de l'auto-ravitaillement à l'achat. Du moins, pas dans le cas du milieu rural, où l'on peut supposer que l'achat se fait sur des marchés locaux. Puisque l'on peut se passer de distinguer les prélèvements pour marchés locaux de ceux pour auto-ravitaillement lors de la modélisation de la dynamique des ressources ligneuses, il n'y a pas lieu de pouvoir distinguer les quantités imputables à chacun des deux modes de ravitaillement.

En revanche, en milieu urbain, le manque de connaissances sur l'évolution des limites entre auto-ravitaillement et marchés locaux d'une part et marché interconnecté d'autre part, est déjà

¹⁴ Jacques ROYER aurait pu observer en revanche une nette corrélation entre le revenu et l'achat de bois sur les marchés ruraux au Sénégal (Communication personnelle du Professeur J. Royer, Genève).

plus gênant. L'évolution de ces limites devra faire l'objet de scénarios. Rappelons que, d'après les conclusions du paragraphe 4.1.4, on peut considérer que les petites villes des zones 5 et 6 sont les seules qui possèdent actuellement des marchés locaux.

La consommation des ménages ruraux

Le tableau 5.2 résume les résultats des enquêtes MASENS en milieu rural concernant les consommations énergétiques.

Zone	TMen	n	EnUt (s)	Parts des combustibles					
				Bois (BAS)	Char	GPop	GTra	Déchets	
1	13.67	10	1.162 (0.816)	0.46 (0.20)	0.16	0.32	0.07	0.00	
2	12.34	13	0.872 (0.396)	0.69 (0.03)	0.18	0.13	0.00	0.00	
3	10.75	69	1.293 (0.775)	0.89 (0.10)	0.06	0.04	0.00	0.01	
4	12.49	22	0.776 (0.175)	0.97 (0.30)	0.00	0.01	0.00	0.01	
5	13.32	39	1.962 (0.700)	0.99 (0.05)	0.01	0.00	0.00	0.00	
6	16.19	34	1.423 (0.518)	0.97 (0.03)	0.01	0.02	0.00	0.00	
7	11.95	25	1.004 (0.575)	0.85 (0.00)	0.10	0.05	0.00	0.00	
8	10.90	51	1.312 (0.787)	0.93 (0.10)	0.04	0.02	0.00	0.00	
9	16.38	21	0.302 (0.066)	0.94 (0.00)	0.06	0.00	0.00	0.00	
10	17.41	29	1.444 (0.886)	0.99 (0.23)	0.00	0.01	0.00	0.00	
11	9.67	30	1.045 (0.210)	0.99 (0.17)	0.00	0.01	0.00	0.00	
12	8.48	40	0.906 (0.283)	0.99 (0.08)	0.00	0.01	0.00	0.00	
13	11.08	41	1.024 (0.323)	0.98 (0.06)	0.01	0.01	0.00	0.00	
14	9.59	37	1.951 (0.545)	1.00 (0.00)	0.00	0.00	0.00	0.00	
15	14.97	12	4.627 (2.383)	0.91 (0.00)	0.09	0.00	0.00	0.00	
16	12.43	23	3.331 (1.630)	0.99 (0.00)	0.01	0.00	0.00	0.00	

TMen : taille moyenne des ménages n: nombre d'enquêtes
 EnUt : rapport de la consommation d'énergie utile à la moyenne nationale
 s : écart-type de l'estimation de EnUt
 BAS : part des ménages utilisant des foyers améliorés Ban ak Suuf

Tableau 5.2 Principaux résultats des enquêtes MASENS en milieu rural

(Explications dans le texte. D'après des mesures de poids de bois, des réponses quantitatives pour le gaz et des réponses qualitatives sur l'usage des autres combustibles.)

L'énergie utile

L'énergie utile est une mesure de la consommation globale d'énergie d'un ménage (cf. § 5.2.2). La colonne "EnUt" donne le coefficient k_{zg} d'un modèle donnant l'énergie utile annuelle moyenne $EnUt_{zg}$ de la zone z en fonction de la taille moyenne des ménages ("TMen"), le tout s'appliquant au milieu rural (indice g)¹⁵:

¹⁵ k_{zg} a été estimé par la méthode des moindres carrés (distributions des ϵ supposées normales, indépendantes et identiques).

$$\text{EnUt}_{zg} = k_{zg} (4110 + 176 \text{TMen}_{zg}) + \epsilon$$

Les coefficients 4110 et 176 sont dérivés des valeurs des paramètres du modèle qui sera présenté au paragraphe 5.2.2 pour le milieu urbain. Cette démarche permet de tenir compte de l'influence de la taille des ménages sur la consommation d'énergie utile sans avoir à estimer des coefficients spécifiques au milieu rural, ce qui aurait été délicat, en raison de la faible taille des échantillons ruraux. L'influence de la taille du ménage est ainsi supposée être la même qu'en milieu urbain.

Un coefficient k_{zg} de 1 signifie que la consommation d'énergie utile est égale à la moyenne nationale urbaine. "n" est le nombre de mesures (= nombre d'enquêtes) ayant servi au calcul de k_{zg} et "s" est l'écart-type estimé du coefficient (interprétation ci-dessous).

Dans l'ensemble, la consommation d'énergie en milieu rural se révèle légèrement supérieure à la moyenne urbaine. En examinant ses variations dans l'espace, on peut vérifier avec satisfaction que les consommations les plus faibles se trouvent dans le Nord déboisé du Bassin Arachidier et du Ferlo, alors que les consommations les plus fortes se situent dans les régions les plus densément boisées de Casamance (zones 14, 15, 16). Cependant, les chiffres des zones 9, 15 et 16 sont peu crédibles en raison de leur caractère extrême et des forts écarts par rapport à ceux des zones voisines¹⁶. Par ailleurs, les écart-types sont souvent "grands" dans un sens statistique. Si, en général, les intervalles de confiance à 90% ne s'étendent pas au-delà de $k_{zg} \pm 0,2$ (ce qui est déjà beaucoup), ils s'étendent pour les zones 1, 15 et 16 à $k_{zg} \pm 0,426$, $0,688$ et $0,340$ respectivement. Pour de nombreuses zones, il n'est pas possible de rejeter l'hypothèse nulle " $k_{zg} = 1$ "¹⁷.

Le bois, combustible prédominant

Dans la grande majorité des zones, le bois couvre plus de 80 % des besoins en énergie des ménages ruraux. Cette prédominance du bois a toutes les chances de se maintenir au cours des prochaines décennies. Seules les zones 1 et 2, les plus proches de la ville de Dakar connaissent des parts de bois nettement inférieures. Proximité de la capitale et carence en ressources ligneuses aidant, les combustibles "urbains" charbon et gaz sont assez bien représentés dans ces deux zones.

¹⁶ Les consommations de bois de ces zones seront remplacées, lors des simulations, par celles des zones voisines, les zones 4, 14 et 14 respectivement.

¹⁷ Les parts moyennes des combustibles sont certainement aussi des estimations médiocres en raison de la faible taille des échantillons.

L'utilisation des foyers améliorés Ban ak Suuf

Dans de nombreuses zones, la part des consommateurs de bois utilisant des foyers améliorés du type Ban ak Suuf (colonne "BAS") est loin d'être négligeable. Ces foyers améliorés conduisent à des économies de bois notables. En 1981, une enquête de terrain permettait au CERER d'estimer à 26 % les économies de bois réalisées grâce à l'emploi des Ban ak Suuf de première génération (CERER, 1982). En 1982, le Corps de la Paix américain constatait des économies de l'ordre de 50 % immédiatement après la mise en service des nouvelles cuisinières (Corps de la Paix, 1982). Les rendements respectifs de 20 % (Ban ak Suuf) et 12 % (3-pierres traditionnels) utilisés dans le cadre de ce travail ont été obtenus sur la base de tests de cuisson comparée (§ 5.2.1). L'économie de bois correspondante (40 %) devrait être assez proche de la moyenne réalisée.

Etant donné que le programme de diffusion des foyers Ban ak Suuf a plus ou moins été mis en veilleuse, les scénarios sur les parts futures des Ban ak Suuf devront être prudents. Pour les parts initiales, les chiffres de la colonne "BAS" du tableau 5.2 peuvent donner une indication, mais le nombre de ménages visités par zone (40 en général) est beaucoup trop petit pour donner une bonne estimation de la pénétration des Ban ak Suuf par zone.

Les déchets végétaux et animaux

L'usage de tiges de mil pour l'allumage des foyers est très répandu. Rares sont en revanche les ménages qui ont affirmé utiliser régulièrement des déchets végétaux ou animaux pour la cuisson, et pas un seul ménage ne les a désigné comme combustible principal. Toutefois, les chiffres de la colonne "Déchets" (tab. 5.2) dont la détermination a dû se baser sur certaines réponses qualitatives des villageois, sous-estiment certainement les parts réelles de ces combustibles : Le Corps de la Paix (1982) révèle qu'à Ndankh Sène, à la frontière entre les zones 3 et 4, la bouse de vache représentait, en 1982, à peu près le tiers du poids total des combustibles consommés. La carence de bois de feu semblait être à l'origine de cette situation.

En conclusion, on peut donc dire que les ménages ruraux utilisent, tant que cela est possible, presque exclusivement du bois, mais que, lorsque le bois vient à manquer :

- ils consomment moins d'énergie;
- s'ils se trouvent près des grandes villes, ils commencent à acheter du charbon¹⁸ et du gaz;
- ailleurs, ils utilisent de plus en plus des déchets végétaux et animaux.

¹⁸ Mise à part la récupération de charbon dans les foyers à bois (le charbon correspondant à ici été comptabilisé en tant que bois), l'autoproduction de charbon est exceptionnelle.

5.1.4 Formalisation de la consommation

L'étude de la consommation doit permettre l'évaluation des quantités (en énergie distribuée):

Q_{zgv}^{marche} : quantités achetées par les consommateurs du marché interconnecté¹⁹, et

Q_{zgv}^{auto} : quantités consommées par les ménages auto-ravitailés ou s'approvisionnant sur les marchés locaux²⁰,

pour toutes les zones (z) et classes de taille d'agglomération (g) et pour tous les agents (ou vecteurs) énergétiques (v). L'indice t de l'année, qui devrait en principe être appliqué à toutes les variables, sera omis pour la lisibilité.

Chacune de ces quantités se compose d'une partie due aux usages domestiques de l'énergie ($Q_{\text{Dom}\dots}$) et d'une partie supplémentaire ($Q_{\text{Sup}\dots}$) due aux usages non-domestiques.

$$Q_{zgv}^{\text{marche}} = Q_{\text{Dom}^{\text{marche}}_{zgv}} + Q_{\text{Sup}^{\text{marche}}_{zgv}}$$

$$Q_{zgv}^{\text{auto}} = Q_{\text{Dom}^{\text{auto}}_{zgv}} + Q_{\text{Sup}^{\text{auto}}_{zgv}}$$

$Q_{\text{Sup}^{\text{marche}}_{zgv}}$ et $Q_{\text{Sup}^{\text{auto}}_{zgv}}$ sont des variables exogènes.

La part de la consommation domestique revenant au marché interconnecté est fixée par des variables exogènes PartMarche_{zg} , qui s'appliquent à l'énergie utile EnUt_{zgs} d'une classe de consommateurs :

$$\text{EnUt}_{zgs}^{\text{marche}} = \text{EnUt}_{zgs} \cdot \text{PartMarche}_{zg}$$

$$\text{EnUt}_{zgs}^{\text{auto}} = \text{EnUt}_{zgs} \cdot (1 - \text{PartMarche}_{zg})$$

L'énergie utile d'une classe de consommateurs, les parts des équipements (indice k) dans la production de cette énergie utile ($\text{PartEquip}\dots_{zgsk}$) et les rendements moyens $\eta_{zgs k}$ des équipements déterminent les consommations domestiques :

$$Q_{\text{Dom}^{\text{marche}}_{zgv}} = \sum_s \text{EnUt}_{zgs}^{\text{marche}} \cdot \sum_{k \in K^v} \text{PartEquip}^{\text{marche}}_{zgv} \cdot (1/\eta_{zgs k})$$

¹⁹ Ce sont les quantités y_{vj} définies au paragraphe 2.2.2 et reprises au chapitre 6.

²⁰ Les quantités Q_{zgv}^{auto} pour v autre que "bois ou "charbon" sont aussi achetées sur le marché interconnecté. Q_{marche} ne représente donc pas l'ensemble des quantités achetées sur le marché interconnecté.

$$Q_{\text{Dom}^{\text{auto}}_{zgv}} = \sum_s \text{EnUt}^{\text{auto}}_{zgs} \cdot \sum_{k \in K^v} \text{PartEquip}^{\text{auto}}_{zgv} \cdot (1/\eta_{zgsk})$$

K^v : Ensemble des équipements ou groupes d'équipements utilisant v .

L'énergie utile d'une classe de consommateurs est le produit de l'énergie utile par ménage (EnUtMen_{zgs}) et du nombre de ménages, rapport entre la population et la taille moyenne des ménages :

$$\text{EnUt}_{zgs} = (\text{Population}_{zgs} / \text{TMen}_{zgs}) \cdot \text{EnUtMen}_{zgs}$$

Population et taille des ménages sont des variables exogènes.

L'énergie utile par ménage en milieu rural et les parts des équipements des ménages ruraux (pour lesquels on peut considérer que $\text{PartMarchezg} = 0$) ont déjà été discutées ci-dessus. Elles donnent lieu à des variables exogènes, tout comme les parts des équipements en milieu urbain à marchés locaux.

Alors que la consommation d'énergie utile par ménage et les rendements en milieu urbain feront l'objet de la section 5.2, l'évolution des parts des équipements dans le marché interconnecté sera analysé à la section 5.3.

5.2 L'ENERGIE UTILE ET LES RENDEMENTS

L'objectif de l'étude de l'énergie utile qui va suivre est d'arriver à cerner l'évolution dans le temps de la consommation globale de combustibles domestiques. Logiquement, la consommation d'énergie utile d'un ménage devrait être liée à la taille du ménage et à son standing. Les enquêtes effectuées auprès des consommateurs permettent de confirmer l'existence de ces liens et de les représenter par un modèle numérique. Ainsi, il devient possible d'estimer la consommation future d'énergie utile d'un groupe de consommateurs en cas de variation des caractéristiques des ménages.

Si l'emploi de la notion d'énergie utile est pratique, sa définition n'est point aisée. C'est pourquoi quelques mots au début de cette section préciseront ce qu'il faudra entendre par "énergie utile". Ils seront suivis d'un paragraphe dédié à la conception et à l'estimation du modèle numérique énergie utile - taille du ménage - revenu. L'apparente faiblesse du modèle sera expliquée au paragraphe suivant, par l'impossibilité de saisir de façon précise les consommations lors des enquêtes. Pour amorcer la transition vers la section suivante, nous examinerons le bien-fondé de l'hypothèse selon laquelle la quantité d'énergie utile consommée par un ménage est indépendante du choix des technologies, ce qui nous amènera à conclure cette section sur une question plus générale : comment la consommation d'énergie utile peut-elle varier dans le temps, à variables explicatives constantes ?

5.2.1 De l'énergie distribuée à l'énergie utile et aux rendements

Les difficultés soulevées par la définition de l'énergie utile

L'énergie utile est généralement définie comme "l'énergie sous la forme souhaitée par le consommateur qui l'utilise" (GARDEL, 1979). Cette définition ne soulève pas trop de difficultés lorsque le consommateur souhaite effectivement disposer d'énergie sous une forme donnée (travail mécanique, par exemple). Mais qu'en est-il lorsque le consommateur désire préparer un plat de riz ? L'énergie utile est-elle la quantité de chaleur entrée dans la marmite ? Ou faut-il encore soustraire les pertes à travers les parois et le couvercle de la marmite²¹ ? Le problème de définition de l'énergie utile vient du fait que le consommateur ne cherche pas à

²¹ A la limite, l'énergie utile n'est que celle ayant servi à la transformation chimique et physique des ingrédients, plus éventuellement celle nécessaire pour porter les ingrédients à la température à laquelle le plat est servi.

disposer d'une certaine quantité d'énergie sous une certaine forme : il cherche à satisfaire des besoins, en l'occurrence d'ordre nutritionnels, et l'énergie n'est pour lui qu'un moyen.

On peut néanmoins admettre, qu'à l'intérieur des limites dans lesquelles les équipements et leurs modes d'utilisation sont susceptibles de varier, une certaine quantité de chaleur sera toujours utilisée pour la satisfaction d'un besoin donné. Cette énergie-là peut être appelée l'énergie utile. C'est le cas par exemple de l'énergie absorbée par le fond de la marmite qui est nécessaire à la montée en température des ingrédients d'un plat cuisiné, ou à l'évaporation de l'eau lors de la cuisson d'un riz à la vapeur.

Le concept d'énergie utile va de pair avec celui de rendement, rapport entre l'énergie utile et l'énergie distribuée²² nécessaire à l'obtention de l'énergie utile, avec un équipement donné. Etant donné les difficultés que soulève la définition de l'énergie utile nécessaire à la préparation d'un repas, il est courant de mesurer des rendements à travers des tests d'ébullition d'eau, à différentes puissances de foyer et à différentes températures, de déterminer un rendement moyen, et d'admettre que ce rendement moyen s'applique à la préparation des repas, ce qui permet de calculer l'énergie utile.

L'utilisation des tests de cuisson comparée

Toutefois, l'utilité principale de l'utilisation du concept d'énergie utile est de permettre la détermination des nouvelles consommations d'énergie distribuée en cas de changement d'équipement. A cette fin, il n'est pas nécessaire de connaître les valeurs effectives des rendements : seuls leurs rapports interviennent. Il est donc permis de choisir plus ou moins arbitrairement la valeur du rendement de l'un des équipements. Les rendements des autres équipements doivent en revanche être dictés par les valeurs exactes des rapport entre les rendements. Or, les rapports entre les rendements sont égaux aux rapports entre les consommations d'énergie distribuée des différents équipements.

La démarche suivante sera par conséquent adoptée pour la définition des rendements :

- 1) Estimation du rendement moyen pour un équipement de référence (le foyer traditionnel au charbon, par exemple).
- 2) Calcul des rendements des autres équipements sur la base de tests de consommation.

²² ou "énergie finale"

L'usage dominant des équipements à combustibles domestiques étant la préparation des plats principaux, un test de consommation adapté portera sur la préparation d'un plat principal standard : riz au poisson (cebu djen) ou riz à la viande (cebu yap)²³.

Les résultats de deux séries de tels tests de cuisson comparée sont présentés au tableau 5.3, aux côtés de certains chiffres de rendement.

Comb./Foyer	[1]		[2]	[3]	[4]	[5]			[6]			[7]
	Pmin	Pmax				Poids	En.dist.	η	Poids	En.dist.	η	
BOIS "3-pierres"			0,105	0,05	0,10	1890*	32,1	0,139	2806	47,7	0,119	0,12
Sakkanal						1350	23,0	0,194				0,20
CHAR. Malgache	0,257*	0,257	0,185		0,20	770*	22,3	0,20	982	28,5	0,20	0,20
Sakkanal Mono	0,517*	0,182				550	16,0	0,28	712	20,6	0,277	0,28
GAZ Blip Banekh	0,331*	0,433				290	13,3	0,335	321	14,7	0,388	0,35
Nopalé	0,180*	0,260				420	19,2	0,232	328	15,0	0,380	0,35
Cuisinière			0,45	0,65								0,40
PETROLE Zeppelin	0,197	0,287				380	16,5	0,270				0,27
Thomas Cup 20	0,248	0,359				330	14,4	0,301				0,30

- [1] Rendements à puissance minimale (Pmin) et maximale (Pmax); tests Banque Mondiale et (*) : CERER (BANQUE MONDIALE/PNUD, 1989)
- [2] Rendements moyens d'après MADON (1985); tests effectués au CERER
- [3] Rendements moyens, banque de données CARTEN (SARLOS, 1989)
- [4] Rendements moyens, données utilisées pour le Kenya par RASKIN (1986)
- [5] et [6] Résultats de tests de cuisson comparée : poids en g, énergie distribuée en MJ et rendements η sur la base de l'hypothèse η malgache = 0,20. Tests Banque Mondiale et (*) : CERER avec préparation de riz au poisson pour [5] (BANQUE MONDIALE/PNUD, 1989), et tests effectués dans le cadre du Programme FAC/ABF avec préparation de riz à la viande pour [6] (DIEME, KONE, LAURA, 1991)
- [7] Rendements retenus pour cette étude.

Tableau 5.3 Evaluation des rendements des foyers

²³ A Dakar, lors des enquêtes de la Banque Mondiale en 1987, le riz au poisson et le riz à la viande, dont les modes de préparation sont proches, ont été déclarés plats principaux par respectivement 45 % et 35 % des ménages environ (d'après les fichiers de saisie). Les résultats des tests de cuisson pour ces plats seront utilisés pour tout le Sénégal, malgré la variation des habitudes alimentaires à travers le pays (cf. ZIMMERMANN, 1983), parce que ces tests sont les seuls disponibles.

Alors qu'en 1985 MADON [2] estimait entre 15 et 22 % le rendement du foyer malgache (le foyer traditionnel au charbon, utilisé par près de 98 % des ménages cuisinant au charbon²⁴), et utilisait un chiffre moyen de 18,5 % pour ses calculs, la Banque Mondiale [1] fait état d'un rendement de 25,7 %. Le chiffre de 20 % semble par conséquent constituer un bon choix pour le rendement de cet équipement de référence, d'autant plus que ce chiffre est aussi celui retenu par RASKIN [4]. Les autres rendements retenus [7] sont en principe ceux calculés à partir des résultats des tests de cuisson comparée, qui concordent relativement bien²⁵.

La connaissance des rendements des différents équipements, qui sont ici des foyers, nous permet de calculer l'énergie utile consommée par les ménages auprès desquels des enquêtes ont été réalisées, et de procéder à l'étude des variations de cette énergie utile.

L'approche alternative en termes de "consommation de référence" et de "coefficients de substitution"

Les effets des changements d'équipement peuvent être quantifiés à partir de la consommation d'énergie distribuée d'un équipement de référence (la "consommation de référence") et les rapports entre les consommations des autres équipements et cette consommation de référence (les "coefficients de substitution"). Il est donc possible de se passer des notions de rendement et d'énergie utile. LAPILLONE (1984) préconise cette approche alternative en faisant remarquer que consommation de référence et coefficients de substitution sont des grandeurs observables - alors que l'énergie utile et les rendements ne le sont pas.

Remarquons tout d'abord que l'approche en termes de "consommation de référence" et de "coefficients de substitution" peut être interprétée comme un cas particulier de l'approche en termes "d'énergie utile" et de "rendements", dans lequel le rendement de référence est choisi égal à 1. La distinction des facteurs "énergie utile" et "rendement" permet cependant de distinguer, lors d'une simulation d'une évolution future des consommations, deux phénomènes de natures très différentes : l'évolution des rendements et l'évolution des besoins. Alors qu'une baisse de la consommation d'énergie utile dénote une réduction des besoins, une augmentation des rendements peut être le fruit d'une utilisation plus rationnelle d'un équipement donné. Il est particulièrement important de pouvoir simuler une évolution des rendements lorsque la notion d'un "équipement" englobe en fait plusieurs foyers à rendements différents en proportions variables (cf. 5.1.1).

24 D'après l'enquête MASENS

25 Notons juste que la consommation de gaz sur le foyer Nopalé de la colonne [5] semble fort peu crédible car beaucoup plus élevée que celle sur le foyer comparable Blip Banekh.

L'approche en termes "d'énergie utile" et de "rendements" semble donc bien adaptée à nos besoins, à condition d'utiliser les valeurs absolues d'énergie utile et des rendements avec prudence: il faut se rappeler que le rendement de l'équipement de référence est quelque peu arbitraire.

5.2.2 Les variations de l'énergie utile avec la taille du ménage et le standing

Formulation de la relation

Approche théorique

Quelques réflexions théoriques peuvent nous donner une idée de la structure du lien qui devrait exister entre l'énergie utile consommée par un ménage et les caractéristiques du ménage que sont sa taille et son standing.

Prenons pour commencer un ensemble de ménages de même standing mais de tailles de ménage (TMen) différentes, et imaginons-les en train de préparer un plat principal. Etant donné que l'énergie utile est égale au produit de l'énergie distribuée par le rendement, ses variations seront proportionnelles à celles de l'énergie distribuée, donc à l'ensemble des composantes sous la forme desquelles se retrouve l'énergie distribuée lors de la cuisson. En simplifiant, on peut distinguer trois composantes de l'énergie distribuée, dont les liens avec la taille du ménage s'établissent de la façon suivante :

- E_0 , les pertes d'énergie lors de l'allumage et de l'extinction d'un feu à combustibles ligneux, peuvent être admises indépendantes de la taille du ménage : $E_0 = a'$.
- E_1 , l'énergie nécessaire pour faire monter la température des ingrédients, peut être admise proportionnelle à la masse des ingrédients, donc à la taille du ménage : $E_1 = b' \cdot \text{TMen}$.
- E_2 , l'énergie nécessaire pour maintenir la température en compensant les pertes de chaleur, peut être admise proportionnelle à la surface de la marmite, donc²⁶ à $\text{TMen}^{2/3}$: $E_2 = c' \cdot \text{TMen}^{2/3}$

²⁶ La surface d'une marmite sphérique est proportionnelle au volume à la puissance $2/3$, lequel volume est proportionnel à la taille du ménage. D'où la proportionnalité entre la surface et $\text{TMen}^{2/3}$

Par conséquent, on peut s'attendre à ce que l'énergie utile par ménage (EnUtMen) varie elle aussi avec TMen et $TMen^{2/3}$, selon une loi :

$$EnUtMen = a + b \cdot TMen + c \cdot TMen^{2/3} + \varepsilon \quad a, b, c \text{ positifs.}$$

L'énergie utile augmente par conséquent avec la taille du ménage, mais moins rapidement que cette dernière, en raison de la constante et du terme $TMen^{2/3}$.

La variation de l'énergie utile avec le standing ne se laisse pas aussi facilement approcher sur le plan théorique. Si l'on peut s'attendre à ce que l'énergie utile augmente avec le standing, en revanche aucune formulation mathématique particulière de la relation ne se justifie à priori. Par souci de simplicité, et vu l'apparente indépendance entre le standing et la taille du ménage²⁷, un terme indépendant de TMen peut être ajouté au modèle ci-dessus pour traduire l'influence du standing²⁸. D'où le modèle théorique général pour l'énergie utile :

$$EnUtMen = a + b \cdot TMen + c \cdot TMen^{2/3} + d \cdot FactEl + \varepsilon$$

FactEl, la facture d'électricité, prend ici la place du standing, en vue de l'utilisation des enquêtes de 1989 à Dakar pour l'estimation des paramètres.

Résultats empiriques

Si l'approche théorique nous aide à formuler des liens possibles entre la consommation d'énergie utile et ses variables explicatives, seule la confrontation de ces modèles aux valeurs observées permet de juger de leur adéquation et de choisir finalement un modèle.

Au tableau 5.4 sont représentés les résultats de l'estimation des paramètres pour différents modèles, inspirés du modèle théorique établi ci-dessus. La somme des carrés des écarts résiduels ($\Sigma \varepsilon^2$) et le coefficient de détermination²⁹ (R^2) permettent d'apprécier la qualité de l'ajustement.

27 Coefficient de corrélation entre FactEl et TMen (Dakar 1989) : $R = 0,014$ ($R^2 = 2\%$).

28 La représentation graphique en fonction du standing des résidus du modèle définitif (faisant intervenir TMen et le standing, justification du choix ci-après), fait apparaître un nuage de points sans forme particulière. Il ne semble par conséquent pas justifié d'utiliser un modèle plus complexe qu'un modèle linéaire pour le lien entre l'énergie utile et le standing.

29 Variation relative de la somme des carrés des écarts résiduels par rapport au modèle [1], carré du coefficient de corrélation linéaire.

Modèle	$\Sigma \varepsilon^2$	R^2
[1] $EnUtMen = a + \varepsilon$	$3,685 \cdot 10^9$	0
[2] $EnUtMen = a + b \cdot TMen + \varepsilon$	$2,708 \cdot 10^9$	26,5 %
[3] $EnUtMen = a + d \cdot FactEl + \varepsilon$	$3,311 \cdot 10^9$	10,1 %
[4] $EnUtMen = a + b \cdot TMen + d \cdot FactEl + \varepsilon$	$2,491 \cdot 10^9$	32,2 %
[5] $EnUtMen = a + c \cdot TMen^{2/3} + d \cdot FactEl + \varepsilon$	$2,466 \cdot 10^9$	32,9 %
[6] $EnUtMen = a + b \cdot TMen + c \cdot TMen^{2/3} + d \cdot FactEl + \varepsilon$	$2,464 \cdot 10^9$	32,7 %

Tableau 5.4 Recherche du meilleur modèle pour l'énergie utile par ménage (EnUtMen) en fonction de la taille du ménage (TMen) et du standing (ici la facture d'électricité, FactEl).

D'après les enquêtes MASENS à Dakar en 1989

On remarque que le modèle [6], suggéré par l'approche théorique, n'apporte rien par rapport au modèle [5], qui contient un paramètre de moins.

Le modèle [4] est d'une qualité tout à fait comparable à celle du modèle [5]. Il est d'une qualité nettement supérieure aux modèles [2] et [3] qui ne font intervenir chacun qu'une seule variable explicative.

En raison de sa simplicité, nous préférons le modèle [4], linéaire en TMen, au modèle [5], non linéaire en TMen.

Bien que le coefficient de détermination du modèle [4] soit faible - nous reviendrons plus loin sur les explications possibles - les paramètres sont tous significativement différents de zéro (valeurs du t pour a, b et d : 14,4; 6,75; 13,11 avec n= 525).

Généralisation à l'ensemble du pays

Ci-dessus, nous avons montré qu'un modèle du type

$$EnUtMen = a + b \cdot TMen + c \cdot R + \varepsilon$$

avec $R = FactEl$ (si FactEl est utilisée pour caractériser le standing)

ou $R = Dépenses$ (si Dépenses est utilisée pour caractériser le standing)

semble le plus adapté à représenter le lien entre l'énergie utile et ses variables explicatives.

Au tableau 5.5 sont représentés les résultats du calage d'un tel modèle pour trois villes de différentes tailles et localisations : Dakar, Kaolack et Tambacounda.

Ville	Constante	Coefficient de		R ²
		TMen	Depenses	
Dakar	3124 (217)	217,7 (16,7)	0,0129 (0,0019)	0,324
Kaolack	3539 (173)	188,1 (17,0)	0,0169 (0,0040)	0,247
Tambacounda	4653 (216)	176,8 (23,1)	0,0234 (0,0060)	0,153

Tableau 5.5 Résultats détaillés des régressions linéaires pour trois villes.
Entre parenthèses : erreur standard. D'après les enquêtes MASENS 1989 et 1990

Bien que les coefficients de détermination soient en général assez faibles, il apparaît que les différences entre les valeurs des paramètres sont significatives.

On sait par ailleurs que les habitudes énergétiques peuvent changer d'une région géographique à une autre, d'une taille d'agglomération à une autre.

Il ne serait donc pas satisfaisant, ni au vu des résultats empiriques, ni au vu des réflexions théoriques, d'utiliser un même modèle, c'est-à-dire les mêmes coefficients pour le pays tout entier.

Le tableau 5.6 donne les coefficients obtenus en calant un modèle différent pour chaque localité dans laquelle des enquêtes ont été effectuées.

Cette façon de procéder n'est visiblement pas satisfaisante non plus, étant donné que certains paramètres ont des valeurs contraires au bon sens : c'est le cas des paramètres ayant des valeurs négatives.

Une autre raison pour laquelle la multitude de paramètres obtenus n'est point satisfaisante vient du fait que cette multitude rend difficile la conception de scénarios de l'évolution future des consommations d'énergie utile.

LOCALITE	Nombre	EnUtMoy	Cte	TMen	Dep. 87	R2
DAKAR	525	6202	3124	217.7	0.0129	0.324
GOSSAS	201	6701	4826	165.9	0.0182	0.240
GOUDIRY	143	5129	3294	185.1	0.0162	0.177
KAFFRINE	221	6610	4726	219.5	0.0043	0.151
KAOLACK	746	5867	3539	188.1	0.0169	0.247
KEDOUGOU	152	6533	5028	173.5	0.0203	0.114
TAMBA	443	6251	4653	176.8	0.0234	0.153
MALEMHOD	47	5590	1396	451.9	0.0407	0.487
BAKEL	24	7454	6208	117.4	0.0024	0.102
DIORBEL	184	5617	3801	58.3	0.0314	0.170
FATICK	143	5178	5057	135.6	-0.0395	0.081
DAGANA	80	4418	1119	174.9	0.0589	0.251
KAYAR	51	6602	3929	271.7	-0.0019	0.191
KOLDA	103	7256	5488	132.9	0.0242	0.148
LINGUERE	57	5726	3482	215.9	0.0056	0.201
LOUGA	190	5569	2671	150.0	0.0329	0.286
MARSASS	21	8857	5984	269.0	-0.0090	0.668
MATAM	74	5395	1732	296.0	0.0239	0.503
MBOUR	233	4703	2128	207.8	0.0110	0.285
NDIOUM	46	4437	2720	149.3	0.0104	0.093
NIORO	81	7350	4612	230.5	0.0199	0.198
OUSSOUYE	27	6170	395	356.2	0.0998	0.493
SAGATA	31	2709	-486	266.3	0.0328	0.749
STLOUIS	292	4296	2118	106.6	0.0263	0.258
THIES	337	5472	3197	163.3	0.0185	0.231
TIVAOUAN	139	6007	3977	187.1	0.0059	0.161
TOUBA	97	5162	3142	154.2	0.0137	0.102
ZIGUINCH	285	5184	2509	184.1	0.0204	0.252
SENEGAL	4964	5751	3783	176.7	0.00942	0.164

Tableau 5.6 Energie utile. Résultats des régressions linéaires ville par ville.

D'après enquêtes MASENS

C'est pourquoi une solution intermédiaire entre le modèle national et le modèle ville par ville semble être appropriée. Les possibilités de concevoir des modèles intermédiaires sont certes nombreuses. Le modèle suivant permet cependant de tenir compte de la spécificité de chaque localité ou de différents ensembles de localités en n'attribuant qu'un seul paramètre par localité ou ensemble de localités (loc), en dehors de trois coefficients nationaux :

$$\text{EnUtMen}_n = k_{\text{loc}} [a + b \cdot \text{TMen}_n + c \cdot \text{Depenses}_n + \varepsilon_n]$$

a, b, c, k_{loc} : paramètres

n : indice du ménage

loc : indice de la classe de localités correspondant au ménage n

Les paramètres de ce modèle peuvent être estimés par un processus itératif en faisant alterner une estimation de k_{loc} (à valeurs de a, b et c données) avec une estimation de a, b et c (à valeurs

de k_{loc} données). On peut prendre pour première estimation des k_{loc} : $k_{loc} = 1$, pour tout loc. On obtient alors les estimations de a, b et c données dans la dernière ligne du tableau 5.6 (a = 3783; b = 176,7; c = 0,00942) et ainsi de suite.

Les coefficients k_{loc} obtenus sont donnés au tableau 5.7, alors que les coefficients nationaux sont :

$$\begin{aligned} a &= 3475 \text{ [MJ/mén.}\cdot\text{an]} \\ b &= 188 \text{ [MJ/pers.}\cdot\text{an]} \\ c &= 0,0154 \text{ [MJ/(F/mois)}\cdot\text{an]} \end{aligned}$$

Les estimations de ces trois coefficients (à k_{loc} donnés) sont bonnes: les valeurs du t sont toutes très élevées³⁰.

LOCALITE	Coefficient	LOCALITE	Coefficient
DAKAR	0.996	LINGUERE	0.990
GOSSAS	1.216	LOUGA	0.955
GOUDIRY	0.958	MARSASS	1.467
KAFFRINE	1.203	MATAM	0.930
KAOLACK	1.023	MBOUR	0.787
KEDOUGOU	1.238	NDIOUM	0.774
TAMBA	1.191	NIORO	1.285
MALEMHOD	1.058	OUSSOUYE	1.124
BAKEL	1.250	SAGATA	0.490
DIOURBEL	0.978	STLOUIS	0.719
FATICK	0.909	THIES	0.935
DAGANA	0.780	TIVAOUAN	1.029
KAYAR	1.095	TOUBA	0.878
KOLDA	1.297	ZIGUINCH	0.853

Tableau 5.7 Energie utile : coefficients spécifiques aux localités

Des coefficients moyens k_{zg} par zone et classe de taille d'agglomération peuvent être déterminés à partir des coefficients k_{loc} , en vue des simulations. Celles-ci se font, rappelons-le, par standing, donc sur la base de dépenses et de tailles de ménage moyennes par classe de ménages.

³⁰ Valeurs du t pour a : 38,9; pour b : 20,8; pour c : 12,2. $R^2 = 22,9\%$ A noter que ce R^2 représente la part expliquée de la variance de $EnUtMen / k_{loc}$, et non la part expliquée de la variance totale de $EnUtMen$.

5.2.3 Le flou dans les enquêtes-consommateurs

Les coefficients de détermination de l'ordre de 30 % obtenus ci-dessus pour l'énergie utile à Dakar avec les variables explicatives TMen et FactEl sont faibles. Les deux variables explicatives ne semblent expliquer qu'une faible part des variations de l'énergie utile à travers la population. Cependant, une brève analyse de la méthode d'enquête utilisée pour évaluer les consommations d'énergie des ménages laisse présumer qu'une grande partie des variations observées soit due à la méthode d'enquête, et ne correspond pas à des variations réelles des quantités d'énergie consommées.

Des enquêtes rapides à grande échelle

La volonté de toucher un nombre relativement élevé de ménages lors des enquêtes auprès des consommateurs urbains a conduit, aussi bien lors des enquêtes MASENS que lors de différentes enquêtes précédentes, à demander aux ménagères quelles étaient les quantités de combustible qu'elles consommaient, ou quels étaient les montants régulièrement dépensés pour l'achat des combustibles. Les réponses obtenues n'ont pas été contrôlées par des mesures précises, comme des pesées de combustible, car de telles mesures auraient été à la fois difficiles et coûteuses. Pour cette raison, et pour d'autres encore, les sources d'erreur qui entachent l'évaluation des quantités d'énergie utile sont multiples.

Les sources d'erreur

Des erreurs importantes ont dû être faites lors de l'évaluation des quantités d'énergie utile pour les raisons suivantes :

- La personne qui répond aux questions lors des enquêtes ne connaît pas les quantités réellement consommées ou les montants réellement dépensés. Elle en fait des estimations.
- Cette même personne arrondit les valeurs estimées.
- Les prix réels utilisés pour calculer les quantités de bois et de charbon à partir des montants dépensés ne sont que des approximations.
- Des rendements uniformes sont utilisés pour calculer l'énergie utile à partir de l'énergie distribuée. Or, les modes d'utilisation des équipements varient d'un ménage à un autre.

Evaluation de l'effet des sources d'erreur par simulations d'enquêtes

Des simulations d'enquêtes peuvent servir à évaluer quantitativement les effets de certaines des sources d'erreur.

Supposons que l'énergie utile par ménage suive une loi (la loi "réelle") :

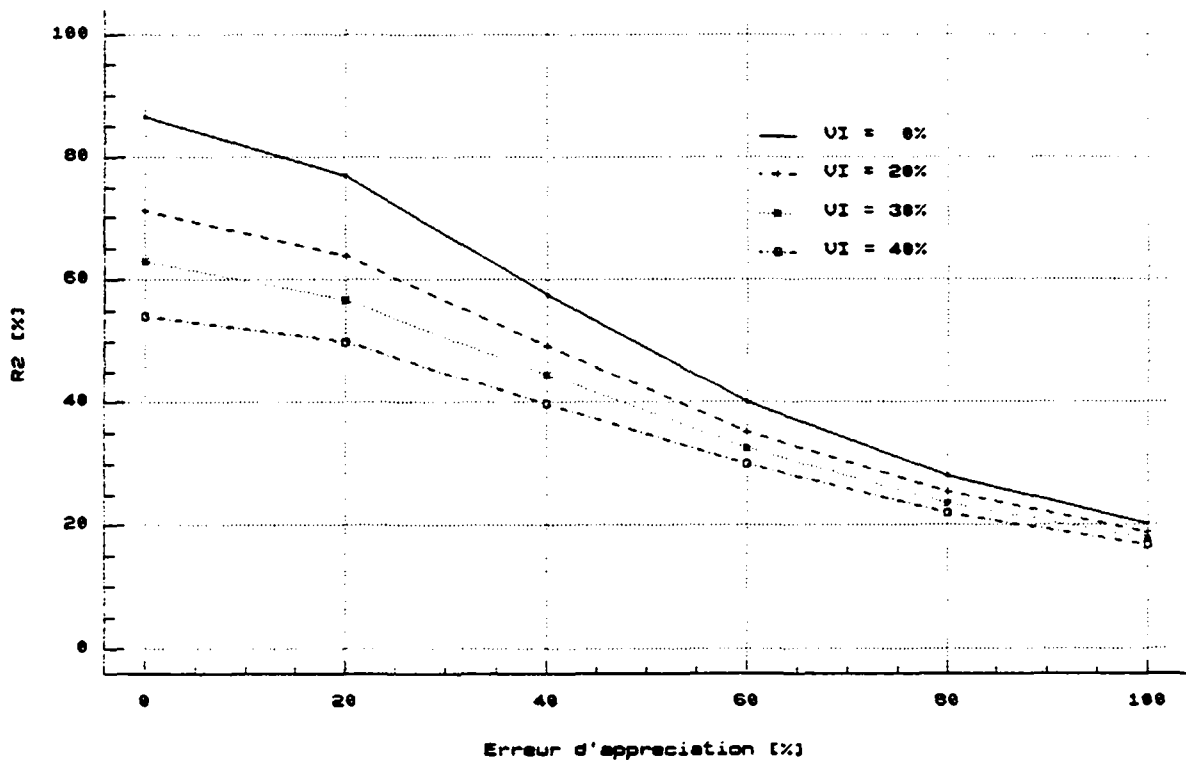
$$\text{EnUtMen} = a + b \cdot \text{TMen} + c \cdot R + \varepsilon$$

avec un coefficient de détermination assez proche de l'unité (TMen : taille du ménage, R : revenu).

Si l'énergie utile est évaluée à travers une enquête, les quantités obtenues EnUtMen^* auront une variance plus élevée, et la régression "observée"

$$\text{EnUtMen}^* = \hat{a} + \hat{b} \cdot \text{TMen}^* + \hat{c} \cdot R^* + \varepsilon^*$$

fera apparaître un coefficient de détermination plus faible même si les valeurs obtenues pour \hat{a} , \hat{b} et \hat{c} sont proches des valeurs réelles. Notons que TMen^* et R^* , obtenus par enquête, ne sont pas nécessairement égaux à TMen et R.



- "Erreur d'appréciation" (e) est l'erreur relative maximale faite par les ménagères lors de l'estimation de leurs consommations
- $r^2 = 1 - VI$ est le coefficient de détermination de la loi "réelle".

Fig. 5.5 Valeurs du coefficient de détermination (en ordonnée) obtenues pour EnUtMen^* par simulations d'enquêtes

La baisse de la valeur du coefficient de détermination peut être mise en évidence en simulant l'ensemble : enquête, exploitation de l'enquête et calcul du coefficient de détermination pour des ménages dont l'énergie utile obéirait à la loi "réelle". C'est ainsi qu'a été obtenue la figure 5.5. La méthode qui a été suivie et les paramètres sont expliqués en détail à l'Annexe 5.1.

On remarque sur cette figure qu'une valeur de 80 %, tout à fait appréciable, du coefficient de détermination de la loi "réelle" peut conduire à des coefficients "observés" de l'ordre de 30 %, comme ceux obtenus au paragraphe précédent, lorsque "l'erreur d'appréciation" e est de 70 %. Or, cette valeur de e pourrait être assez réaliste.

Même si les modèles du paragraphe précédent ne peuvent pas pour autant être qualifiés de "bons", les résultats ci-dessus montrent que des coefficients de détermination sensiblement plus élevés ne pourront guère être obtenus à partir d'enquêtes du même genre que celles dont nous disposons des résultats.

5.2.4 L'indépendance entre l'énergie utile et le choix des équipements

LAPILLONE (1984), justifiant certains choix faits au niveau du modèle MEDEE-S, écrit: "... les substitutions entre énergies, pour une classe homogène de ménages, peuvent entraîner une modification de leur comportement et donc une variation de leur consommation unitaire en énergie utile qui dépasse les différences de rendement". Si l'on pouvait montrer qu'au Sénégal les substitutions entre sources d'énergie entraînent réellement des variations des consommations d'énergie utile, il ne serait pas acceptable de modéliser de façon indépendante l'évolution des besoins et le choix des technologies. Or MADON et MATLY, constatant que les ménages utilisant du gaz comme combustible d'appoint consomment autant de charbon que ceux qui ne consomment point de gaz, conclut : "Il apparaît donc que pour cette catégorie de consommateurs - en l'occurrence la plus nombreuse - il n'y a pas substitution mais superposition de combustibles, et accès à un plus grand confort" (MADON et MATLY, 1987, p. 17). Une conclusion similaire est tirée par LAURA (1990) sur la base des résultats des enquêtes MASENS de 1989.

Pour tirer leurs conclusions sur la dynamique des consommations à partir d'observations faites à un seul moment, MADON, MATLY et LAURA ont fait l'hypothèse (I) que, avant leur accès au gaz, les ménages utilisant le gaz comme combustible d'appoint consommaient autant de charbon que ceux de la catégorie dont ils sont issus. Or, une comparaison, pour la ville de Dakar, des résultats des enquêtes de 1987 avec ceux de 1989 permet de montrer que rien n'est moins sûr, et qu'une autre hypothèse (II) est bien plus vraisemblable : ce sont principalement des ménages ayant une forte consommation d'énergie utile qui ont adopté le gaz comme combustible d'appoint.

Part	En. utile	Ecart type
Ménages utilisant des bouteilles 12kg: 0.203	8503	4517
Ménages sans bouteilles 12kg mais avec un Nopalé: 0.171	9294	4410
Ménages sans bout. 12 et 6kg mais avec un Blip: 0.292	7012	2786
Ménages n'utilisant pas le gaz: 0.333	6492	3053
Tous ménages: 1.000	7533	
Taille moyenne des ménages: 9.69		

Tableau 5.8 Parts des ménages et énergie utile [MJ/mén.an] par catégorie de ménages à Dakar en 1987. Enquêtes Banque Mondiale

Part	En. utile	Ecart type
Ménages utilisant des bouteilles 12kg: 0.141	7149	2965
Ménages sans bouteilles 12kg mais avec un Nopalé: 0.330	6590	2842
Ménages sans bout. 12 et 6kg mais avec un Blip: 0.343	5625	2799
Ménages n'utilisant pas le gaz: 0.186	5257	2239
Tous ménages: 1.000	6090	
Taille moyenne des ménages: 10.27		

Tableau 5.9 Parts des ménages et énergie utile [MJ/mén.an] par catégorie de ménages à Dakar en 1989. Enquêtes MASENS

La consommation d'énergie utile des ménages utilisant du gaz est effectivement supérieure, en 1987 comme en 1989, à celle des ménages qui ne l'utilisent pas (tableaux 5.8 et 5.9). Cependant, si l'hypothèse I était juste, la forte progression de la part des ménages utilisant un foyer Nopalé - aux dépens de la catégorie des ménages n'utilisant pas le gaz - aurait dû entraîner

une hausse de la moyenne générale, tous ménages confondus, de l'énergie utile consommée à Dakar. Or, la moyenne générale en question a baissé. Voilà qui permet de douter sérieusement de la pertinence de l'hypothèse I.

Les enquêtes auprès des consommateurs ont montré que le gaz était employé pour les mêmes usages que le charbon, soit essentiellement la préparation des repas. Or, il est peu probable que le mode d'alimentation ait changé avec l'adoption d'un nouveau combustible. Ces observations appuient l'hypothèse II.

Toutefois, l'hypothèse II ne permet pas non plus d'expliquer la baisse de la moyenne générale de la consommation d'énergie utile. Nous reviendrons sur cette question au paragraphe suivant. Pour l'instant, nous admettons que la baisse soit due :

- soit à une surévaluation des consommations en 1987 (proportionnelle aux consommations)³¹
- soit à un phénomène réel qui aurait affecté de la même façon tous les ménages, indépendamment de leurs choix des équipements (et proportionnellement à leur consommation d'énergie utile).

Si nous associons l'une de ces hypothèses successivement aux hypothèses I et II, nous pouvons prévoir ex-post la consommation d'énergie utile des ménages de la catégorie "avec foyer Nopalé", à partir des consommations de 1987 et de l'évolution des parts des catégories, puis comparer les valeurs obtenues à la valeur observée en 1989. Le détail des calculs est donné à l'Annexe 5.2. Les résultats sont les suivants :

Valeur observée en 1989 :	6590 MJ/mén.an	
Valeur prévue, hypothèse I :	7315 MJ/mén.an	(+ 11,1 %)
Valeur prévue, hypothèse II :	6477 MJ/mén.an	(- 1,7 %)

L'hypothèse II, qui donne naissance à une prévision bien plus proche de la valeur observée que l'hypothèse I, paraît donc beaucoup plus crédible.

Ces résultats montrent que l'évolution des consommations d'énergie utile et le choix des équipements peuvent, jusqu'à preuve du contraire, être considérés indépendants, ce qui justifie la modélisation séparée de l'évolution des besoins et du choix des équipements.

³¹ Les résultats du paragraphe suivant accèdent cette hypothèse, bien qu'elle reste discutable. L'intérêt de la démarche faite ici se situe essentiellement sur le plan méthodologique.

5.2.5 Les incertitudes sur l'évolution à long terme

D'une enquête à l'autre

	Nbre	%	én.ut.GAZ	én.ut.CHA	én.ut.tot	TMenMoy
Avec Cuisin.	84	20.3	4225 (2050)	4272 (3898)	8503 (4517)	8.44
Avec Nopale	71	17.1	3671 (2963)	5473 (3407)	9294 (4410)	9.74
Avec Blip	121	29.2	1359 (1034)	5566 (2636)	7012 (2786)	10.11
Pas de gaz	138	33.3	0 (0)	6327 (3119)	6492 (3053)	10.04
Total	414	100.0	1884 (2361)	5541 (3287)	7533 (3730)	9.69

Entre parenthèses: écart-types.

Tableau 5.10 Consommations d'énergie utile par catégorie de consommateurs et par combustible, Dakar, 1987 Enquête Banque Mondiale

	Nbre	%	én.ut.GAZ	én.ut.CHA	én.ut.tot	TMenMoy
Avec Cuisin.	97	14.1	4485 (1976)	2606 (2484)	7149 (2965)	9.32
Avec Nopale	227	33.0	3475 (1650)	3007 (2660)	6590 (2842)	10.72
Avec Blip	236	34.3	1707 (1178)	3784 (2810)	5625 (2799)	10.53
Pas de gaz	128	18.6	0 (0)	5017 (2176)	5257 (2239)	9.69
Total	688	100.0	2365 (2037)	3591 (2722)	6090 (2817)	10.27

Entre parenthèses: écart-types.

Tableau 5.11 Consommations d'énergie utile par catégorie de consommateurs et par combustible, Dakar, 1989 Enquêtes MASENS

Comme l'ont déjà fait ressortir les tableaux 5.8 et 5.9, les consommations d'énergie utile à Dakar semblent avoir fortement baissé entre 1987 et 1989, passant de 7533 MJ/mén.an à 6090 MJ/mén.an en moyenne, soit une baisse de 19 % en deux ans. Une telle baisse peut-elle s'expliquer par un changement de comportement des consommateurs, ou est-elle plutôt imputable à des "erreurs de mesure" ?

Les tableaux 5.10 et 5.11 font apparaître que la baisse des consommations d'énergie utile affecte dans des proportions très voisines toutes les catégories de consommateurs. Par contre, les consommations de charbon - en termes d'énergie utile - ont fortement baissé pour toutes les catégories, alors que celles de gaz sont restées à peu près constantes.

Pour les trois catégories utilisant des foyers à gaz, la consommation moyenne de charbon, en énergie utile, a baissé de 37 %. Ce chiffre est beaucoup trop élevé pour pouvoir être expliqué par un changement de comportement des consommateurs. Aussi est-il fort probable que, pour l'une des raisons suivantes, les chiffres obtenus à partir des résultats de l'une des enquêtes soient loin de correspondre aux consommations cherchées :

- échantillon non représentatif du point de vue des comportements énergétiques
- enquête faite à une époque particulière de l'année³²
- questions mal comprises
- erreurs sur les facteurs de conversion utilisés (pouvoirs calorifiques, rendements, prix réels, ...)
- erreurs de saisie, erreurs de calcul.

L'enquête à incriminer est vraisemblablement celle de 1987 :

Au tableau 5.12, les estimations des consommations domestiques à Dakar (RUCAV) sont confrontées à d'autres données disponibles. Ce tableau fait clairement ressortir que les consommations, surtout de charbon³³, mais aussi de gaz en bouteilles de 6 et de 12,5 kg obtenues à partir des enquêtes de 1987, sont trop élevées. Les consommations émanant des enquêtes de 1989 correspondent en revanche remarquablement bien aux chiffres des autres sources³⁴.

³² Pourtant, aucune des deux enquêtes n'a été faite pendant la saison froide ou pendant le Ramadhan.

³³ Il a déjà été soutenu à la section 4.1 que les entrées non-contrôlées de charbon à Dakar, dont il n'est pas tenu compte au tableau 5.12, devraient être relativement faibles.

³⁴ Pour le charbon par exemple, la différence des deux valeurs pourrait correspondre aux consommations supplémentaires de saison froide et aux consommations non-domestiques.

	1987	1989
Bouteilles Blip Banekh		
Ventes (Sénégal)	8 910	13 810
Ventes (Dakar)	4 592	7 256
Bouteilles Nopalé		
Ventes (Sénégal)	4 013	10 380
Estimation (Dakar)	5 295	9 164
Bouteilles de 12,5 kg		
Ventes (Sénégal)	3 510	3 470
Estimation (Dakar)	4 932	3 154
Charbon		
Entrées contrôlées (Dakar)	89 511	89 595
Estimation (Dakar)	122 823	81 107

Notes :

- Les estimations des consommations ont été faites à partir des résultats des enquêtes Banque Mondiale (1987), et MASENS (1989) pour la RUCAV.
- Les chiffres des ventes ont été communiqués par les sociétés distributrices au MDIA.
- Entrées contrôlées : les chiffres des entrées contrôlées à Bargny, communiqués par la DEFC, ont été multipliés par 45/50 pour tenir compte du poids réel des sacs de "50 kg", et par 0,905 pour tenir compte des consommations hors RUCAV.

Tableau 5.12 Consommations à Dakar. Confrontation des résultats des enquêtes
aux autres données disponibles [tonnes]

L'évolution des consommations d'énergie utile et des rendements

Si les données actuellement disponibles ne permettent pas de mettre en évidence une quelconque évolution des consommations d'énergie utile, il est néanmoins évident que ces consommations ne sont pas invariables, notamment parce que les habitudes alimentaires évoluent.

Passons en revue les principales causes identifiables de variation dans le temps de l'énergie utile et des rendements :

- Evolution des variables explicatives taille du ménage et standing. Les résultats de paragraphe 5.2.2 permettent de quantifier les effets de l'évolution de ces variables explicatives. Ainsi :
 - Si la taille moyenne des ménages passait de 10 à 7 personnes par ménage, à population totale et à revenus inchangés³⁵, la consommation d'énergie utile augmenterait de 30 % environ !
 - Si les revenus augmentaient de 20 %, la consommation de l'énergie utile n'augmenterait que de 1 %.
- Evolution des besoins indépendamment de l'évolution des variables explicatives. Pour simuler cette évolution, les consommations d'énergie utile $k_{zg} \cdot (a + b \cdot TMen_{zgs} + c \cdot Depenses_{zgs})$ seront multipliées par des facteurs exogènes $FEnUt_{zgs}$.
- Diffusion de nouveaux équipements à l'intérieur d'un groupe d'équipements. Pour simuler ceci, on peut admettre qu'il existe dans chaque groupe d'équipements des foyers traditionnels à rendement RFT_k , et des foyers améliorés à rendement RFA_k dont la part dans l'ensemble des foyers d'une classe de consommateurs est donnée par une variable exogène $PartFA_{zgs k}$. Les rendements $\eta_{zgs k}$ sont alors donnés par : $\eta_{zgs k} = 1 / [PartFA_{zgs k} / RFA_k + (1 - PartFA_{zgs k}) / RFT_k]$.
- Evolution des modes d'utilisation des foyers d'un type donné. (Un même foyer peut être utilisé en gaspillant plus ou moins de combustible. Par exemple, on peut éteindre un feu de bois ou de charbon à l'eau après la préparation d'un repas ou laisser les restes de combustibles se consumer). On pourrait, pour simuler ce phénomène, considérer que les rendements exogènes RFT_k et RFA_k varient dans le temps. Ce phénomène ne sera cependant pas simulé ci-après.

³⁵ Comme déjà signalé au début de ce chapitre, le revenu par ménage est en fait lié à la taille des ménages. En admettant que le revenu total reste inchangé, donc en supposant que le revenu par ménage est multiplié par 7/10, la hausse de la consommation n'est plus que de 21 %.

5.3 LE CHOIX DES EQUIPEMENTS

Le choix des équipements est sans doute l'élément du processus de consommation qui mérite le plus d'attention car, contrairement aux évolutions des rendements et de l'énergie utile, qui restent nécessairement à l'intérieur de certaines limites, le choix des équipements peut faire varier dans de très grandes proportions les consommations d'un combustible.

Nous considérerons dans cette section les consommateurs d'une ville donnée faisant partie du marché interconnecté. Etant donné que la diffusion de certains équipements, et en particulier de ceux correspondant aux énergies de l'avenir (§ 4.2.3), ne peut pas être modélisée (faute de données), certaines parts de groupes d'équipements $PartEquip_{zgsk}^{marche}$ (§ 5.1.4) devront être des variables exogènes lors des simulations de la consommation. Nous nous concentrerons sur les parts p_{sgsk} des autres groupes d'équipements dans le total de l'énergie utile consommée par ces autres équipements³⁶. Les groupes d'équipements considérés seront (§ 5.1.2) :

- les foyers à bois
- les foyers à charbon
- les foyers à gaz populaire (Blip Banekh et Nopalé)
- les cuisinières à gaz traditionnel (12,5 kg).

Le premier paragraphe de cette section est dédié à l'analyse du processus de choix. Il sera suivi d'une modélisation du choix à long terme à l'aide d'un modèle logistique linéaire (§ 5.3.2). Enfin, la dynamique du choix sera modélisée aux paragraphes 5.3.3 à 5.3.5.

5.3.1 Analyse du processus de choix

Des choix à long terme aux décisions à court terme

Considérons un ménage qui utilise un équipement k pour un certain usage. Le choix de l'équipement k est le résultat d'un choix à court terme (par exemple le choix du foyer à allumer au moment de la préparation du repas de midi). Ce choix porte sur un équipement parmi ceux qui constituent le parc d'équipements du ménage.

³⁶ Si les parts des $N^{k'}$ premiers groupes d'équipements sont exogènes, alors

$$p_{zgsk} = \frac{PartEquip_{zgsN^{k'+k}}}{(1 - \sum_{l=1}^{N^{k'}} PartEquip_{zgs l})}$$

Le parc d'équipements du ménage est en revanche le résultat d'un choix à long terme, car un équipement nouveau modifie le parc d'équipements du ménage pour plusieurs années. Par ailleurs, ce choix ne conduit qu'à moyen terme à des décisions d'achat, parce que les décisions "doivent mûrir", parce que l'achat d'un nouvel équipement nécessite souvent une épargne considérable à l'échelle du budget du ménage, ou encore tout simplement parce que le responsable de l'achat a d'autres choses plus importantes à faire.

On peut dire que trois phénomènes, fruits du comportement du consommateur, se succèdent dans le temps pour donner lieu à l'utilisation d'un équipement donné pour un usage donné :

1. le choix du parc d'équipements à long terme
2. la dynamique du parc d'équipements à choix à long terme donnés
3. le choix de l'équipement pour un usage donné.

Cependant, les consommations d'énergie ne sont pas connues par usage. Par ailleurs, les configurations que peuvent prendre les parcs d'équipements sont si nombreuses qu'il ne serait pas réaliste de vouloir modéliser la dynamique de ces parcs d'équipements. C'est pourquoi nous nous contenterons de modéliser (cf. § 5.1.2) :

- d'une part le choix des parts des groupes d'équipements à long terme
- d'autre part la dynamique des parts des groupes d'équipements p_{zgsk} à choix à long terme donnés.

Les déterminants du choix

Les prix des combustibles, le standing, la taille du ménage, les prix des équipements et les autres caractéristiques des technologies influencent tous les choix des équipements.

L'importance des prix des combustibles

Leur influence capitale sur le choix des combustibles a déjà été mise en évidence lors de l'examen de la compétition spatiale des combustibles (§ 4.3.1). Les réponses des consommations dakaraises aux variations des prix du gaz sont une autre preuve de l'importance de ces variables explicatives (§ 5.3.3).

TIBESAR et WHITE (1990) ont essayé de cerner la relation entre le choix des combustibles et les prix de ceux-ci à partir d'une enquête (de 1985) lors de laquelle des questions du type "que feriez-vous si ... ?" ont été posées. D'après les réponses données par les ménages, ceux-ci semblaient très peu sensibles aux prix : 64 % de la classe des ménages les plus pauvres ont déclaré qu'ils n'abandonneraient pas le charbon au profit du gaz, même si les prix du charbon triplaient !

La forte progression des ventes de gaz après la baisse des prix du gaz de juillet 1987 a montré que les consommateurs étaient en réalité bien plus sensibles aux prix³⁷. C'est pourquoi seules des consommations observées seront utilisées ci-après pour établir les lois de comportement des consommateurs.

Le standing, modérateur de l'influence des prix

Il va de soi qu'un consommateur accordera d'autant plus d'importance au prix de son énergie que son revenu est faible. A l'inverse, plus son standing est élevé, plus il aura tendance à choisir des équipements qui améliorent son confort.

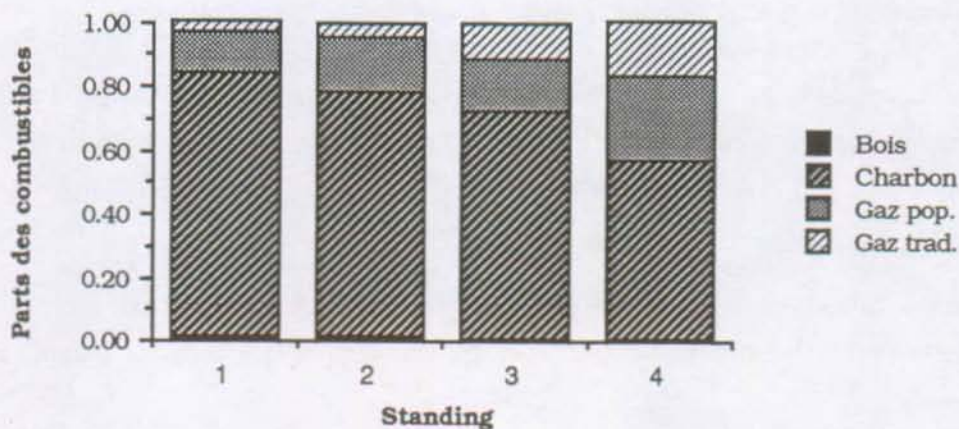


Fig. 5.6 Parts des combustibles par standing, Dakar, 1987
Enquêtes Banque Mondiale

Comme en témoigne la figure 5.6, les cuisinières à gaz, fonctionnant au gaz traditionnel, confortables mais chères, sont essentiellement utilisées par les ménages de standing élevés.

L'adaptation de l'équipement à la taille du ménage

Le bois est réputé être un combustible pour les ménages de grande taille (opinions des ménagères, enquêtes Banque Mondiale 1987). A l'opposé, les réchauds à gaz, dont la puissance de flamme est limitée, conviendraient plutôt aux ménages de petite taille.

³⁷ Du moins à moyen terme. Les résultats de TIBESAR et WHITE correspondent peut-être à un comportement à court terme.

Le handicap du prix de l'équipement

Certes, le prix de l'équipement intervient lors de l'évaluation d'une technologie, faite dans la perspective d'un choix à long terme. Mais la part du prix de revient de l'énergie imputable aux coûts des équipements est négligeable pour les équipements courants : moins de 3 %, probablement dans le cas d'un foyer Nopalé³⁸.

Par contre, le coût de certains équipements représente une épargne considérable pour de nombreux ménages, eu égard à leurs revenus, et constitue de ce fait un frein à la diffusion à court terme de ces équipements. Cependant, la progression de la consommation de gaz populaire chez les ménages de bas standing à Dakar indique que l'investissement initial pour un réchaud à gaz populaire n'est pas une contrainte insurmontable pour les ménages. C'est aussi ce que fait remarquer SOW (1990), considérant la progression rapide de la vente des réchauds à gaz à Bamako (Mali).

Confort d'utilisation et prestige des technologies

Mis à part le prix du combustible et le prix de l'équipement, de nombreuses autres caractéristiques des technologies sont susceptibles d'influencer le choix des consommateurs. Certaines ont trait au confort, d'autres au prestige que procure l'utilisation d'une technologie :

- vitesse d'allumage du feu, puissance de la flamme, niveau des émissions de fumée, ...
- pénibilité du transport, du stockage et du pré traitement du combustible (par exemple, fendre le gros bois)
- odeur du combustible
- risque d'épuisement temporaire des stocks de combustible chez les détaillants
- danger d'asphyxie, danger d'explosion
- goût des mets préparés
- prestige de la technologie, etc.

MATLY (MADON et MATLY, 1987) a organisé des enquêtes pour savoir comment les combustibles et les foyers étaient appréciés par les ménagères. La plupart des caractéristiques des technologies énumérées ci-dessus ont été citées. Si les réponses qualitatives des ménagères ne se laissent pas exploiter à des fins de simulation, elles permettent cependant de conclure cette revue des déterminants du choix des équipements sur un point important : les fortes variations

³⁸ Un foyer Nopalé à 10 000 FCFA, d'une durée de vie supposée égale à 10 ans, revient 1000 FCFA/an. Le gaz en bouteilles de 6 kg (120 FCFA/kg), $M=45,7$ MJ/kg) consommé par un ménage qui consomme 6000 MJ/an (énergie utile) et satisfait 80 % de ses besoins à l'aide d'un Nopalé, revient 36 000 FCFA/an. Le coût de l'équipement représente alors 2,7 % du prix de revient de l'énergie.

des appréciations des technologies à travers le pays laissent supposer que ces appréciations, subjectives, ne sont pas arrêtées, mais peuvent facilement évoluer sous l'influence de la familiarisation des consommateurs avec de nouveaux équipements, sous l'influence de la publicité, etc... Toute modélisation du choix des équipements devra donc permettre, au moyen de variables exogènes, de représenter une modification, à travers des campagnes d'information ou de publicité, des appréciations des technologies par les consommateurs, autrement dit des images que se font les consommateurs des caractéristiques des technologies. Même le prix de revient de l'énergie est une caractéristique dont les consommateurs n'ont en fait qu'une idée, et non une connaissance objective ...

5.3.2 Le modèle logistique linéaire : application d'un modèle désagrégé au choix à long terme

Bases de la théorie des choix discrets

On parle de choix discrets lorsqu'un choix est opéré parmi un ensemble discret d'options, de variantes³⁹, contrairement au cas où le choix porte sur des grandeurs continues.

Une théorie des choix est une théorie qui définit les éléments suivants, intervenant dans le processus de choix (d'après BEN AKIVA et LERMAN, 1985) :

1. le décideur
2. l'ensemble des variantes
3. les attributs des variantes ou les critères de choix
4. la règle de décision.

La règle de décision est incontestablement la pièce maîtresse d'une théorie des choix. C'est elle qui définit en définitive quels seront les attributs pris en considération. Citons quelques règles de décision courantes :

- *La dominance* : une variante est choisie si elle est "meilleure" que toutes les autres, c'est-à-dire si elle est la meilleure selon un critère de décision, et au moins équivalente aux autres sur les autres critères. Cette règle ne conduit pas nécessairement à un choix unique.

³⁹ Le mot "alternative", de l'anglais, est aussi utilisé en français par certains auteurs (par exemple TZIEROPOULOS, 1980)

- *La satisfaction* : une variante n'est choisie que si chaque attribut atteint ou dépasse un seuil spécifique à cet attribut. Cette règle ne conduit pas non plus nécessairement à un choix unique.
- *La supériorité lexicographique* : les attributs sont classés selon leur importance. La variante choisie est celle qui a la meilleure valeur pour l'attribut le plus important. En cas d'égalité entre deux variantes, c'est l'attribut suivant qui décide, et ainsi de suite.
- *L'utilité* : tous les critères de choix sont agrégés en un seul critère quantifié, l'utilité. Cela signifie que les attributs doivent être commensurables. La variante choisie est celle dont l'utilité est maximale.

La théorie de l'utilité a été largement utilisée en théorie des choix. Elle permet une formalisation mathématique des processus de choix, et, par suite, l'emploi des outils de la statistique en vue de la mise en oeuvre des modèles de choix.

L'utilité aléatoire

La notion d'utilité aléatoire est à la base des modèles désagrégés du choix - ceux qui tentent d'expliquer le comportement des décideurs individuels. Ces modèles, qui ont fait l'objet d'importants développements théoriques depuis les années 70, ont connu d'importantes applications dans le domaine des transports (McFADDEN, 1974; DOMENICH et McFADDEN, 1975; TZIEROPOULOS, 1980; BEN AKIVA et LERMAN, 1985).

Dire que les décideurs choisissent la variante dont l'utilité est maximale signifie que le décideur n choisit la variante k si et seulement si :

$$U_n(k) > U_n(l) \quad \forall l \in C_n \quad \text{et} \quad l \neq k$$

$U_n(l)$: utilité de la variante l pour le décideur n

C_n : ensemble des variantes pour le décideur n

Il n'est pas possible, en général, de trouver une fonction d'utilité qui ne dépend que des attributs observables des variantes et qui décrit parfaitement le choix des décideurs. Pour expliquer les différences de choix lors de situations apparemment identiques, ainsi que les situations d'apparente intransitivité des préférences, on aura recours à des fonctions d'utilité aléatoires.

Une fonction d'utilité aléatoire est séparable en une partie non-stochastique et une partie purement aléatoire :

$$U_n(k) = V_n(k) + \varepsilon_n(k)$$

$V_n(k)$: utilité non-stochastique

$\varepsilon_n(k)$: partie aléatoire de l'utilité

$V_n(k)$ peut toujours être défini de sorte que l'espérance de $\varepsilon_n(k)$, $E[\varepsilon_n(k)]$, soit nulle⁴⁰.

Le choix devient dès lors une variable aléatoire. Notons $P_n(k)$ la probabilité que le décideur n choisisse la variante k . On a :

$$P_n(k) = \text{pr} [U_n(k) \geq U_n(l), \forall l \in C_n] = \text{pr} [V_n(k) + \varepsilon_n(k) \geq V_n(l) + \varepsilon_n(l), \forall l \in C_n]$$

$\text{pr} [\dots]$: probabilité que ...

La partie aléatoire de l'utilité, $\varepsilon_n(k)$, peut être interprétée comme étant le résultat de plusieurs phénomènes :

- Existence d'attributs non observables des technologies
- Existence de caractéristiques non observables des décideurs
- Erreurs de mesure : les valeurs observées sont des mesures imparfaites des valeurs réelles des variables explicatives
- Utilisation de variables proches : les variables explicatives utilisées sont des approximations des variables qui expliquent réellement le choix.

Différents modèles du choix sont obtenus selon les hypothèses faites au sujet de V_n et ε_n :

- Si les $\varepsilon_n(k)$ sont distribués selon des lois normales identiques et indépendantes, on obtient un modèle probit. L'hypothèse des distributions normales permet une interprétation intéressante des ε : ils représenteraient la partie stochastique de la somme d'une multitude de variables explicatives non observables qui tend (d'après le théorème central limite) vers une loi normale. Mais les calculs sont relativement compliqués, surtout dans le cas de variantes multiples.

⁴⁰ Supposons que $U_n(k) = V'_n(k) + \varepsilon'_n(k)$ avec $E[\varepsilon'_n(k)] = \mu \neq 0$
 On peut alors définir $V_n(k) = V'_n(k) + \mu$ et $\varepsilon_n(k) = \varepsilon'_n(k) - \mu$
 de sorte que $U_n(k) = V_n(k) + \varepsilon_n(k)$ et $E[\varepsilon_n(k)] = 0$

- Si les $\epsilon_n(k)$ sont distribués selon des lois Gumbel identiques et indépendantes, on obtient un modèle logistique (ou logit)⁴¹. La forme de la distribution d'une loi Gumbel est très proche de celle d'une loi normale, avec cependant des extrémités plus "épaisses".

Les modèles désagrégés du choix sont des modèles à caractère causal : ils ont une certaine justification du point de vue du comportement réel des décideurs. La modélisation du comportement individuel des décideurs permet par ailleurs une bonne exploitation des données : l'information récoltée (en général au moyen d'enquêtes) au sujet de chaque décideur individuel peut être exploitée lors de l'estimation des paramètres, sans qu'il y ait perte préalable d'information par agrégation de données. Cela n'empêche pas certains modèles désagrégés, et en particulier les modèles logistiques linéaires, d'être d'un emploi relativement simple.

Les modèles logistiques linéaires

Dans un modèle logistique, la probabilité qu'une variante k soit choisie par le décideur n s'écrit :

$$P_n(k) = \frac{e^{V_n(k)}}{N^k \sum_{l=1}^{N^k} e^{V_n(l)}}$$

En supposant que l'utilité non-stochastique $V_n(k)$ est une fonction linéaire des variables explicatives, on aboutit à un modèle logistique linéaire. Dans ce cas :

$$V_n(k) = \vec{\theta} \cdot \vec{x}_{kn}$$

$\vec{\theta}$: vecteur de paramètres à estimer

\vec{x}_{kn} : vecteur des variables explicatives (attributs de la variante k et caractéristiques socio-économiques du décideur n)

L'estimation des paramètres se fait généralement par la recherche du maximum de la fonction de vraisemblance :

$$L = \sum_{n=1}^{N^n} \sum_{k=1}^{N^k} w_{kn} \cdot (\vec{\theta} \cdot \vec{x}_{kn} - \ln \sum_{l=1}^{N^k} e^{\vec{\theta} \cdot \vec{x}_{ln}})$$

N^n : nombre d'observations

N^k : nombre de variantes

⁴¹ Pour la démonstration, voir par exemple DOMENICH et McFADDEN (1975)

w_{kn} : part observée des besoins satisfaits à partir de la variante k , observation n

La méthode d'estimation des paramètres est précisée à l'Annexe 5.3.

La qualité de l'ajustement peut être mesurée par la statistique $-2 \ln L^* = -2L$. Cette quantité est égale, à une constante près, à la "déviante" utilisée par certains statisticiens⁴². Dans le cas de choix au tout-ou-rien ($w_{kn} \in \{0,1\}$), la variation de déviante observée en passant d'un modèle à un autre plus complexe (avec plus de paramètres) suit asymptotiquement⁴³ une loi X^2 (chi carré) - avec un nombre de degrés de liberté égal au nombre de paramètres ajoutés - sous l'hypothèse nulle que les paramètres ajoutés sont tous nuls. Dans le cas où $w_{kn} \in [0,1]$ (ce qui est le cas pour les observations des parts des groupes d'équipements au Sénégal), ce test ne doit être utilisé qu'en sachant qu'il est trop sévère. (risques d'acceptation de l'hypothèse nulle alors qu'elle est fautive)⁴⁴.

Un modèle logistique linéaire sera utilisé avec les valeurs des variables explicatives pour l'année courante (ce sera donc un modèle statique) pour estimer les parts à long terme des groupes d'équipements de l'année courante (les parts qui seraient atteintes à long terme si les variables explicatives ne changeaient plus).

Application au choix du gaz traditionnel à Dakar

Le gaz traditionnel est un combustible qui diffère des autres par le fait qu'il est cher, vendu en grandes bouteilles, et s'utilise avec des cuisinières confortables. C'est un combustible de luxe par opposition aux autres combustibles, que l'on peut qualifier de populaires. On peut donc considérer qu'il y a choix, par les ménages, entre le gaz traditionnel d'une part, et tous les autres combustibles d'autre part.

Deux constatations permettent de supposer que les parts du gaz traditionnel observées en 1987 étaient proches d'un état d'équilibre à long terme : la différence entre le prix de revient du gaz traditionnel et celui de son principal concurrent jusqu'alors, le charbon, avait peu varié pendant les années précédant 1987; la consommation nationale de gaz traditionnel était également restée

⁴² La déviante est égale à -2 fois le logarithme du rapport entre la vraisemblance du modèle étudié et celle du modèle saturé (voir par exemple HOSMER et LEMESHOW, 1989).

⁴³ L'approximation est d'autant meilleure que le nombre d'observations est grand.

⁴⁴ Pour s'en convaincre, il suffit de considérer que w_{kn} est "en réalité" le résultat de m choix au tout-ou-rien faits par le décideur n pour m usages "unitaires". La déviante "réelle" est alors m fois plus élevée, d'où un rejet plus facile de l'hypothèse nulle.

presque constante. Ces constatations justifient l'estimation des paramètres d'un modèle logistique linéaire donnant des parts d'équilibre à long terme à partir des observations de 1987.

Spécifications du modèle

Les prix de revient de l'énergie ont une influence négative d'autant plus forte sur l'utilité d'un combustible que le ménage considéré est pauvre. Pour cette raison, le rapport **prix/revenu** est à priori une variable explicative pertinente. Les résultats obtenus aussi bien dans ce paragraphe qu'avec les modèles de la dynamique des parts montreront que cette variable explique de façon satisfaisante à la fois l'influence des prix et l'influence du standing sur le choix des équipements.

Puisque les prix de revient de l'énergie peuvent être considérés constants pour toutes les observations d'une même enquête, seul $1/\text{revenu}$ figurera ci-dessous parmi les variables explicatives (IDEP = 100 000/Dépenses pour 1987 et IFAC = 10 000/facture d'électricité pour 1989).

La taille du ménage TMen est une variable explicative possible du choix pour des raisons déjà citées.

Finalement, une constante unitaire sera ajoutée à la liste des variables explicatives de l'une des deux variantes. Son coefficient représentera la différence d'utilité "à l'origine" qui subsiste lorsque les valeurs des autres variables explicatives tendent vers zéro. Cette différence d'utilité "à l'origine" permet d'expliquer le fait que les consommateurs aient une préférence pour l'une des variantes alors que rien, parmi les valeurs de ses attributs, ne la distingue des autres.

Etant donné que seules les différences d'utilité ont, dans un modèle logistique linéaire, une influence sur les parts estimées, une utilité nulle peut être attribuée à l'une des variantes, par exemple les "autres combustibles". Les fonctions d'utilité prennent alors les formes suivantes :

$$V_n(\text{autres}) = 0$$

$$V_n(\text{gaz trad.}) = \theta_0 \cdot 1 + \theta_1 \cdot 1/\text{revenu}_n + \theta_2 \cdot \text{TMEN}_n$$

Les probabilités de choix $P_n(\text{gaz trad.})$ et $P_n(\text{autres}) = 1 - P_n(\text{gaz trad.})$ qui en résultent seront les estimations des parts observées $W_n(k)$ des combustibles.

Analyse des résultats

Modèle	n	\vec{x}	déviante	θ_0	θ_1	θ_2
GT87/1	329	1	115,81	-2,4600		
GT87/2	329	1 IDEP TMEN	86,68	-0,7487 (0,6392)	-0,7236 (0,2051)	-0,1834 (0,0593)
GT87/3	329	IDEP TMEN	88,06		-0,5719 (0,1456)	-0,01347 (0,0378)
GT87/4	329	IDEP	105,33		-1,105 (0,113)	
GT87/5	329	TMEN	111,23			-0,3011
GT89/1	543	1	218,31			
GT89/2	543	1 IFAC	217,86			

(entre parenthèses : écarts-types)

Tableau 5.13 Modèles logistiques linéaires pour la part du gaz traditionnel à Dakar : résultats des estimations

Enquêtes Banque Mondiale (1987) et MASENS (1989). Calculs effectués avec GLIM 377 (Royal Statistical Society).

Le modèle GT87/2 du tableau 5.13 est celui qui correspond aux fonctions d'utilité définies ci-dessus. L'écart de déviance avec le modèle GT87/1, soit $122,55 - 92,22 = 30,33$, permet de rejeter l'hypothèse que les paramètres de IDEP et TMEN soient simultanément nuls au seuil 0,01⁴⁵. Cependant, l'important écart-type du coefficient de la constante θ_0 , ne permet pas de rejeter l'hypothèse que ce paramètre est nul⁴⁶. La faible augmentation de déviance lors du passage au modèle GT87/3 (sans constante) confirme qu'il n'y a pas de raison de laisser la constante dans le modèle.

Le signe négatif de θ_1 , le coefficient de IDEP, est conforme à l'idée que l'intérêt pour le gaz traditionnel devrait décroître avec la "pauvreté" (IDEP) du ménage.

⁴⁵ $\chi^2_{0,01}[2] = 9,21 \ll 115,81 - 86,68 = 29,13$

⁴⁶ Test t : $t_{0,05}[328] = 1,64 > 0,7487/0,6392 = 1,17$

Le signe négatif du coefficient de TMEN, θ_2 , signifie que l'utilité du gaz traditionnel décroît avec la taille du ménage. La comparaison des modèles GT87/4 et GT87/5 fait ressortir que TMEN seule explique moins bien les variations de la part du gaz traditionnel que IDEP seule, mais l'apport de TMEN lors du passage du modèle GT87/4 au modèle GT87/3 est hautement significatif. Plusieurs explications possibles peuvent être trouvées à cet apport de la variable TMEN :

- (i) Le gaz traditionnel est plus adapté que les autres combustibles aux besoins des petits ménages⁴⁷.
- (ii) La variable $-1 \cdot \text{TMEN}$ est en fait "proche" du standing, tout comme les dépenses observées ne sont qu'une variable jugée "très proche" du standing. La faible corrélation observée entre TMEN et les dépenses permet de douter fortement de la pertinence de cette explication.
- (iii) A standing égal (donc à dépenses égales ou à revenus égaux) un ménage de petite taille peut plus facilement s'offrir le gaz traditionnel. Faudrait-il utiliser Dépenses/TMEN à la place de Dépenses ? Une modification de la spécification du modèle peut aider à répondre à cette question.

Spécifications alternatives

En remplaçant les variables explicatives IDEP et TMEN par une variable explicative combinée $1/(\text{dépenses}/\text{TMEN}^\alpha)$, la déviance minimale obtenue se situe autour de 95,7 ($\alpha = 0,7$). Ce chiffre, situé à peu près à mi-chemin entre ceux des modèles GT87/4 et GT87/3, indique que l'explication (iii) ci-dessus donnée à l'apport de TMEN est probablement en partie juste, mais insuffisante pour expliquer toute l'influence apparente de TMEN sur la part du gaz traditionnel.

Une autre modification intéressante du modèle consiste à remplacer IDEP par une variable contenant un paramètre de plus : $1/\text{Dépenses}^\gamma$. Une légère baisse de déviance est obtenue : environ 3,50 pour un γ proche de 0,2. La comparaison avec un $X^2_{0,05} [1] = 3,84$ ne permet pas de rejeter l'hypothèse nulle $\gamma = 1$. Il n'y a donc pas de raison d'abandonner le modèle initial au profit du modèle plus complexe.

⁴⁷ Les cuisinières auraient-elles des brûleurs trop rapprochés pour être adaptées aux marmites de grande taille ?

Résultats de modèles non-logistiques

Le programme d'estimation des paramètres utilisé pour les modèles logistiques linéaires ci-dessus a permis d'estimer les paramètres pour plusieurs types de modèles. Les déviations obtenues pour $V_n(k) = \theta_1 \cdot IDEP + \theta_2 \cdot TMEN$ - avec k : gaz traditionnel - sont :

$$(1) \quad P_n(k) = e^{V_n(k)} / (1 + e^{V_n(k)})$$

(modèle logistique linéaire binaire ou à 2 variantes)

Déviante : 88,06

$$(2) \quad P_n(k) = \phi[V_n(k)]$$

avec ϕ : fonction de répartition de la loi normale (modèle probit)

Déviante : 89,47

$$(3) \quad P_n(k) = 1 - e^{-e^{V_n(k)}}$$

Déviante : 86,97

Seule la déviante obtenue avec le modèle (3) est plus petite que celle obtenue avec le modèle logistique linéaire, mais la faible différence ne justifie pas un changement de modèle, surtout que le modèle (3) n'est pas généralisable au choix à variantes multiples.

Conclusions à l'application

Le modèle logistique linéaire avec

$$V_n(\text{gaz trad.}) = \theta_1 \cdot IDEP_n + \theta_2 \cdot TMEN_n$$

semble être le plus adapté pour estimer l'évolution de la part à long terme du gaz traditionnel, sur la base des observations de 1987.

Rappelons que la variable 1/Depenses ($IDEP = 100\,000/Depenses$) n'a été employée à la place du rapport prix/Depenses que parce que les prix étaient les mêmes pour toutes les observations. Pour modéliser l'évolution de la part du gaz à prix variables, il conviendrait donc de remplacer

$\theta_1 \cdot IDEP_n$ par $\beta_1 \cdot \text{prix}_k/Depenses_n$, ou plutôt (puisque seules les différences de prix important) par $\beta_1 \cdot \Delta\text{prix}_k/Depenses_n$, Δprix_k étant l'écart entre les prix de revient de l'énergie utile. La valeur de β peut être calculée à partir de celle de θ_1 et d'une estimation de la valeur de Δprix_k qui a conduit ("à long terme") aux choix observés en 1987 :

Pour $\Delta\text{prix} = 5,03 \text{ F/MJ}^{48}$

et $\theta_1 = 1,105$ (modèle GT87/4), $\beta_1 = -22,0 \cdot 10^3$

L'interprétation de ce paramètre β_1 est très proche de celle que l'on peut donner à ceux qui interviendront dans les modèles de la dynamique des parts. Il sera intéressant de comparer les valeurs.

Champ d'application des modèles logistiques linéaires dans le cadre du choix des équipements

Signalons quelques-unes des principales limites à l'application des modèles logistiques linéaires (d'après TZIEROPOULOS, 1980):.

Stabilité dans le temps : Bien que la formulation des modèles logistiques linéaires soient basée sur une théorie des choix, les relations établies entre le choix et ses variables explicatives sont essentiellement de nature corrélative (cf. les difficultés d'interprétation du terme $\theta_2 \cdot \text{TMEN}_n$ ci-dessus). Le modélisateur n'a aucune garantie d'exhaustivité ou de quasi-exhaustivité des variables explicatives. Par conséquent, le modèle peut très bien donner des prévisions très éloignées de la réalité future, en raison de la variation de variables explicatives non prises en compte. Il a déjà été souligné que les campagnes publicitaires, dont il n'est guère possible de modéliser l'impact, devraient avoir une influence importante sur le choix des combustibles au Sénégal.

Structure compensative du processus de choix : En raison de la forme linéaire de la fonction d'utilité, une variation donnée sur une variable explicative est supposée pouvoir toujours être compensée par une certaine variation d'une autre variable explicative, quelle que soient les valeurs des variables explicatives restantes.

Indépendance des variantes : L'hypothèse d'indépendance des variantes (indépendance des $\varepsilon_n(k)$) constitue sans doute la limite la plus importante à l'application des modèles logistiques linéaires. Cette hypothèse n'est pas vérifiée lorsque des attributs non observés (mais influençant le choix) de deux variantes distinctes sont corrélés. Il est par conséquent important, lors de la définition des variantes, de veiller à ce qu'il y ait aussi peu de ressemblances que possible entre ces dernières. C'est d'ailleurs la raison principale pour laquelle le choix modélisé dans le cadre de cette étude ne comporte que quatre variantes. Si la distinction des variantes "gaz traditionnel"

⁴⁸ Pendant les 15 dernières années avant 1987, le prix du gaz traditionnel se situait en moyenne autour de 236 F/kg et celui du charbon autour de 46 F/kg (francs 1990). En utilisant les facteurs de conversion habituellement utilisés dans cette étude, on obtient une différence des prix de revient de l'énergie utile de 5,03 F/MJ.

et "gaz populaire" est discutable⁴⁹, la distinction de variantes du genre "foyers traditionnels à charbon" et "foyers améliorés à charbon" est hors de question.

Malgré ces limites à l'application des modèles logistiques linéaires, les résultats obtenus dans le cas du choix du gaz traditionnel à Dakar permettent de penser qu'une représentation satisfaisante de l'évolution des parts d'équilibre à long terme peut être obtenue à l'aide d'un modèle logistique linéaire de spécification :

$$V_n(k) = \beta_{0k} + \beta_1 \cdot \frac{\Delta \text{prix}_k}{\text{Depenses}_n} + \beta_{2k} \cdot \text{TMEN}_n \quad (k \neq \text{char})$$

$$V_n(\text{char}) = 0$$

- Le paramètre β_{0k} rend compte de la différence d'utilité entre la variante k et les équipements au charbon (variante de référence), à variables explicatives égales
- Le paramètre β_{2k} rend compte de la variation de l'utilité de la variante k avec la taille du ménage. Le terme $\beta_{2k} \cdot \text{TMEN}$ sera finalement omis, la connaissance des variations des parts avec TMEN n'étant pas un objectif principal.
- Le paramètre β_1 , qui traduit l'influence du rapport $\Delta \text{prix}_k / \text{revenu}_n$ sur l'utilité, est le même pour toutes les variantes, puisqu'il est censé mesurer le désagrément procuré par une dépense pour combustible, indépendamment de la nature du combustible.

Cette spécification ne pourra être confrontée aux autres données disponibles, donc à celles qui ne concernent plus uniquement la part du gaz traditionnel à Dakar en 1987, que lorsqu'elle aura été intégrée à un modèle de la dynamique des parts.

5.3.3 D'un modèle statique à un modèle dynamique

Le modèle logistique linéaire, tel qu'il a été présenté au paragraphe précédent, est un modèle statique : il permet d'estimer des parts d'équilibre à long terme, mais non l'évolution des parts effectives. De nombreuses façons d'élaborer un modèle dynamique à partir d'un modèle statique peuvent être envisagées. La plus simple (sur le plan mathématique) sera présentée ici, et

⁴⁹ Ces variantes présentent des ressemblances évidentes, bien qu'elles se distinguent très nettement par les coûts de l'équipement et les coûts du combustible. Un essai d'application d'un modèle de type "nested logit" (logit à étages), spécialement conçu pour la prise en compte de corrélations $[\mathcal{E}_n(k), \mathcal{E}_n(l)]$, n'a pas donné de résultats satisfaisants.

le type de modèle résultant sera appliqué au cas de Dakar. Des modèles plus complexes seront présentés aux paragraphes suivants.

Passage à l'agrégation

Les principales données à partir desquelles doit se faire le calibrage du modèle de la dynamique des parts sont de nature agrégée : il s'agit des consommations par combustible et par an pour la ville de Dakar (voir ci-dessous). Le calibrage ne pourra donc plus se faire à partir d'observations par ménage, et la notation par ménage ($P_n(k)$, $V_n(k)$, ...) utilisée ci-dessus perd l'une de ses principales raisons d'être. Le remplacement des variables par ménage par des variables par classes ($p_{st}(k)$, $V_{st}(k)$, ...), représentant des moyennes par classe, simplifiera l'estimation des paramètres et l'utilisation ultérieure du modèle à des fins de simulation.

Il ne s'agit pas là d'un changement fondamental dans l'approche du processus de choix, puisque chaque classe peut à la limite être supposée ne contenir qu'un seul décideur. Par ailleurs, si la variance des variables explicatives à l'intérieur des classes est suffisamment petite, les valeurs estimées des paramètres restent pratiquement inchangées⁵⁰.

Les modèles à vitesse de convergence constante

Soit $\tilde{p}_{st}(k)$ la part d'équilibre à long terme du groupe d'équipements k pour les ménages de la classe s , l'année t (les indices de la zone et de la classe de taille d'agglomération sont omis pour plus de lisibilité).

Soit $\tilde{V}_{st}(k)$ l'utilité correspondante, de sorte que

$$\tilde{p}_{st}(k) = \frac{e^{\tilde{V}_{st}(k)}}{\sum_{l=1}^{Nk} e^{\tilde{V}_{st}(l)}}$$

Soit par ailleurs $p_{st-1}(k)$ la part effective du groupe d'équipements k , l'année $t-1$.

La façon la plus simple de formuler la convergence des parts effectives vers les parts d'équilibre à long terme consiste à écrire :

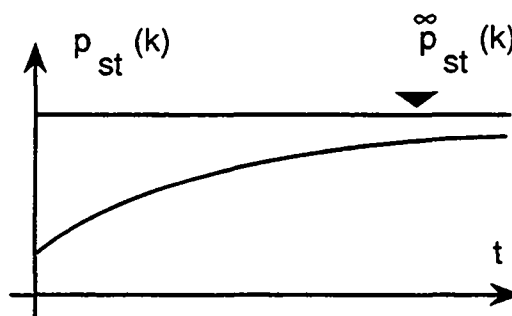
$$p_{st}(k) = p_{st-1}(k) + \Delta p_{st}(k) \quad \text{avec :} \quad \Delta p_{st}(k) = C \left(\tilde{p}_{st}(k) - p_{st-1}(k) \right)$$

⁵⁰ Le paramètre θ_2 du modèle GT87/4 (§ 5.3.2), lorsqu'il est estimé à partir de données agrégées en seulement 4 classes formées sur la variable IDEP (les standings), passe de -1,105 à -1,115 (moins de 1 % de variation)

On vérifie immédiatement que $\sum_k p_{st}(k) = 1$

Si on désigne par "vitesse de convergence" le rapport $\Delta p_{st}(k) / (\bar{p}_{st}(k) - p_{st-1}(k))$, cette vitesse est égale à la constante C. D'où le nom donné ici aux modèles issus de la formulation ci-dessus.

Si les parts d'équilibre à long terme des groupes d'équipements restent constants au cours du temps, les parts effectives évoluent selon des exponentielles négatives (ci-contre).



L'estimation des paramètres de différents types de modèles à partir de la dynamique observée des consommations à Dakar fera ressortir que les modèles à vitesse de convergence constante sont les plus adaptés à la simulation de la dynamique des parts, tout en étant les plus simples.

Analyse informelle des données

Des données de deux types seront utilisées pour estimer les paramètres des modèles de la dynamique des parts : les parts des combustibles de 1974 à 1990 à Dakar, estimées à partir des ventes de gaz, et les parts des combustibles par standing, en 1987 et 1989, obtenues à partir des résultats d'enquête. Ces données ne permettent pas de retracer l'évolution des parts du bois. Les consommations de ce combustible marginal (environ 2 % en 1987 et en 1989) seront confondues avec celles de charbon, ce qui réduit le nombre de variantes considérées à trois : gaz traditionnel (Trad), gaz populaire (GPop) et combustibles ligneux (Lign).

Les parts des combustibles de 1974 à 1990 à Dakar

D'après les enquêtes MASENS, les ménages de Dakar consommaient en 1989 90,9 % du gaz traditionnel, 88,3 % du gaz en bouteilles de 6 kg (Nopalé) et 52,5 % du gaz en bouteilles de 2,7 kg (Blip) vendu au Sénégal (cf. tableau 5.12). En faisant l'hypothèse que ces proportions sont restées constantes pendant toute la période 1974-1989, on peut calculer l'évolution des consommations domestiques de gaz à Dakar à partir des chiffres de vente nationaux fournis par

les distributeurs⁵¹. D'autres hypothèses (cf. Annexe 5.4) permettent de calculer à partir de là l'évolution des parts des combustibles dans la consommation globale d'énergie utile.

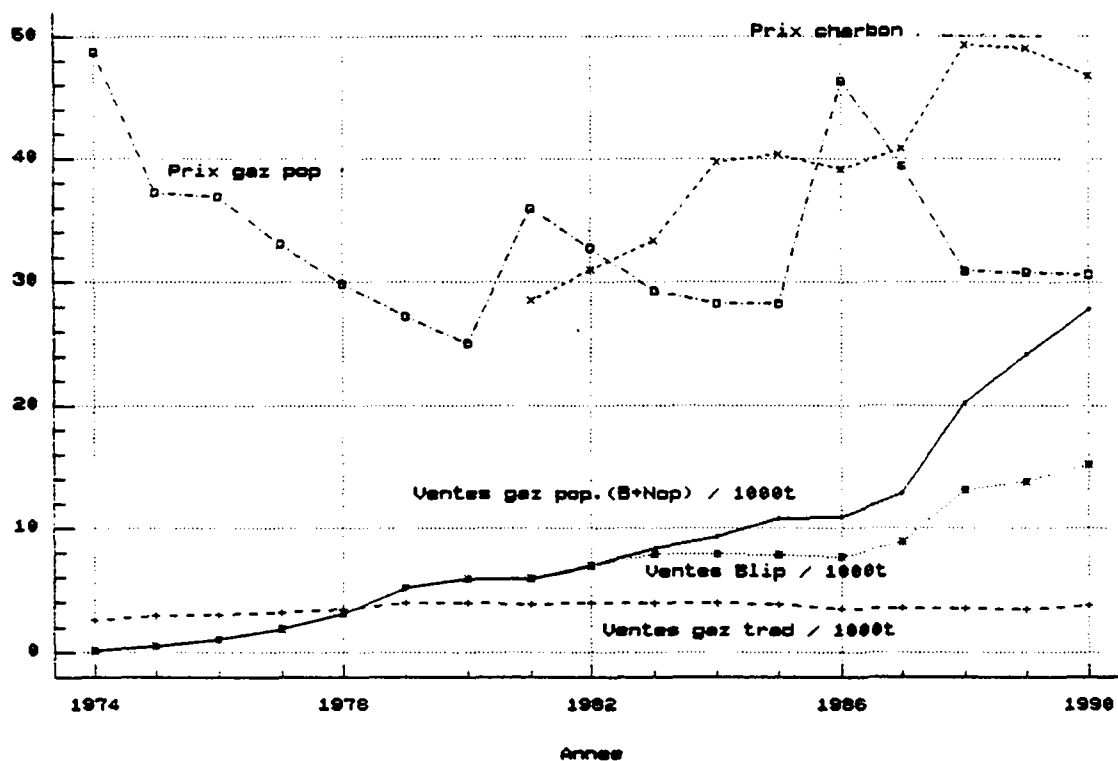


Fig. 5.7 Evolution des ventes nationales de gaz et des prix de l'énergie utile
(1 unité = 0,05 F¹⁹⁶⁷ / MJ) à Dakar Sources : cf. Annexe 5.4

La figure 5.7 permet de constater, préalablement à toute recherche de lois quantitatives, que les consommations de gaz populaire ont bien réagi aux variations des prix dans le sens attendu : en 1981 et en 1986, lorsque les prix du gaz populaire ont brusquement augmenté, les ventes ont marqué un palier. Plus généralement, la vitesse à laquelle ont augmenté les ventes de gaz populaire a varié, entre 1981 et 1990, en sens inverse de l'écart entre le prix à l'énergie utile du gaz populaire et celui de son principal concurrent, le charbon. Cette observation est le reflet du

⁵¹ Cette estimation n'est certainement pas très exacte, mais il n'y a guère d'alternative.

caractère dynamique des processus de choix. Elle laisse présager que les écarts des prix à l'énergie utile joueront un rôle très important dans les modèles de la dynamique des parts⁵².

Les parts des combustibles par standing, en 1987 et 1989

Les parts des combustibles obtenues à partir des chiffres des ventes de 1974 à 1990 sont des parts tous standings confondus. Seules les parts par standing de 1987 et 1989 permettront de mesurer à quel point les modèles reflètent bien les relations entre standing et choix des équipements.

La méthode d'estimation des paramètres

Un indicateur de la qualité d'ajustement d'un modèle de la dynamique des parts appliqué au cas de Dakar devrait refléter la faculté du modèle de prévoir ex-post tant l'évolution des parts globales de 1974 à 1990 que les parts par standing en 1987 et 1989.

La méthode suivante a été retenue pour mesurer la qualité de l'ajustement avec un ensemble donné de valeurs des paramètres:

- 1) Prévision ex-post de la série des parts par standing de 1974 à 1989;
- 2) Calcul de E, mesure de la qualité de l'ajustement, définie par:

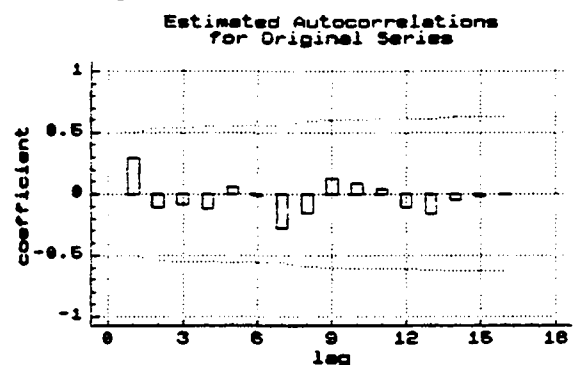
$$E = \sum_{k=2}^{Nk} [EDyn(k) + E87(k) + E89(k)]$$

avec :

$$EDyn(k) = \sum_{t=t_0+1}^{Nt} (p^{dyn}_{tk} - \hat{p}_t(k))^2$$

⁵² Seuls les écarts de prix de l'année t seront utilisés pour estimer l'évolution des parts, l'année t. On peut se demander s'il ne subsiste pas, dans le comportement des consommateurs de l'année t, une influence des prix passés, qui se traduirait par des autocorrélations des variations des parts.

Les coefficients d'autocorrélation des variations de la part du gaz populaire (le groupe d'équipements dont la part a connu l'évolution la plus mouvementée) sont représentés ici. Même l'autocorrélation relativement importante d'ordre 1, qui peut d'ailleurs s'expliquer par l'autocorrélation d'ordre 1 des variables explicatives (Δ prix), n'est pas significative (les deux lignes en pointillés délimitent approximativement un intervalle de confiance à 95 %).



$$E87(k) = \sum_{s=1}^{N_s} (p_{sk}^{87} - p_{s1987}(k))^2$$

$$E89(k) = \sum_{s=1}^{N_s} (p_{sk}^{89} - p_{s1989}(k))^2$$

p_{tk}^{dyn} , p_{sk}^{87} , p_{sk}^{89} : valeurs observées

$\bar{p}_t(k)$, $p_{s1987}(k)$, $p_{s1989}(k)$: parts données par le modèle. ($\bar{p}_t(k)$: moyenne tous standings.)

Les carrés des erreurs sont utilisés pour pénaliser les grands écarts⁵³. La somme sur k n'est faite que de 2 à N^k car l'erreur sur l'une des variantes est toujours déterminée par celles des autres variantes.

Les valeurs estimées des paramètres d'un modèle seront celles qui minimisent E .

Nous ne disposerons pas de tests statistiques pour juger de la significativité des paramètres. Pour cette raison, le nombre de paramètres sera maintenu aussi bas que possible. Tant que le nombre de paramètres ne dépassera pas deux (pas plus que dans une simple régression linéaire), et que le modèle expliquera de façon satisfaisante une "Part" aux dimensions temps, standing et groupe d'équipements, la significativité des paramètres ne devrait pas être en cause.

Les parts données par le modèle sont calculées par simulations ex-post à partir d'un ensemble de valeurs initiales $p_{st_0}(k)$ pour différentes valeurs des paramètres du modèle. Les valeurs des paramètres retenues sont celles qui minimisent E .

Application d'un modèle à vitesse de convergence constante au cas de Dakar

Spécification du modèle

Puisqu'une distinction de classes de taille de ménage ne se justifie pas du point de vue des objectifs de la modélisation (cf. § 5.1.1), il n'en sera pas fait. La variable explicative "taille des ménages" ne sera par conséquent plus utilisée au niveau des modèles dynamiques. La spécification générale sera alors :

⁵³ Leur utilisation n'a pas de justification théorique fondée sur des hypothèses de distribution des erreurs, comme dans le cas de l'estimateur des moindres carrés appliqué à la régression linéaire. Ici, deux erreurs successives ($p_{tk}^{dyn} - \bar{p}_t(k)$ et $p_{t+1k}^{dyn} - \bar{p}_{t+1}(k)$) sont fortement corrélées. En fait, nous pouvons considérer que toute la série des valeurs observées ne forme qu'une seule observation.

Pour pouvoir considérer que deux erreurs successives sont indépendantes, il faudrait travailler sur des différences de parts observées. Seulement, le modèle travaille au niveau des standings, et il faudrait pouvoir disposer de parts observées par standing.

$$\bar{V}_{st}(k) = \beta_{ok} + \beta_1 \frac{\Delta \text{prix}_{kt}}{\text{Depenses}_s} \quad \text{pour } k \neq \text{Char}$$

$$\bar{V}_{sk}(\text{Char}) = 0$$

Certains des paramètres β_{ok} - ou tous - pourront être nuls.

Le signe attendu de β_1 est négatif.

Le terme de β_1 est censé traduire l'impact des critères financiers sur le choix, alors que β_{ok} devrait représenter la différence d'utilité (avec la variante de référence, Char) à prix égaux. Si l'on admet que les cuisinières à gaz procurent un confort accru, le signe de $\beta_{o\text{Trad}}$ devrait être positif. En revanche, il n'y a pas de raison de penser que les ménagères sénégalaises préfèrent nettement les réchauds à gaz populaire aux foyers à charbon, à prix égaux. $\beta_{o\text{GPop}}$ sera supposé nul⁵⁴.

Le modèle CERY : $\beta_{o\text{Trad}} = 0$

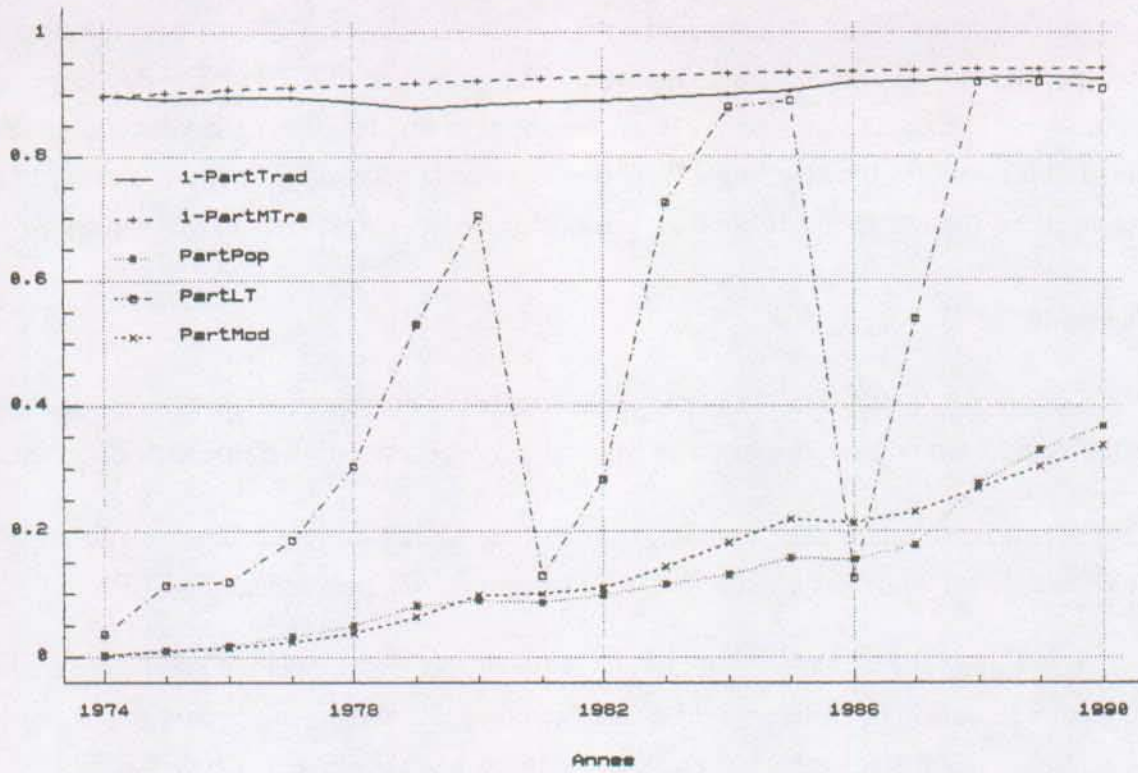
Ce modèle ne contient que deux paramètres : β_1 et la vitesse de convergence C. L'estimation des paramètres donne :

$$\begin{aligned} \beta_1 &= -48,6 \cdot 10^3 & C &= 0,0534 \\ E &= 0,0472 & & (\Delta \text{prix en F}^{1990}/\text{MJ}) \end{aligned}$$

Les parts simulées du gaz traditionnel et du gaz populaire suivent d'assez près les parts observées (figure 5.8). Les points d'inflexion simulés du gaz populaire notamment se situent aux mêmes dates que les points d'inflexion observés. Ils reflètent les variations de tendance des prix, dont les effets sont beaucoup plus nets encore dans la courbe des parts à long terme. Ainsi, les augmentations des prix du gaz populaire de 1981 et 1986 ont fait chuter la part d'équilibre à long terme⁵⁵ à des valeurs proches de la part "actuelle", ce qui a eu pour effet la stagnation de la part actuelle.

⁵⁴ On pourrait songer à utiliser un paramètre $\beta_{o\text{GPop}}$ négatif pour traduire les effets de la nécessité de réaliser un investissement initial considérable lors du passage au gaz populaire. Nous y reviendrons au paragraphe 5.3.5.

⁵⁵ En toute rigueur, il faudrait raisonner sur les parts (au pluriel) par standing



PartTrad, PartPop : parts observées du gaz trad. et du gaz pop.
 PartMTra, PartMod : parts simulées du gaz trad. et du gaz pop.
 Part LT : part simulée d'équilibre à long terme du gaz pop.

Fig. 5.8 Modèle CERY : Evolution observée et évolution simulée des parts 1974 à 1990

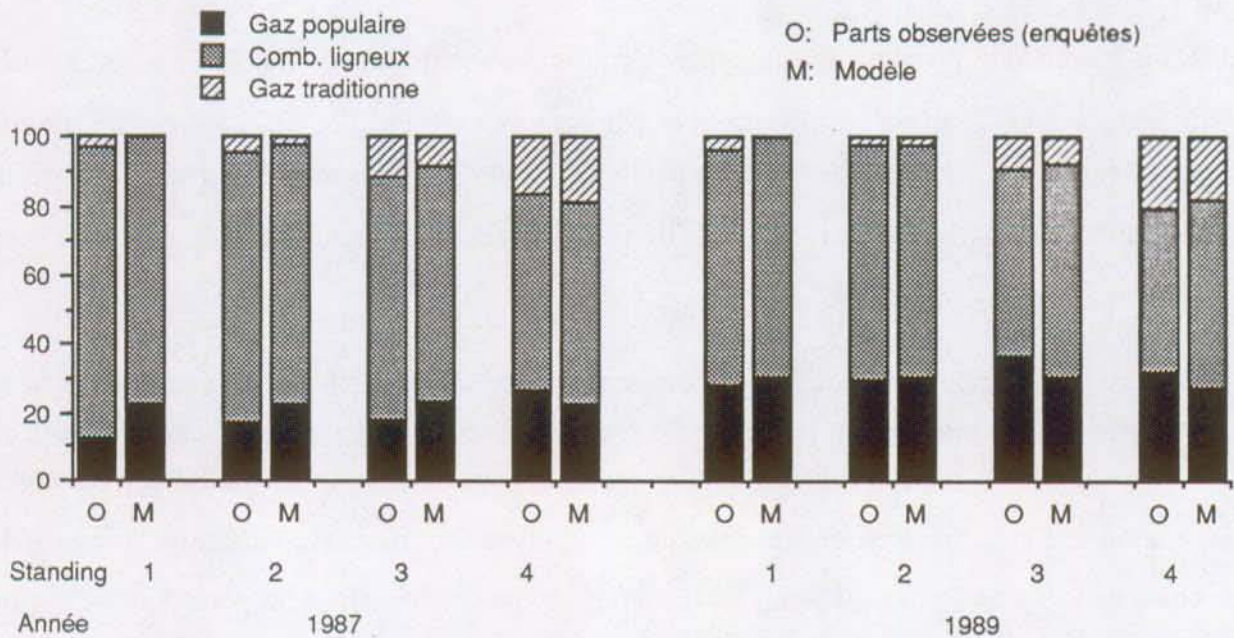


Fig. 5.9 Modèle CERY : parts observées et simulées par standing en 1987 et 1989

L'augmentation de la part du gaz traditionnel avec le standing est fidèlement représentée par le modèle, en 1987 comme en 1989 (figure 5.9). Par contre, en 1987, les parts du gaz populaire données par le modèle sont à peu près uniformes, alors que les parts observées sont nettement plus faibles pour les bas standings. Il est possible que la nécessité d'épargner avant l'achat de l'équipement (non prise en compte dans le modèle) ait découragé les ménages pauvres.

Le modèle CERX : $\beta_{oTrad} > 0$

Sur la figure 5.8, la part simulée du gaz traditionnel reste constamment un peu en dessous de la part observée. On pourrait penser qu'un paramètre β_{oTrad} permettrait d'améliorer cette situation.

Cependant, l'estimation des paramètres du modèle CERX correspondant ne fait apparaître qu'une faible baisse de E, qui passe à 0,0459 (depuis 0,0472 pour le modèle CERY).

Il se trouve que l'augmentation générale de l'utilité du gaz traditionnel fait surtout croître la part du gaz traditionnel chez les ménages de haut standing. Parallèlement, la part du gaz populaire décroît chez ces mêmes ménages en l'éloignant des parts observées. De ce fait, la baisse du terme EDyn(Trad) de E est rapidement compensée par l'augmentation des termes E87(k) et E89(k). Pour ces raisons l'introduction du paramètre β_{oTrad} n'est pas apte à augmenter sensiblement la qualité de l'ajustement.

5.3.4 Les modèles à vitesse de convergence variable

Dans les modèles à vitesse de convergence constante, une différence $\bar{p}_{st}(k) - p_{st-1}(k)$ donnée produit toujours le même accroissement de part $\Delta p_{st}(k) = C (\bar{p}_{st}(k) - p_{st-1}(k))$, quelle que soit la valeur de $p_{st-1}(k)$. Or, on peut s'attendre à ce que les consommateurs réagissent plus rapidement ($\Delta p_{st}(k)$ élevé) lorsque la différence $\bar{p}_{st}(k) - p_{st-1}(k)$ correspond à un grand écart d'utilités $\bar{V}_{st}(k) - V_{st-1}(k)$ ⁵⁶.

Deux types de modèles à vitesse de convergence non-constante seront développés dans ce paragraphe. Les modèles du premier type sont des modèles logistiques donnant les parts de l'année courante à partir d'utilités courantes $V_{st}(k)$ qui convergent vers les utilités à long terme \bar{V} selon une loi à préciser. Les modèles du second type sont basés sur l'idée que la vitesse de convergence $\Delta p_{st}(k) / (\bar{p}_{st}(k) - p_{st-1}(k))$ devrait être proportionnelle à la "perte d'utilité", sorte

⁵⁶ Les utilités courantes $V_{st}(k)$ sont les utilités qui, dans un modèle logistique, donneraient les parts $p_{st}(k)$.

de manque à gagner que subissent les consommateurs tant que leurs choix ne correspondent pas aux utilités à long terme.

Leur application au cas de Dakar fera cependant ressortir le manque d'adéquation de ces modèles à vitesse de convergence variable.

Les modèles logistiques à utilités convergentes

Réécrivons la formule de base des modèles logistiques en remplaçant les valeurs à long terme par des valeurs courantes :

$$p_{st}(k) = \frac{e^{V_{st}(k)}}{\sum_{l=1}^{Nk} e^{V_{st}(l)}}$$

Cette formule permet de calculer les parts courantes $p_{st}(k)$ à partir d'utilités courantes $V_{st}(k)$. On peut supposer que ces utilités courantes convergent vers des utilités à long terme $\overset{\infty}{V}_{st}(k)$:

$$V_{st}(k) = V_{st-1}(k) + g(\Delta \overset{\infty}{V}_{st}(k)) \quad \text{avec} \quad \Delta \overset{\infty}{V}_{st}(k) = \overset{\infty}{V}_{st}(k) - V_{st-1}(k)$$

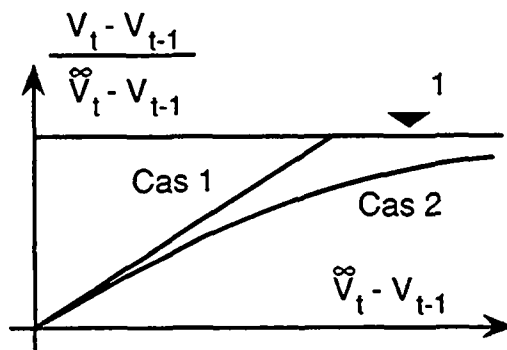
Deux formulations simples de g peuvent être trouvées en supposant que la vitesse de convergence de l'utilité, $(V_{st}(k) - V_{st-1}(k)) / (\overset{\infty}{V}_{st}(k) - V_{st-1}(k))$, varie soit linéairement, soit selon une exponentielle négative avec l'écart à combler $\overset{\infty}{V}_{st}(k) - V_{st-1}(k)$, (voir schéma).

Dans le premier cas,

$$g(\Delta \overset{\infty}{V}) = \mu \cdot \Delta \overset{\infty}{V}^2$$

Dans le second cas,

$$g(\Delta \overset{\infty}{V}) = \Delta \overset{\infty}{V} (1 - e^{-\nu \Delta \overset{\infty}{V}})$$



Dans les deux cas, l'apparition, une année t , d'une nouvelle technologie l , pose un problème, car pour cette technologie $p_{st-1}(l) = 0$, d'où " $V_{st-1} = -\infty$ ".

Dans les deux cas, l'application au cas de la dynamique des parts à Dakar a donné des résultats décevants : les modèles sans $\beta_0(\text{Trad})$ n'ont pas permis de faire baisser E au-dessous de 0,1718 (rappel : 0,0472 pour le modèle CERY). De plus, l'apparition d'une nouvelle technologie ne peut pas être modélisée avec les formulations de g établies ci-dessus, qui devraient être modifiées par l'ajout d'un paramètre supplémentaire.

Les modèles à vitesse de convergence augmentant avec la "perte"

Reprenons la théorie des choix discrets avec maximisation de l'utilité par les décideurs (§ 5.3.2). Si nous supposons que l'utilité n'est maximisée qu'à long terme, alors les variantes choisies par les consommateurs à un moment donné ont une utilité inférieure à l'utilité maximum. L'écart moyen, pour une classe de ménages, entre l'utilité courante et l'utilité à long terme sera appelée la "perte d'utilité". Il représente ce que ces ménages perdent en utilité lorsqu'ils renoncent à adapter immédiatement leurs choix à l'évolution de l'utilité à long terme.

$$\text{Soit : } \text{Perte}_{st} = \overset{\infty}{V}\text{Max}_{st} - V\text{Max}_{st}$$

$$\text{avec } V\text{Max}_{st} = V\text{MaxFic} + \sum_l P_{st-1}(l) \cdot (\overset{\infty}{V}_{st}(l) - V_{st-1}(k))$$

$$V\text{MaxFic}_{st} = \ln \sum_l e^{V_{st-1}(l)}$$

$$\overset{\infty}{V}\text{Max}_{st} = \ln \sum_k e^{\overset{\infty}{V}_{st}(k)}$$

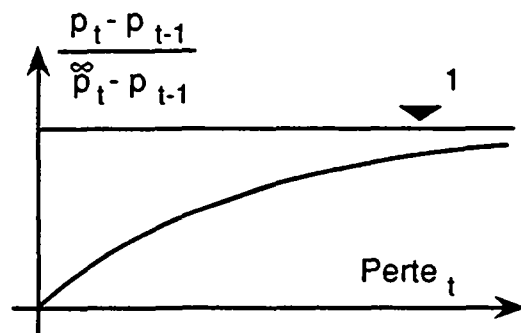
Une interprétation des termes $V\text{MaxFic}_{st}$, $V\text{Max}_{st}$ et $\overset{\infty}{V}\text{Max}_{st}$ est donnée à l'annexe 5.5. Elle permet de comprendre pourquoi la variable Perte_{st} définie ci-dessus est une approximation de la "perte d'utilité" moyenne de la classe de ménages s.

On peut supposer que les ménages adapteront d'autant plus vite leurs choix aux utilités à long terme que Perte_{st} est grand. Autrement dit, la vitesse de convergence des parts $C_{St}^* = \Delta p_{st}(k) / (\overset{\infty}{p}_{st}(k) - p_{st}(k))$ devrait croître avec Perte_{st} , et tendre vers 1 lorsque Perte_{st} tend vers l'infini.

En choisissant une exponentielle négative pour représenter la relation entre C_{St}^* et Perte_{st} (schéma ci-contre), on obtient les modèles du type :

$$p_{st}(k) = p_{st-1}(k) + C_{St}^* (\overset{\infty}{p}_{st}(k) - p_{st-1}(k))$$

$$\text{avec } C_{St}^* = 1 - e^{-\alpha \cdot \text{Perte}_{st}} \quad \text{où } \alpha \text{ est un paramètre.}$$



L'application des modèles de ce type au cas de la dynamique des parts à Dakar a donné des résultats (Valeurs de $\overset{\infty}{V}_{st}(k)$ et qualité de l'ajustement) très proches de ceux obtenus avec les modèles logistiques à utilités convergentes, donc tout aussi décevants. Les résultats présentés

ci-dessous permettent de déceler les raisons du manque d'adéquation des modèles à vitesse de convergence variable.

Le manque d'adéquation des modèles à vitesse de convergence variable

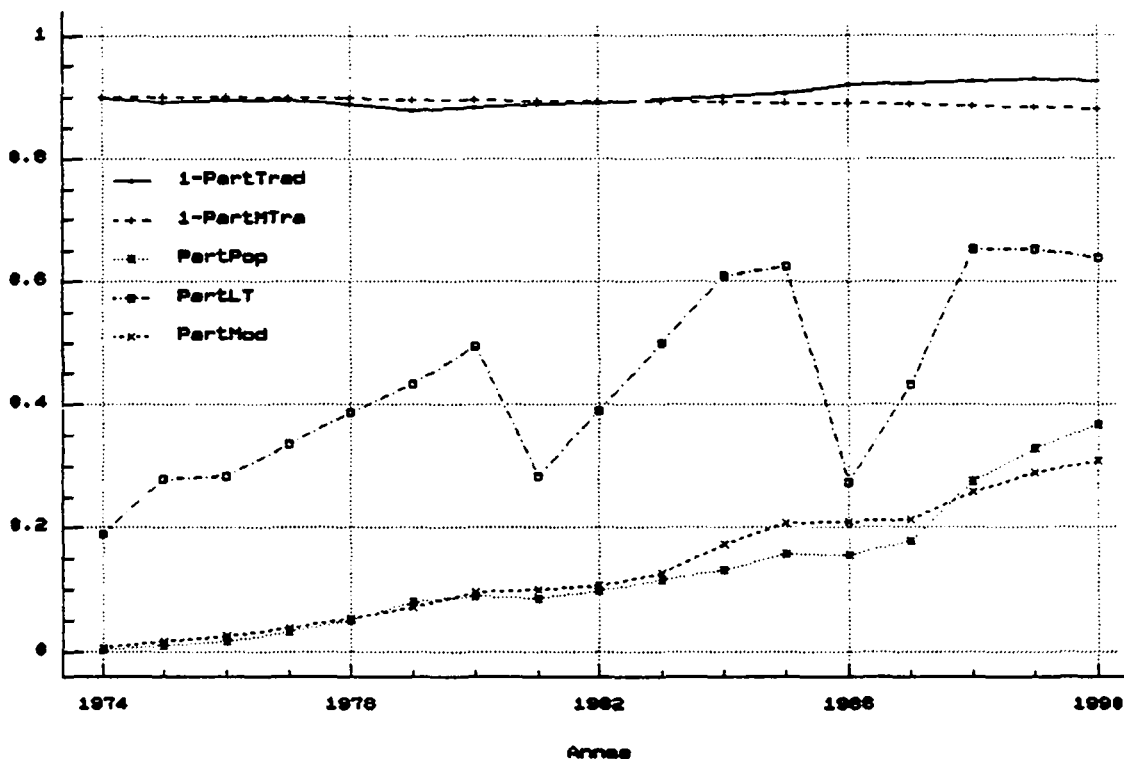


Fig. 5.10 Modèle EERY : évolution observée et évolution simulée des parts 1974-1990 (légende : voir fig. 5.8)

La figure 5.10 montre les parts estimées et les parts observées pour un modèle (modèle EERY) du dernier type présenté ci-dessus, avec $\beta_{0\text{Trad}} = 0$. On remarque immédiatement que les variations de la part à long terme du gaz populaire (PartLT) sont beaucoup plus atténuées que dans le cas du modèle CERY (fig. 5.8), ce qui est dû à la valeur plus faible de β_1 :

$$\begin{aligned} \beta_1 &= -10,5 \cdot 10^3 \\ \alpha &= 0,1107 \\ E &= 0,1990 \end{aligned}$$

En raison de la faible valeur de β_1 , l'utilité à long terme du gaz traditionnel est plutôt élevée, et la part simulée du combustible croît régulièrement, en s'écartant de plus en plus de la part observée.

Pour ramener la part simulée du gaz traditionnel vers sa part observée on pourrait introduire un paramètre $\beta_{0\text{Trad}}$ non-nul. Mais la valeur de $\beta_{0\text{Trad}}$ serait négative, ce qui est incompatible avec une interprétation satisfaisante de la signification de ce paramètre.

Par ailleurs, l'évolution peu contrastée de la part à long terme du gaz populaire, à l'origine de laquelle se trouve également la faible valeur de β_1 , conduit dès 1988 à une sous-estimation croissante de la part de ce combustible.

Il semble donc que les valeurs faibles de β_1 , obtenues avec les modèles à vitesse de convergence variable, donnent de mauvaises estimations des parts d'équilibre à long terme, et que, par conséquent, les modèles à vitesse de convergence variable sont moins bien adaptés que les modèles à vitesse de convergence constante à la modélisation de la dynamique des parts.

5.3.5 La prise en compte de l'investissement

Un ménage, si convaincu soit-il des avantages de la cuisine au gaz populaire, ne peut faire l'acquisition d'un équipement Blip Banekh ou Nopalé que s'il dispose d'une somme d'argent égale au prix de cet équipement. Cette somme, qui s'élève à plus de 10'000 FCFA, représente près de la moitié du revenu mensuel moyen des ménages du standing le plus bas. Il est clair que dans ces conditions l'investissement initial freine la diffusion du nouveau combustible.

Un modèle permettant une bonne représentation des effets de l'investissement initial sur la dynamique des parts sera développé dans ce paragraphe. Son application au cas de Dakar a donné d'excellents résultats.

Les inconvénients d'une "désutilité" constante

Une première tentative de modélisation des effets de l'investissement initial peut être faite en ajoutant soit une constante négative, soit un terme négatif $C_k^i/\text{Depenses}_s$ (variant avec le standing) à l'utilité du combustible. L'addition d'un paramètre C_{GPop}^i au modèle CERY a permis de faire passer E de 0,0472 à 0,0321, ce qui représente une amélioration relative considérable de la qualité de l'ajustement.

Cependant, la soustraction d'un terme constant dans le temps à l'utilité présente un grave défaut : elle fera diminuer la valeur de l'utilité du combustible de la même quantité quelle que soit la part des ménages déjà équipés. Or, les ménages déjà équipés ne ressentent aucune "désutilité" du fait de devoir investir. Par conséquent, si la part d'un groupe d'équipement k progressait dans les données qui ont servi à estimer un paramètre C_k^i , le modèle contenant C_k^i ne devrait pas être utilisé pour représenter une régression de la part de k .

Le modèle présenté ci-dessous permet d'éviter les problèmes de ce type.

Un modèle de la dynamique des parts tenant compte de l'investissement

Formulation du modèle

Soient les deux utilités suivantes :

$$\overset{\infty}{V}_{st}(k) = \vec{\beta} \cdot \vec{x}$$

$$V_{st}^i(k) = \overset{\infty}{V}_{st}(k) - \gamma \cdot \frac{\text{Invest}_t(k)}{\text{Depenses}_s}$$

$\text{Invest}_t(k)$, montant de l'investissement initial nécessaire à l'acquisition de l'équipement k , ne fait pas partie du vecteur de variables explicatives \vec{x} .

Soient $\overset{\infty}{p}_{st}(k)$ les parts associées aux utilités $\overset{\infty}{V}_{st}(k)$.

- Si $\overset{\infty}{p}_{st}(k) \leq p_{st-1}(k)$, posons :

$$V_{st}^{MT}(k) = \overset{\infty}{V}_{st}(k)$$

- Si $\overset{\infty}{p}_{st}(k) > p_{st-1}(k)$, posons :

$$V_{st}^{MT}(k) = \frac{p_{st-1}(k)}{\overset{\infty}{p}_{st}(k)} \overset{\infty}{V}_{st}(k) + \frac{\overset{\infty}{p}_{st}(k) - p_{st-1}(k)}{\overset{\infty}{p}_{st}(k)} V_{st}^i(k)$$

Soient $p_{st}^{MT}(k)$ les parts associées aux utilités $V_{st}^{MT}(k)$:

$$p_{st}^{MT}(k) = e^{V_{st}^{MT}(k)} / \sum_{l=1}^{Nk} e^{V_{st}^{MT}(l)}$$

Remplaçons maintenant les part $\overset{\infty}{p}$ par les parts p^{MT} dans un modèle à vitesse de convergence constante :

$$P_{st}(k) = P_{st-1}(k) + C (p_{st}^{MT}(k) - P_{st-1}(k))$$

Cette équation permet de calculer, d'année en année, l'évolution des parts.

Les paramètres du modèle sont $\vec{\beta}$, c et γ .

Interprétation

$\overset{\infty}{p}_{st}(k)$ peut être interprété comme une utilité à long terme, dans laquelle le montant de l'investissement initial n'est pas pris en compte.

Lorsque les parts d'équilibre à long terme qui lui sont associées tendent à faire progresser la part de l'équipement k (donc: $\overset{\infty}{p}_{st}(k) > p_{st-1}(k)$), $\overset{\infty}{p}_{st}(k)$ surévalue la part des besoins d'énergie utile que les ménages désirent réellement satisfaire à partir de k , en tenant compte du montant de l'investissement nécessaire. Pour cette raison, l'utilité de k est alors révisée à la baisse, et devient $V^{MT}_{st}(k)$, que l'on pourrait appeler l'utilité "à moyen terme" (d'où le signe MT).

Le modèle freine ainsi la progression des équipements coûteux; il représente donc bien les effets de la nécessité d'investir.

Application au cas de Dakar

L'estimation des paramètres du modèle EMRY, du type défini ci-dessus, avec $\beta_{oTrad} = \beta_{oGPop} = 0$, a donné les résultats suivants :

$$\begin{array}{lll} \beta_1 & = & - 26,8 \cdot 10^3 \\ C & = & 0,1001 \\ \gamma & = & 6,84 \quad (\text{Invest en F}^{1990}) \\ E & = & 0,0246 \end{array}$$

La qualité de l'ajustement, mesurée par E , est très sensiblement améliorée par rapport au modèle CERY ($E = 0.0472$). C'est la meilleure qui ait été obtenue avec tous les modèles essayés⁵⁷.

La haute qualité de l'ajustement est visualisée sur les figures 5.11 et 5.12. Côté évolution, la progression du gaz populaire est très bien suivie par le modèle. Un léger "ventre" de la courbe observée du gaz traditionnel entre 1978 et 1985, ne semble pas, en revanche, pouvoir être expliqué par les variables prises en compte. Côté parts par standing, le seul écart notable entre observations et modèle concerne la part du gaz populaire du standing 3. On peut cependant se demander si la valeur à incriminer n'est pas celle de l'observation : le saut de la part observée du gaz populaire entre 1987 et 1989, pour le standing 3, de 16,4 % à 37 % (cf. annexe 5.4), n'est-il pas très suspect ?

⁵⁷ En plus des modèles des types présentés aux paragraphes précédents, d'autres modèles représentant les effets de l'investissement initial ont été essayés

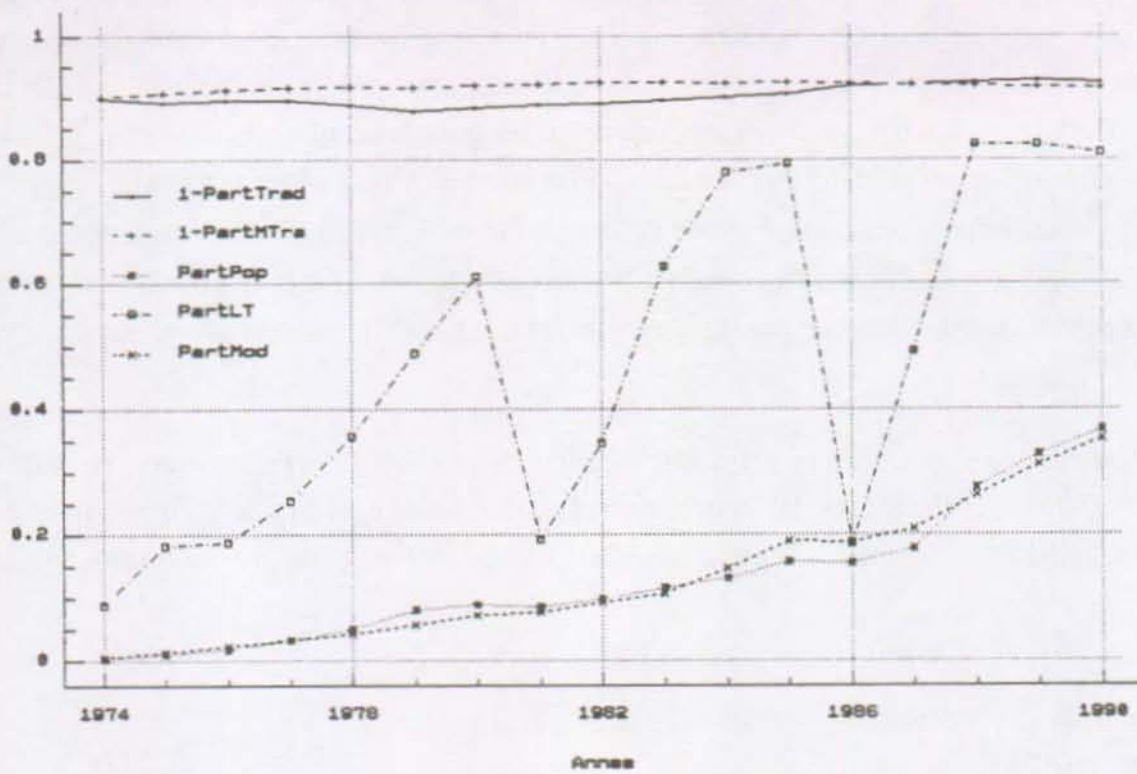


Fig. 5.11 Modèle EMRY : évolution observée et évolution simulée des parts 1974- 1990 (légende : voir fig. 5.8)

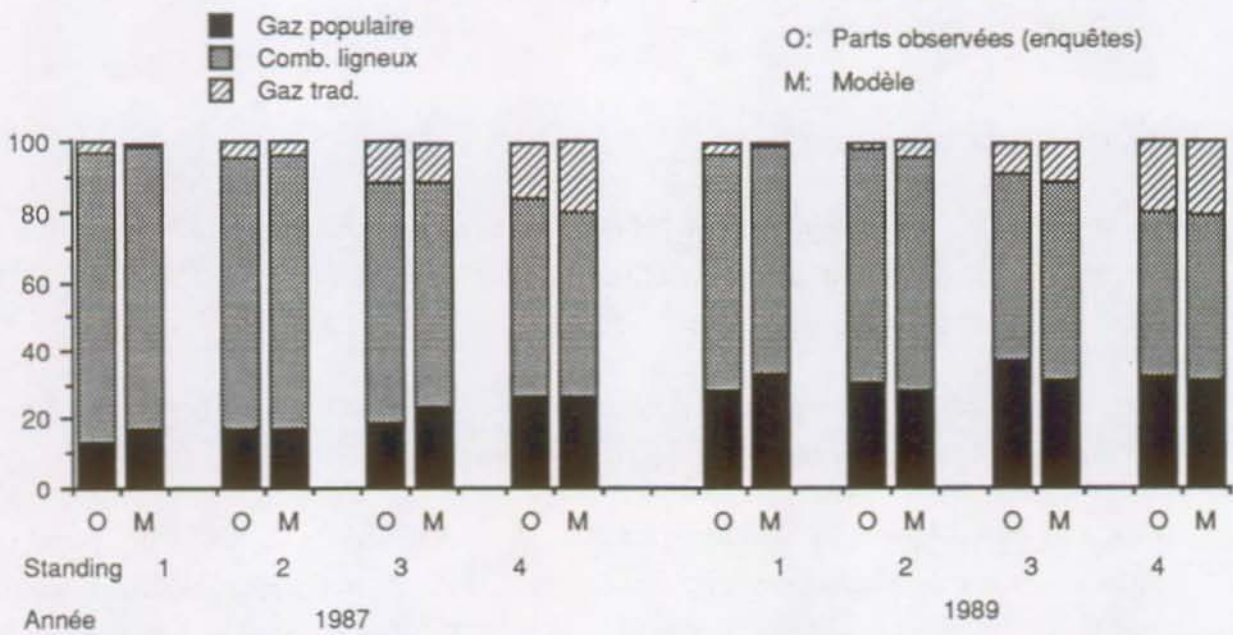


Fig. 5.12 Modèle EMRY : parts observées et simulées par standing en 1987 et 1989

Si les prévisions du modèle s'adaptent bien à la réalité observée, cela ne prouve pas encore que l'effet du montant de l'investissement initial a été mis en évidence. Seulement deux valeurs du montant de l'investissement initial ont été observées: celle du gaz traditionnel et celle du gaz populaire (ces deux montants ont été supposés constants au cours du temps). Dans ces conditions, le paramètre γ pourrait traduire les effets de phénomènes autres que l'influence de l'investissement initial, voire même des effets de phénomènes purement aléatoires (au sens statistique), étant donné l'absence de tests de significativité. Seules de nouvelles observations avec variation des montants des investissements initiaux permettraient une véritable validation du modèle.

Toutefois, en raison de la nette amélioration de la qualité de l'ajustement, en raison des considérations théoriques sur lesquelles est fondé le modèle, et en raison du bon signe de γ , il est fort probable que le modèle traduise effectivement l'influence de $Invest_t(k)$ sur les choix.

5.3.6 Sélection et généralisation d'un modèle

L'étude de la dynamique des parts des équipements à Dakar a donné naissance à une série de modèles qui pourraient être utilisés à des fins de simulation. L'analyse des performances de ces modèles sera approfondie pour le modèle qui aura été sélectionné. Le modèle sélectionné, qui ne représentera encore que la dynamique des parts à Dakar, devra ensuite être généralisé à l'ensemble du pays. Le paragraphe s'achèvera par un regard sur les limites du champ d'application du modèle obtenu.

Deux candidats remarquables

Dans la catégorie des modèles à deux paramètres le modèle CERY (§ 5.3.3) se distingue nettement, par la qualité de l'ajustement, des autres modèles qui ont été appliqués à la dynamique des parts à Dakar.

L'écart entre les parts observées et les parts simulées reste généralement inférieur à 2 % (en valeur absolue) et ne dépasse les 4 % que pour 4 observations sur 34.

Dans la catégorie des modèles à trois paramètres le modèle EMRY (§ 5.3.5), qui prend en compte le montant de l'investissement initial, tient le haut du pavé, réduisant de moitié la somme E des carrés des écarts par rapport au modèle CERY. Les écarts restent cette fois tous en dessous de 4 %.

La comparaison des figures 5.8 et 5.11 d'un côté, 5.9 et 5.12 de l'autre, fait ressortir la nette supériorité du modèle EMRY sur le plan de la qualité de l'ajustement. Ce modèle a par

conséquent de fortes chances de pouvoir donner des prévisions plus précises que le modèle CERY, et mérite d'être sélectionné.

Les réserves à l'égard de la signification du paramètre ne devront pas être oubliées. Par ailleurs, la haute précision apparente du modèle risque de masquer des défauts aux niveaux suivants:

- choix des variables explicatives
- structure⁵⁸
- estimation des paramètres

Examinons donc dans quelle mesure la structure du modèle, le choix des variables et l'estimation des paramètres sont satisfaisants ou, au contraire nous imposent de considérer l'excellente adéquation apparente avec prudence.

Les performances du modèle sélectionné

Une structure "intelligente"

De nombreuses connaissances ont été intégrées lors de l'élaboration de la structure du modèle. Certaines sont générales, comme la théorie des choix discrets, d'autres sont plus particulières à la problématique des combustibles domestiques, comme la relativisation des prix par le standing. L'intégration de ces connaissances a été faite dans le souci de représenter des relations "réelles", à caractère causal et non à caractère simplement corrélatif, et minimiser ainsi les risques d'erreurs de formalisation.

La bonne qualité de l'ajustement, eu égard au nombre de paramètres faibles, constitue en quelque sorte une validation de la formalisation.

Des variables à ne pas oublier

Les variables explicatives prises en compte (prix, montant de l'investissement initial, standing) sont des variables dont il était établi à l'avance qu'elles influençaient le choix des équipements (§ 5.3.1). D'autres variables, non prises en compte, ont cependant aussi une influence certaine sur le choix.

⁵⁸ Le modèle représente alors mal les relations entre les variables explicatives et les variables expliquées. Il risque de donner de mauvaises prévisions dans le cas où les variables explicatives sortent du domaine dans lequel elles évoluaient lors de l'estimation des paramètres

L'omission d'une variable explicative ne porte pas à conséquence lorsque cette variable n'est pas susceptible de varier dans des proportions importantes dans le domaine d'application du modèle.

- C'est le cas de la variable "taille du ménage" qui, comme il a été montré à l'aide des modèles désagrégés (§ 5.3.2), explique une partie de la dispersion des choix, mais qui n'a pas été retenue pour des raisons pratiques.
- C'est aussi le cas des caractéristiques des équipements qui n'ont pas été prises en compte, comme leur confort d'utilisation. Remarquons que l'introduction d'un paramètre y -relatif, dans le cas du gaz traditionnel ($\beta_{0\text{Trad}}$, modèle CERX), s'est avérée non probante. En cas de généralisation du modèle à un nouvel équipement, il sera toutefois prudent de songer aux effets possibles des caractéristiques "cachées" et de simuler éventuellement ces effets par l'introduction d'un paramètre β_0 non nul.
- La publicité en faveur d'un équipement est certainement la "variable explicative" non prise en compte la plus problématique. La publicité en faveur du gaz populaire n'a pas eu, en apparence, de répercussions majeures sur l'évolution des parts des combustibles entre 1974 et 1990, puisque cette évolution ne présente pas de variations que les autres variables n'aient pas pu expliquer. Cette apparence est vraisemblablement trompeuse, puisque l'on peut admettre que le niveau de la propagande est resté à peu près constant. Le principal effet d'une campagne de propagande étant généralement d'accélérer la diffusion d'un équipement, elle sera le mieux simulée par une modification du paramètre C , la vitesse de convergence des parts vers leur part d'équilibre à long terme.

Analyse de sensibilité des paramètres à certaines hypothèses

De nombreuses hypothèses sont sous-jacentes à l'estimation des paramètres (cf. annexe 5.4). Elles concernent les rendements, l'énergie utile par ménage, les parts des ventes de gaz consommées à Dakar, etc ...

Le modèle sélectionné est d'autant plus sensible aux écarts des prix à l'énergie utile que ces écarts sont proches de 0. Or, les écarts entre les prix du gaz populaire et du charbon oscillent précisément autour de zéro (fig. 5.7). Dans ce contexte, l'estimation des paramètres sera très sensible aux rendements relatifs du gaz populaire et du charbon.

Le tableau 5.14 donne les résultats d'une analyse de sensibilité des résultats de l'estimation vis-à-vis des rendements moyens des groupes d'équipements, pour le modèle CERY.

Cas	Rendements		Résultats de l'estimation		
	Gaz trad.	Gaz pop.	β_1	C	E
1	0,40	0,35	- 48,6 · 10 ³	0,0534	0,0472
2	0,35	0,35	- 52,7 · 10 ³	0,0521	0,0396
3	0,40	0,38	- 83,0 · 10 ³	0,0449	0,0626
4	0,40	0,32	- 38,5 · 10 ³	0,0647	0,0374

Tableau 5.12 Sensibilité des paramètres vis-à-vis des rendements, modèle CERY

Comme on pouvait s'y attendre, la variation de + 5 % sur le rendement du gaz traditionnel (cas 2) n'a eu que des conséquences mineures. Par contre, les variations de +/- 3 % du rendement du gaz populaire font varier sensiblement la valeur β_1 .

Cela ne veut pas nécessairement dire que les prévisions pour l'avenir faites avec les valeurs des paramètres du cas 1 seraient très mauvaises au cas où les rendements des cas 3 ou 4 correspondraient à la réalité⁵⁹. Par contre, le modèle deviendrait moins apte à représenter le choix en cas de fortes variations des variables explicatives.

Une autre conclusion que l'on peut tirer du tableau 5.14 est qu'il y a incertitude sur l'adéquation de la structure du modèle : Si le rendement du gaz populaire était de 0,38, E, l'indicateur de la qualité de l'ajustement, aurait une valeur notablement moins bonne. Inversement, si ce rendement était de 0,32, E aurait une valeur meilleure.

Généralisation du modèle dakarais

Le manque de données

Les modèles de la dynamique des parts ont été appliqués jusqu'ici uniquement au cas de Dakar. Pour cette ville, la constitution d'un ensemble "d'observations" passées a été possible grâce à des hypothèses faites sur les parts des ventes nationales de gaz consommées à Dakar. Etant donné que Dakar a toujours consommé la plus grande partie du gaz vendu, les erreurs devraient être restées modérées. Une démarche analogue serait inadmissible pour d'autres villes.

Si nous désirons néanmoins modéliser le comportement des consommateurs dans le reste du pays, en l'absence d'informations contradictoires, la meilleure hypothèse à faire est celle d'un comportement identique à celui de Dakar.

⁵⁹ Il ne faudrait pas, bien entendu, utiliser les valeurs des paramètres du cas 1 avec les rendements "réels".

La variante "bois"

La différence la plus importante entre le choix des équipements à Dakar et celui dans le reste du pays est certainement l'apparition d'une variante "bois" à part entière, devant être représentée séparément.

Si l'on admet que, à prix égaux, les consommateurs n'auront pas une préférence beaucoup plus forte ou plus faible pour le bois que pour les autres combustibles populaires (le charbon et le gaz populaire), on peut donner une valeur nulle au paramètre β_0 de la nouvelle variante. L'utilité à long terme s'écrit alors simplement :

$$\tilde{V}_{st}(\text{bois}) = \beta_1 \cdot \frac{\Delta \text{Prix}_{\text{Bois}_{st}}}{\text{Depenses}_s}$$

$\Delta \text{prix}_{\text{Bois}_t}$: écart entre les prix à l'énergie utile du charbon et du bois

Etant donné que l'investissement pour le foyer à trois pierres généralement utilisé est nul, l'utilité "à moyen terme" est la même :

$$V_{st}^{\text{MT}}(\text{Bois}) = \tilde{V}_{st}(\text{Bois})$$

Cependant, vu le manque de données, il sera prudent de construire aussi des scénarios avec β_0 bois non nul.

Dans le cas de Dakar, en généralisant le modèle EMRY à quatre variantes et en utilisant les mêmes valeurs des paramètres β_1 , C et γ , on peut calculer des parts d'équilibre à long terme pour les quatre combustibles.

En 1990, pour un standing "moyen" dont la moyenne de Depenses serait de 55 059 F¹⁹⁹⁰ (moyenne de Depense_s des standings 2 et 3), ces parts sont données au tableau 5.13.

Variante	\tilde{P} (4 variantes)	\tilde{P} modèle EMRY (3 variantes)
Charbon	2,8 %	2,8 %
Gaz trad.	2,2 %	2,2 %
Gaz pop.	94,0 %	95,0 %
Bois ⁶⁰	1,0 %	-

Tableau 5.13 Parts à long terme avec et sans la variante "Bois" pour Dakar, 1990

⁶⁰ Prix du bois utilisé : 26 F/kg (DIEME, KONE, LAURA; 1990)

Ce tableau permet deux constatations :

- La part à long terme du bois obtenue avec les valeurs des paramètres du modèle EMRY est assez réaliste. En effet, la part du bois observée moyenne des standings 2 et 3 se situait à 1,7 %, et l'usage du bois devient de plus en plus marginal.
- Les parts à long terme des autres combustibles ne subissent pas de grands changements lors de l'introduction de la variante "Bois", ce qui permet de conserver les valeurs des paramètres du modèle EMRY sans préjudice grave pour d'éventuelles prévisions des parts de ces autres combustibles.

Les limites de la modélisation

Les phénomènes à simuler

Paramètre	Phénomènes simulés	Valeur actuelle	Valeurs extrêmes ^{1/}
β_{ok}	Modification de la perception des caractéristiques des technologies non prises en compte	0	- 0,91 ... + 0,30
β_1	Sensibilités aux prix plus ou moins grandes	- 26,8 · 10 ³	- 35 · 10 ³ ... - 21 · 10 ³
γ	Sensibilité au montant de l'invest. initial +/- grande	6,84	5,0 ... 8,7
C	Vitesse de réaction +/- grande, p. ex. influence de la publicité	0,1001	0,084 ... 0,119

1/ Valeurs qui, avec les données disponibles (Dakar), multiplient la somme E des carrés des écarts par un facteur au plus égal à 2

Tableau 5.14 Phénomènes devant être simulés, par paramètre

Il a déjà été souligné que, en raison des défauts du modèle, certains phénomènes que le modèle est incapable de représenter devraient être simulés en faisant varier les valeurs des paramètres. Le tableau 5.14 énumère les plus importants de ces phénomènes et indique quel paramètre se prête le mieux à leur simulation.

La dernière colonne donne une idée de l'intervalle dans lequel il serait sage de laisser varier le paramètre si l'on souhaite que la qualité de l'ajustement pour les valeurs passées des parts à Dakar ne se dégrade pas trop.

Signalons encore une fois que l'aptitude du paramètre γ à représenter les effets du montant de l'investissement initial ne peut pas être garantie.

Les limites du domaine de variation des variables

Les phénomènes représentés par un modèle le seront d'autant mieux que les variables explicatives restent proches du domaine dans lequel elles variaient lors de l'estimation des paramètres.

Dans le cas des parts des combustibles à Dakar entre 1974 et 1990, le temps écoulé depuis le lancement du nouveau combustible gaz populaire reste relativement court, et les parts observées restent loin des parts d'équilibre à long terme. C'est la raison pour laquelle les parts d'équilibre à long terme simulées par les différents modèles sont assez différentes les unes des autres : 81,01 % pour le modèle CERY, 90,9 % pour le modèle EMRY (prix de 1990). L'estimation de la part d'équilibre à long terme du gaz populaire aux prix actuels doit donc être considérée assez imprécise.

Remarquons cependant la proximité de la valeur de β_1 dans le modèle EMRY (§ 5.3.5, $\beta_1 = - 26,8 \cdot 10^3$) avec celle obtenue à partir des seules parts du gaz traditionnel en 1987 (§ 5.3.2, $\beta_1 = - 22,0 \cdot 10^3$), qui est un bon signe.

Si le temps "ne va pas très loin" dans les parts observées, les prix ne prennent pas non plus des valeurs très contrastées. Il serait imprudent de vouloir prévoir, à l'aide du modèle obtenu, les réactions des consommateurs dakarois à un décuplement des prix du charbon. Seraient-ils vraiment toujours aussi lents à passer au gaz ? ⁶¹

⁶¹ La seule réaction prévisible est qu'ils feraient très fortement pression sur le gouvernement ou s'en prendraient à ceux qui, à leur yeux seraient les coupables

5.4 CONCLUSIONS SUR LA DYNAMIQUE DES CONSOMMATIONS

L'étude de la dynamique des parts des équipements à Dakar a permis d'élaborer un modèle aux performances remarquables. Avec seulement trois paramètres, il permet une représentation très satisfaisante d'un choix que l'on peut qualifier de tridimensionnel : ce choix porte en effet sur les parts de plusieurs équipements, pour différents standings, et il évolue dans le temps.

Comme nous l'avons vu, les performances du modèle dakarois doivent cependant être relativisées en raison de l'absence de certaines variables explicatives, en raison de la multitude d'hypothèses faites lors de l'estimation des paramètres, en raison du manque de tests statistiques adéquats et en raison de l'absence de données comparables à celles de Dakar pour le reste du pays.

Mais les principaux résultats de ce chapitre ne se situent pas au niveau des qualités d'ajustement obtenues. Ils se situent plutôt au niveau de la mise en évidence des relations formelles qui relient les consommations à leurs principales variables explicatives :

- Les prix de revient de l'énergie utile déterminent pratiquement à eux seuls quel serait à long terme, s'ils restaient constants, le principal combustible utilisé : le moins cher.
- Le standing du ménage est un modérateur de l'influence des prix. Le fait d'exprimer les prix ou les montants des investissements initiaux en proportion des dépenses ménagères mensuelles permet de tenir compte du standing sans en faire explicitement une variable explicative lors de la modélisation de la dynamique des parts.

Un standing élevé signifie par ailleurs une consommation d'énergie utile sensiblement plus élevée (entre les standings 1 et 4, à Dakar, l'écart entre les consommations moyennes est presque d'un facteur 1,5).

- La taille du ménage, lorsqu'elle baisse, fait évidemment diminuer la consommation d'énergie utile par ménage, mais à population constante, la consommation totale augmente.

Elle influence vraisemblablement aussi le choix des combustibles, mais il n'est pas exclu que son intervention dans les modèles ne traduise une relation purement corrélative, plutôt que causale.

- Une réserve du même type s'applique aussi à l'investissement initial. Ce dernier semble freiner la diffusion des nouveaux équipements, mais la significativité du paramètre correspondant n'a pas pu être testée.

Si l'on peut dire que les prix sont les moteurs de la dynamique des parts, on peut dire aussi que ces moteurs sont de faible puissance. Prenons la valeur de la constante C du modèle EMRY (§ 5.3.5) : 0,1001. Cette valeur signifie que si les consommateurs, en connaissance des prix et tenant compte des montants des investissements initiaux, jugent opportun de laisser augmenter

la part d'un combustible k de Δp_k jusqu'à une valeur p^{MTk} , alors la part du combustible k n'augmentera en un an que de 10 % de Δp_k . Et P^{MTk} est encore loin de la part d'équilibre à long terme, pour peu que le montant de l'investissement initial soit un rien décourageant.

Ces résultats ne sont pas sans influence sur la modélisation globale du marché :

- L'existence d'une relation de dépendance entre la consommation et l'offre à travers les prix est confirmée, et le lien en question a pu être formalisé et calibré.
- Le fait que la dynamique des parts soit lente est favorable à la recherche du point de fonctionnement du marché : les consommations de l'année précédente constituent une bonne approximation initiale des consommations de l'année courante, même en cas de forte variation des prix.
- Sur un autre plan, la mise en évidence des relations entre la consommation d'énergie utile et le standing et entre la dynamique des parts et le standing permet, grâce à la distinction des classes de consommateurs, de représenter les effets des politiques énergétiques à travers la hiérarchie des standings. Elle permet aussi d'évaluer les effets de différentes évolutions socio-économiques sur le système énergétique.

Il n'est cependant pas nécessaire d'attendre les résultats des simulations pour décrire, dans les grandes lignes, les incidences du comportement des consommateurs mis en évidence sur l'évolution future du système énergéico-forestier :

- L'importance des prix pour les consommateurs fait qu'il y a risque de progression du processus spatio-temporel de dégradation des ressources ligneuses, décrit au paragraphe 4.3.1: après épuisement des ressources proches d'un centre de consommation, le charbon tend à devenir meilleur marché que le bois. Les consommateurs adoptent alors bientôt le charbon comme combustible principal, et le déboisement, qui affecte des régions de plus en plus éloignées, s'en trouve accéléré.
- Pour prévenir ce risque, si le prix du charbon ne doit ou ne peut pas être élevé, un combustible de substitution meilleur marché que le charbon doit être proposé à temps aux consommateurs.
- Etant donné l'inertie constatée de la consommation, les actions visant à favoriser la substitution de combustibles n'ont d'effets bénéfiques sur l'évolution des ressources ligneuses qu'à long terme. Elles ne permettent pas d'arrêter à court terme des processus de dégradation en cours.

La dynamique de la consommation des combustibles domestiques au Sénégal est, en résumé, lente et - pour autant que les revenus restent bas - gouvernée par les prix. Remarquons que cela n'a rien d'étonnant : l'inertie des consommations d'énergie domestique est un phénomène bien connu sous toutes les latitudes. Quant au rôle prédominant joué par les prix, il n'est pas très surprenant à la lumière de la pauvreté du pays.

6 LE FONCTIONNEMENT DU MODELE GLOBAL

Les chapitres précédents ont permis de mettre au point des fonctions de production et de consommation, et de modéliser la dynamique des ressources ligneuses. Tous les composants du modèle d'ensemble du système énergéico-forestier sont donc disponibles. Il ne reste plus qu'à les assembler, et notamment à créer la jonction entre l'offre et la consommation, pour pouvoir effectuer des simulations de l'avenir énergétique et forestier du pays.

Ce chapitre se compose d'une partie théorique et d'une partie consacrée à des applications du modèle. Dans la première partie, nous nous pencherons sur la recherche de l'intersection entre l'offre et la consommation, puis sur les possibilités de validation du modèle obtenu. Dans la deuxième partie, le fonctionnement d'ensemble du modèle sera illustré à l'aide de quelques résultats de simulations.

6.1 MISE AU POINT DU MODELE GLOBAL

6.1.1 L'intersection offre-consommation

Définition du point de fonctionnement du marché (rappel)

La figure 6.1 reprend le schéma d'ensemble du système énergéico-forestier (fig. 2.3) en faisant ressortir l'interdépendance des prix et des quantités à travers les fonctions de production et de consommation. Ces fonctions ayant été définies aux chapitres précédents (chapitres 3 et 4 respectivement), il nous reste à trouver l'intersection de ces fonctions, le point de fonctionnement du marché.

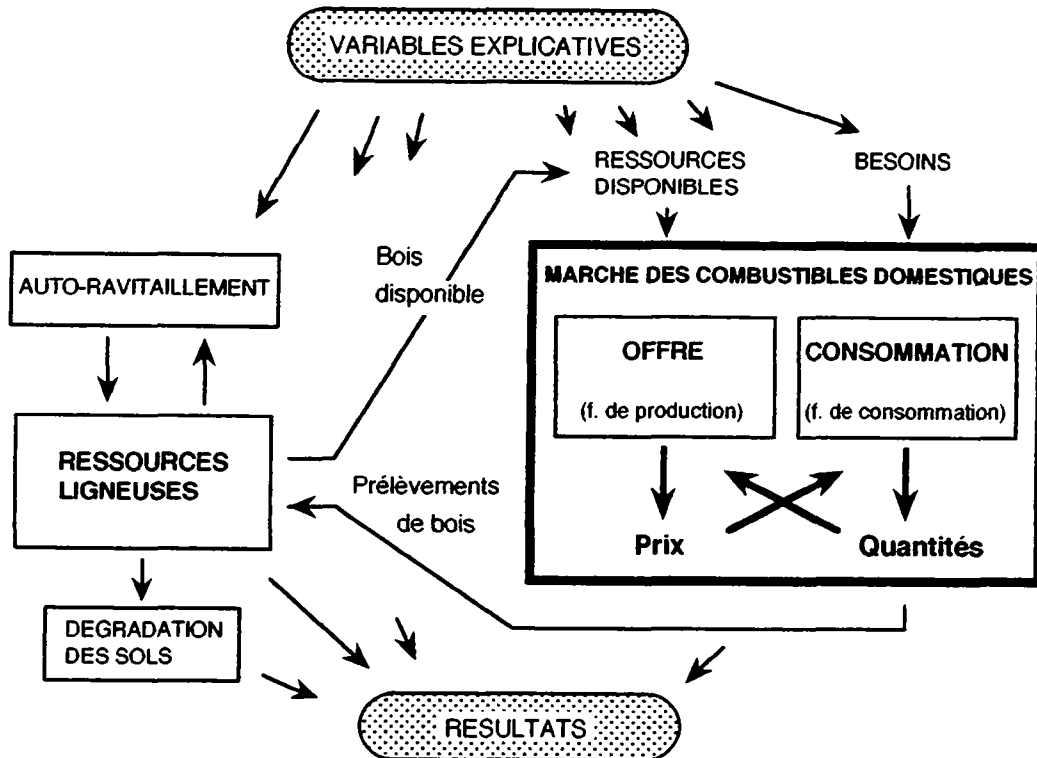


Fig. 6.1 Le marché dans le système énergétique-forestier

Le point de fonctionnement du marché peut être décrit par les équations (cf. § 2.2.2) :

$$(y_{1j}, \dots, y_{vj}, \dots) = f_j(p_{1j}, \dots, p_{vj}, \dots)$$

$$(p_{v1}, \dots, p_{vj}, \dots) = g_v(y_{v1}, \dots, y_{vj}, \dots)$$

y_{vj} : quantité consommée du combustible v en j

p_{vj} : prix du combustible v en j

f_j : fonction de consommation en j

g_v : fonction de production du combustible v

Remarquons que les fonctions de production du bois et du charbon sont liées au point de n'en constituer qu'une.

La figure 6.2 représente, à titre d'illustration, un ensemble de prix, de quantités consommées et de ressources en combustibles ligneux qui correspondent (approximativement) à un point de fonctionnement simulé. La représentation sous forme de cartes permet de visualiser la

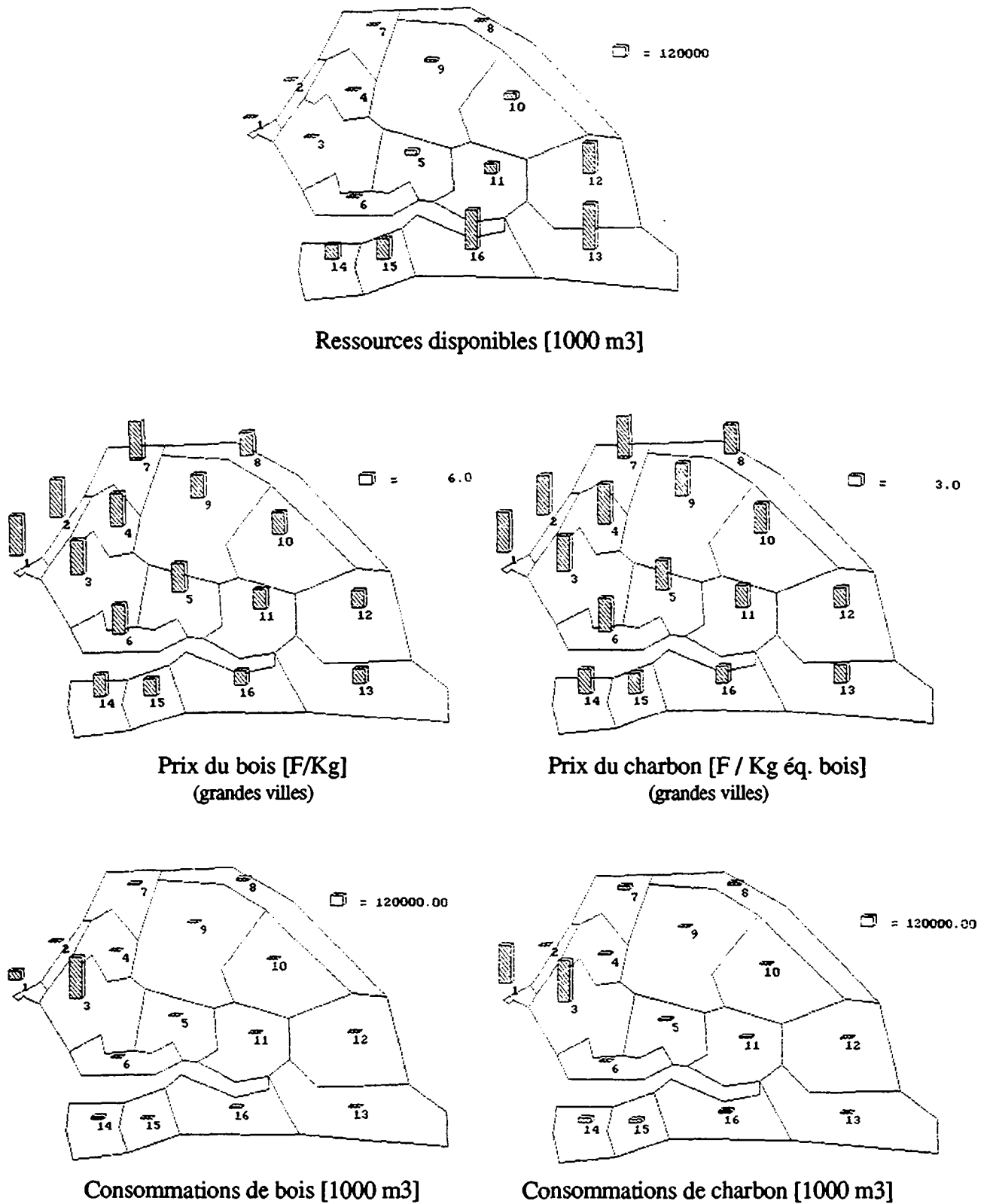


Fig. 6.2 Exemple de prix, quantités consommées et ressources en combustibles ligneux disponibles correspondant à un point de fonctionnement du marché (résultats d'une simulation pour l'an 2000 au Sénégal)

dimension spatiale de ces grandeurs. La méthode qui a été utilisée pour obtenir les valeurs représentées est celle qui sera exposée à la fin de ce paragraphe.

Notons aussi que dans le cas de l'existence de plusieurs marchés régionaux des combustibles ligneux, un ensemble d'équations comme celui donné ci-dessus peut être écrit pour chaque marché régional, c'est-à-dire que chaque marché régional peut être considéré comme un marché indépendant¹.

Pour simplifier l'écriture, nous pouvons utiliser une notation matricielle :

$$Y = f(P)$$

$$P = g(Y)$$

Une méthode itérative simple pour l'approximation du point de fonctionnement du marché est inspirée par la figure 6.1. Elle consiste à déterminer alternativement prix et quantités en partant de quantités initiales $y_{vj}^{(0)}$ qui constituent la matrice initiale des quantités $Y^{(0)}$.

On calcule d'abord

$$P^{(0)} = g(Y^{(0)})$$

$P^{(0)}$: première approximation des prix

puis $Y^{(1)} = f(P^{(0)})$

$Y^{(1)}$: approximation suivante des quantités

puis $P^{(1)} = g(Y^{(1)})$

$P^{(1)}$: approximation suivante des prix

et ainsi de suite.

Nous verrons cependant que cette méthode ne converge pas nécessairement, en raison des discontinuités des fonctions de production.

¹ Cette représentation des marchés régionaux suppose que :

- 1- Les fonctions de consommation de chaque marché régional sont indépendantes - ce qui semble évident.
- 2- Les fonctions de production des combustibles ligneux de chaque marché régional sont indépendantes - ce qui est garanti par la définition des marchés régionaux.
- 3- Les fonctions de production des autres combustibles sont indépendantes (d'un marché à l'autre). Cette dernière condition sera généralement vérifiée pour les combustibles dont les prix sont peu sensibles aux quantités consommées, ce qui est le cas pour le gaz et le kérosène.

Les discontinuités des fonctions de production

L'origine des discontinuités

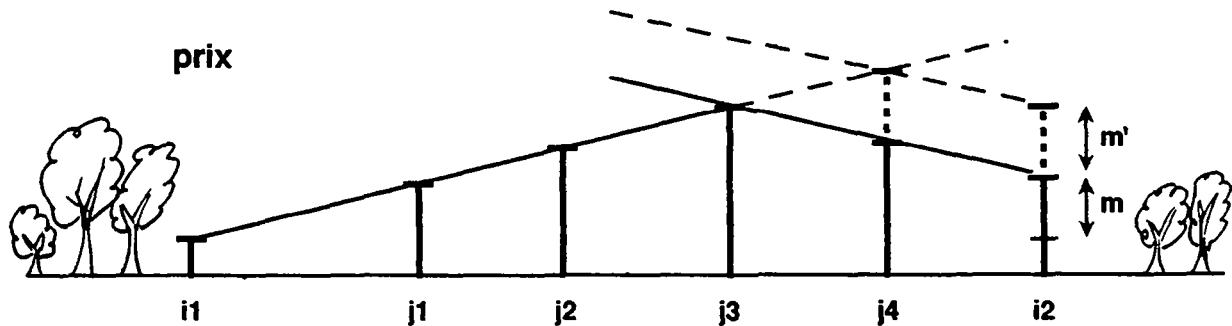


Fig. 6.3 Variations brusques des prix sur un axe (explications dans le texte)

Si les fonctions de consommation décroissent de façon continue avec les prix, les fonctions de production font, en revanche, des sauts. La figure 6.3 illustre la formation d'un tel saut. Cette figure représente les prix de vente au détail d'un combustible ligneux sur un axe de l'espace reliant deux localités de production : i1 et i2. Sur cet axe se trouvent quatre localités de consommation, numérotées de j1 à j4. Dans un premier temps, supposons que les localités j1 à j2 soient ravitaillées exclusivement à partir de i1, que j3 soit ravitaillée simultanément à partir de i1 et de i2, et que j4 soit ravitaillée exclusivement à partir de i2. Les prix sont alors donnés par la hauteur des barres en trait plein. Les sommets des barres sont reliés par des droites parce que les prix sont supposés augmenter linéairement avec la distance parcourue ($c_{ij} = \alpha + \beta \cdot d_{ij}$, cf. § 4.1.4). Notons que les producteurs de i2, qui ont une position géographique plus favorable à l'écoulement de leur production que ceux de i1, réalisent une marge supplémentaire m.

Supposons maintenant que les consommateurs de j4 consomment un peu plus de combustible et que les ressources de i2 s'avèrent maintenant insuffisantes pour satisfaire la consommation de j4. La localité j4 est brusquement amenée à importer du combustible de i1, ce qui provoque un saut du prix qui augmente de m'. La marge supplémentaire des producteurs de i2 augmente elle aussi de m'. Une faible variation de consommation peut donc entraîner une variation brusque d'un ou de plusieurs prix².

² Dans l'exemple ci-dessus, d'éventuelles localités de consommation situées entre i2 et j4 auraient connu la même augmentation de prix que j4.

Le fonctionnement du marché aux discontinuités

Le système d'équations qui définit les prix des combustibles ligneux (§ 4.1.2) permet en règle générale d'obtenir un ensemble de prix unique pour chaque ensemble de consommations. Cependant, lorsque les consommations remplissent certaines conditions particulières, certaines marges - et donc certains prix - peuvent ne plus être définis. Ces cas spéciaux ne constituent pas un obstacle à l'évaluation numérique des prix à consommations données puisque leur probabilité d'apparition peut être assimilée à zéro. En revanche, ils prennent une importance toute particulière lorsqu'il s'agit de concilier l'offre et la consommation : au point de fonctionnement du marché, certaines consommations peuvent précisément remplir ces conditions particulières. Examinons ces conditions avant de montrer comment elles peuvent apparaître. Les notations utilisées et les numéros des équations sont ceux du paragraphe 4.1.2.

Soit i une localité de production et L_i l'ensemble des localités de consommation j telles que $q_{ij} > 0$ (L_i est l'ensemble des localités de consommation recevant du combustible de i).

Supposons que $\forall j \in L_i, \quad q_{ij} = y_j$

(i est la seule origine du combustible consommé dans les localités de L_i)

et $\sum_{j \in L_i} y_j = R_i$ (les ressources de i sont épuisées).

On constate alors que toutes les équations de la formation des prix peuvent être vérifiées sans que m_i soit définie. Il suffit en effet que m_i se trouve entre deux bornes définies par les équations (7) qui deviennent :

$$(a) \quad \forall j \in L_i, \quad \forall i' \neq i, \quad m_i \leq m_{i'} + c_{i'j} - c_{ij}$$

$$(b) \quad \forall j' \in L, \quad m_i \geq p_{j'} - c_{ij'}$$

Nous avons donc un ensemble de consommations y_j telles que la marge m_i soit située dans un certain intervalle. Il est aisé de remarquer que des conditions analogues peuvent exister pour des ensembles de localités de consommation qui sont approvisionnés à partir d'un ensemble de plusieurs localités de production.

Si dans de tels cas certaines marges ne sont pas définies par les seules équations de la formation des prix, en revanche elles deviennent définies lorsque l'on impose simultanément la satisfaction des fonctions de consommation. La figure 6.4 illustre cette situation.

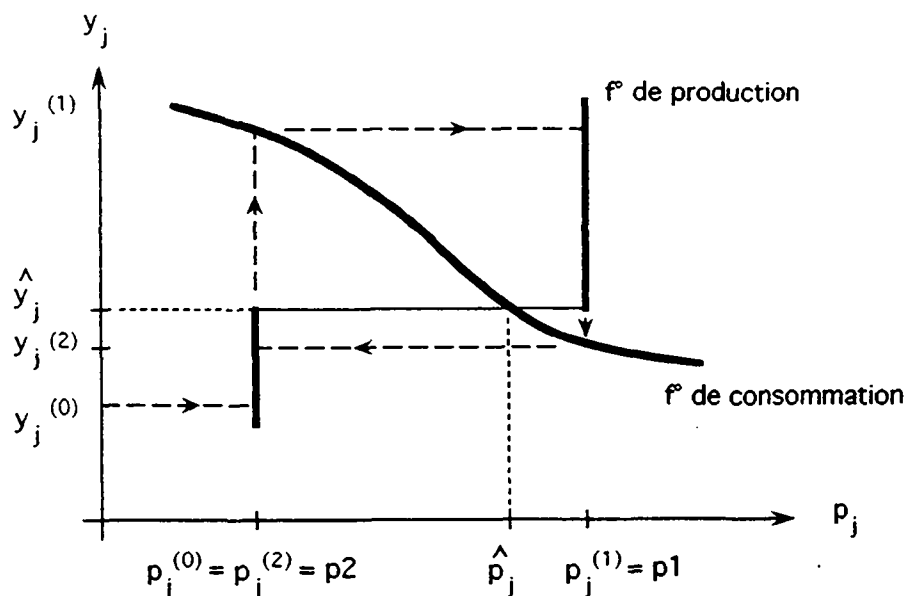


Fig. 6.4 Le fonctionnement du marché à une discontinuité de la fonction de production

Cette figure représente les fonctions de production et de consommation dans une localité de consommation comme j_4 dans la figure 6.2 : lorsque les consommations dépassent un certain seuil (\hat{y}_j), le prix fait un saut.

Le marché fonctionne au prix \hat{p}_j et à la consommation critique \hat{y}_j . On peut interpréter ce fonctionnement du marché de la manière suivante :

Au prix minimum p_2 auquel les commerçants sont prêts à vendre le combustible provenant d'une localité de production i_2 , les consommateurs ont tendance à consommer plus que la production de i_2 . Cependant, s'ils devaient payer le prix p_1 du combustible d'une autre localité de production i_1 , ils consommeraient moins que la production de i_2 . Par conséquent, les marchands augmentent le prix jusqu'à une valeur \hat{p}_j , qui est telle que les consommateurs aient envie de consommer tout juste la production de i_2 .

Les risques de non-convergence d'une méthode itérative

La figure 6.4 illustre également comment la méthode itérative simple décrite au début de ce paragraphe risque de "tourner en rond", de ne pas converger vers le point de fonctionnement du marché : partant d'une consommation initiale $y_j^{(0)}$, on tombe alternativement sur les prix p_2 et p_1 , sans approcher de la valeur effective du prix en j , \hat{p}_j .

L'approximation du point de fonctionnement du marché

Dans le cas particulier ci-dessus, une méthode numérique adéquate consisterait à déterminer d'abord \hat{y}_j , puis à chercher des prix tels que la consommation qui leur correspond soit toujours plus proche de \hat{y}_j . Nous ne nous attarderons cependant pas sur la recherche d'une méthode numérique générale qui convergerait vers le point de fonctionnement exact du marché : une telle méthode serait certainement lourde dans son utilisation tout en n'apportant qu'une précision quelque peu illusoire. En effet, une telle méthode permettrait de déterminer avec précision un point d'une fonction de production alors que cette fonction de production elle-même est loin de donner une représentation exacte de la formation des prix : elle donne des prix moyens par zone, faisant apparaître des sauts de prix d'une zone à l'autre, alors que les prix varient en fait graduellement.

La méthode employée

Pour ces raisons, nous nous contenterons d'une méthode basée sur la proposition suivante :

Si, après un cycle d'évaluations des fonctions de consommation et d'offre, le prix d'un combustible dans une localité a fait un saut, alors la moyenne des deux valeurs successives du prix constitue une approximation suffisamment bonne du prix auquel fonctionne le marché.

En utilisant les notations ci-dessus, on suivra les étapes suivantes :

- Evaluation d'une première approximation $y_{vj}^{(0)}$ de chaque consommation. Cette approximation peut être obtenue en utilisant les parts des combustibles de l'année précédente.
- Evaluation des fonctions d'offre permettant d'obtenir les prix $p_{vj}^{(0)}$.
- Evaluation des fonctions de consommation permettant d'obtenir les consommations $y_{vj}^{(1)}$.
- Evaluation des fonctions d'offre permettant d'obtenir les prix $p_{vj}^{(1)}$.
- Evaluation des fonctions de consommation permettant d'obtenir les consommations $y_{vj}^{(2)}$.
- Evaluation des fonctions d'offre permettant d'obtenir les prix $p_{vj}^{(2)}$.
- Calcul des prix approchés $p_{vj} = \frac{p_{vj}^{(1)} + p_{vj}^{(2)}}{2}$
- Calcul des consommations y_{vj} correspondantes par les fonctions de consommation.

Les écarts entre les valeurs ainsi obtenues et les valeurs exactes ne devraient pas être de nature à faire baisser de beaucoup la qualité des simulations, pour deux raisons : la faible amplitude probable des sauts de prix et la compensation interannuelle des erreurs.

La faiblesse des sauts de prix

Rien, sur la base des équations de la formation des prix ne nous permet d'affirmer que les éventuels sauts de prix observés entre deux évaluations successives d'une fonction de production ($p_{vj}^{(1)}$ et $p_{vj}^{(2)}$ par exemple), seront nécessairement faibles. En revanche, les simulations effectuées pour le marché sénégalais des combustibles domestiques ont fait ressortir que les rares sauts de prix étaient en général relativement modestes.

Cette constatation peut s'expliquer de la manière suivante : Lorsqu'un ensemble de localités de consommation L ne peut plus être alimenté uniquement par les localités de production qui le ravitaillaient jusqu'alors - ensemble dont fait partie une localité de production i - le combustible devra être importé d'une origine plus lointaine - disons i' . Or les camions venant de i' pour ravitailler L "transiteront" par des localités qu'ils ravitaillaient déjà jusqu'alors. Ils passeront donc à un moment donné une "frontière" entre les localités déjà ravitaillées à partir de i' et les localités de L . Désignons par j' la dernière localité avant la frontière ($j' \notin L$) et par j la première localité après la frontière ($j \in L$).

Les équations (7) de la formation des prix nous donnent alors une borne pour l'ampleur m' du saut du prix en j . En effet, avant le saut nous avons :

$$p_j = m_i + c_{ij}$$

$$p_{j'} = m_{i'} + c_{i'j'}$$

$$p_{j'} \leq m_i + c_{ij'}$$

En admettant que $m_{i'}$ n'ait pas augmenté (nous reviendrons ci-dessous sur cette hypothèse) nous pouvons par ailleurs écrire après le saut :

$$p_{j'} + m' \leq m_i + c_{ij'}$$

A partir de là, on montre aisément que :

$$m' \leq (c_{ij'} - c_{ij}) + (c_{i'j'} - c_{i'j'})$$

Si les camions venant de i' transitent effectivement par j' avant d'atteindre j et vice-versa, nous pouvons écrire ($d_{jj'}$: distance $j-j'$) :

$$c_{ij}' - c_{ij} = \beta \cdot d_{jj}'$$

$$c_{i'j} - c_{i'j}' = \beta \cdot d_{j'j}$$

et donc

$$m' \leq 2 \cdot \beta \cdot d_{jj}'$$

Le saut du prix ne dépasse donc pas le prix d'un aller-retour entre les deux localités voisines j et j' !

Revenons cependant sur l'hypothèse que m_i' n'ait pas augmenté. Il se peut en effet que les localités précédemment ravitaillées à partir de i' soient à leur tour obligées d'importer du combustible venant de plus loin, ce qui ferait augmenter m_i' . C'est la raison pour laquelle il n'est théoriquement pas possible d'affirmer qu'un saut de prix sera petit, même si les zones - et donc les distances d_{jj}' - sont petites. Toutefois, dans une application pratique, les phénomènes suivants s'opposent à des augmentations de prix "en cascade" :

- Les fonctions de consommation ne réagissent que faiblement aux prix. Par conséquent, les variations des consommations entre deux évaluations successives des fonctions de production seront faibles.
- En se ravitaillant à partir de localités de production de plus en plus éloignées, un ensemble de localités de consommation a des chances croissantes d'en arriver à une localité de production où la pression sur les ressources est faible et dont la marge supplémentaire, par conséquent, aura tendance à rester basse.

Nous pouvons donc admettre qu'en général l'écart $p_{vj}^{(2)} - p_{vj}^{(1)}$ sera soit nul soit faible, et que $\frac{p_{vj}^{(1)} + p_{vj}^{(2)}}{2}$ constituera une assez bonne approximation du prix de fonctionnement exact du marché.

La compensation interannuelle des erreurs

Il est rassurant de savoir qu'une erreur faite lors de l'approximation d'un prix d'un combustible ligneux aura tendance à provoquer, l'année suivante, un écart en sens inverse. Imaginons par exemple que p_{vj_t} surestime le prix de v en j au point de fonctionnement du marché pour l'année t . L'approximation y_{vj_t} de la consommation est alors trop basse. Certes, l'erreur commise avec y_{vj_t} se répercutera sur $y_{vj_{t+1}}$ à travers le lien étroit que crée la fonction de consommation entre ces deux valeurs. En revanche, la sous-estimation de la consommation conduit à une sous-estimation des coupes de bois, donc à une sur-estimation des ressources disponibles l'année $t+1$. Elle a ainsi tendance à provoquer une sous-estimation du prix de l'année $t+1$.

Les valeurs approchées retenues auront donc tendance à osciller autour des valeurs des points de fonctionnement exacts, et il y aura compensation partielle des effets à long terme que les erreurs sur les prix ont sur l'estimation des consommations.

6.1.2 Vers une validation du modèle

Enjeux et méthodes de la validation

L'utilisateur d'un modèle doit se poser différentes questions avant de se plonger dans l'analyse des résultats que le modèle peut lui livrer. Tout d'abord, il doit se demander si le modèle est bien adapté à l'usage qu'il veut en faire (le modèle représente-t-il la réalité à laquelle je suis confronté ? Les résultats sont-ils ceux qui m'intéressent ?). Remarquons à ce sujet que le modèle développé dans le cadre de cette thèse a été conçu dans la perspective d'une utilisation future au Sénégal. Son application aux cas d'autres pays - fussent-ils voisins - rendra nécessaire un nouveau calibrage de certains paramètres et peut-être même une adaptation de sa structure.

Si le modèle est adapté à l'usage que l'on veut en faire, la question principale porte alors sur sa crédibilité, sur la confiance que l'on peut apporter aux résultats qu'il donne. Le rôle du processus de validation est de répondre à cette question.

Certains modèles peuvent être validés par une simple analyse de leur structure, par un contrôle des équations qu'ils utilisent. C'est le cas des modèles comptables, qui permettent d'obtenir rapidement les résultats de longues séries de calculs à partir d'un ensemble d'équations dont la forme ne fait pas l'objet d'incertitudes³. En revanche, lorsque la conception d'un modèle s'appuie sur des hypothèses, et en particulier lorsqu'elle fait intervenir des méthodes économétriques comme c'est le cas ici pour les représentations de l'offre et de la consommation, la validation du modèle se fait par comparaison des résultats du modèle à leurs équivalents observés.

Une méthode de validation courante consiste à n'utiliser qu'une partie des observations disponibles pour le calibrage du modèle et à utiliser les observations restantes pour la validation. Les nouvelles observations recueillies pendant la phase d'utilisation du modèle sont aussi une source de données très précieuse. Elles permettent de valider le modèle au fur et à mesure de son utilisation.

³ Il est par exemple évident que la consommation d'un groupe de ménages s'obtient par addition des consommations de chaque ménage.

Un modèle peut aussi être jugé par l'étude de la plausibilité des résultats, lorsque l'on fait varier les variables exogènes. Cette démarche permet de déceler certaines lacunes d'un modèle, en révélant sa trop grande sensibilité (ou insensibilité) à certaines variables.

Les limites à la validation du modèle proposé

De la validation du modèle du marché à celle de ses composantes

Comme déjà signalé ci-dessus, la formation des prix et l'évaluation des consommations sont les principales parties du modèle du système énergéico-forestier qui demandent à être validées, en raison de l'emploi de techniques économétriques. Bien entendu, il serait idéal de pouvoir valider directement la modélisation du marché dans son ensemble, c'est-à-dire la formation des couples prix-quantités. Cependant, si nous admettons que la méthode de recherche de l'intersection offre-consommation (exposée au paragraphe précédent) livre une approximation suffisamment bonne de cette intersection, alors nous pouvons déjà nous satisfaire - en attendant de disposer de plus de données - de validations séparées de formation des prix et de celle des consommations.

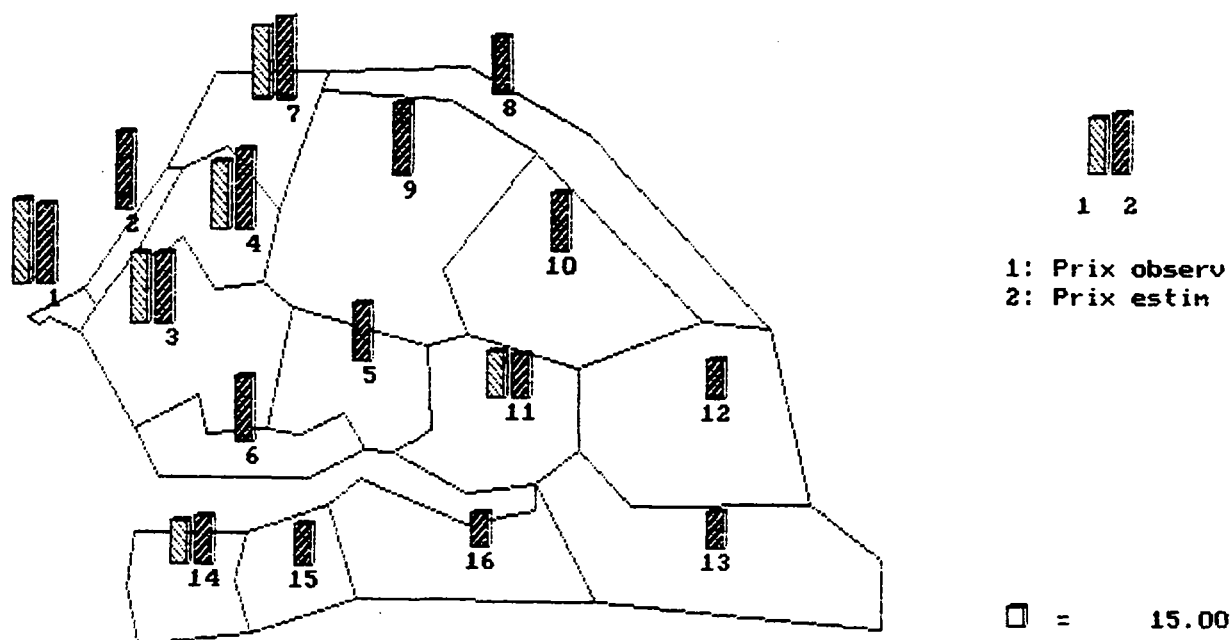
Le manque de données sur les consommations

Le modèle de l'évolution des consommations à Dakar a pu être calibré grâce à la série de chiffres des ventes de gaz. Cette série aurait été un peu courte pour être coupée en deux : la série entière ne fait déjà apparaître que des parts moyennes du gaz populaire allant de 0 à environ 40 %, alors que le modèle devra représenter un avenir avec des parts de gaz populaire s'approchant de l'unité. Le modèle calibré est donc loin d'être validé. Comme cela a déjà été mentionné (§ 5.3.6), les paramètres doivent davantage être considérés comme des moyens de générer des scénarios (cf. tab. 5.14) que comme des valeurs déterminées une fois pour toutes. Cette remarque est à plus forte raison valable pour la représentation de la consommation dans l'intérieur du pays : les données recueillies ici permettent tout juste d'obtenir des valeurs initiales des consommations.

Une validation partielle de la formation des prix

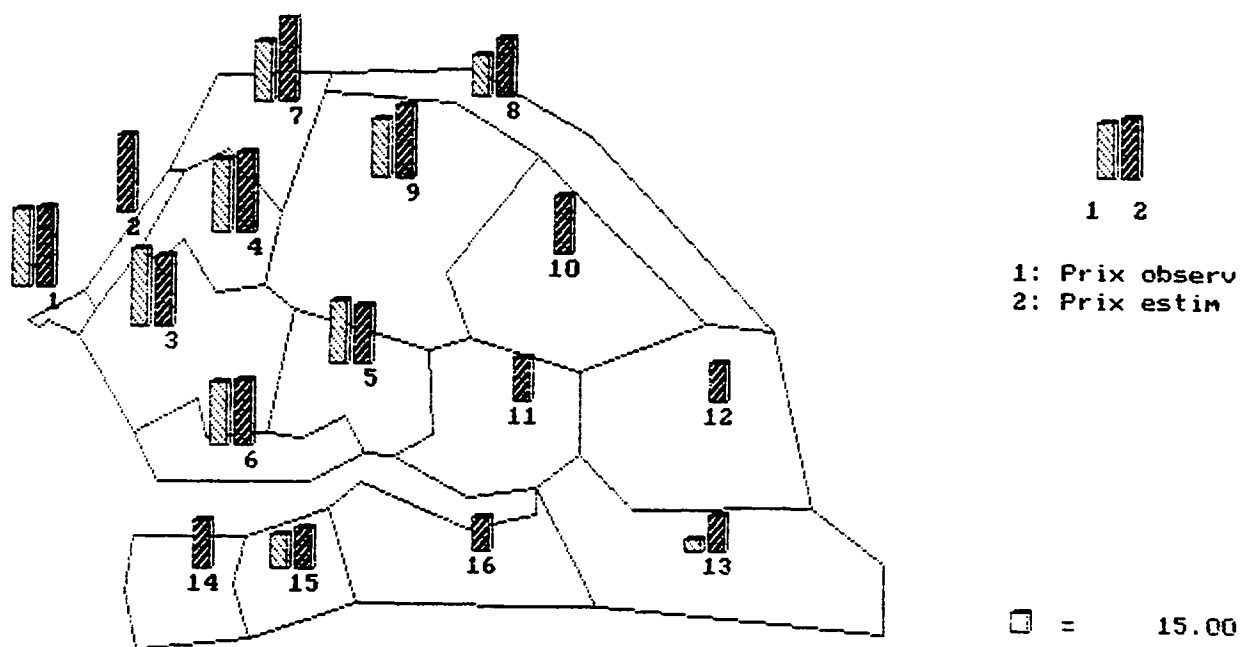
Les données qui ont été utilisées pour le calibrage du modèle de la formation des prix des combustibles ligneux sont les prix des localités situées sur les grands axes d'approvisionnement (§ 4.1.4). Or, le modèle détermine des prix pour toutes les zones, qu'elles soient situées sur des axes ou non. Par conséquent, les mesures de prix disponibles pour les localités situées à l'écart des axes permettent de valider partiellement le modèle de la formation des prix.

Les cartes ci-dessous montrent par zone les prix observés et les prix donnés par le modèle. Les prix "observés" sont les moyennes par zone et classe de taille d'agglomération des prix mesurés au cours des enquêtes MASENS⁴. Les prix "du modèle" ont été obtenus en introduisant dans le modèle de la formation du prix⁵ des consommations de combustibles ligneux et des quantités de bois disponibles. Les premières ont été estimées à partir des enquêtes MASENS, tandis que les secondes ont été déterminées d'une part à partir des chiffres de la DEFC sur les quotas et les saisies de bois de feu et de charbon de bois, et d'autre part à partir d'hypothèses sur la répartition spatiale de la production échappant à tout contrôle⁶. Ces hypothèses sont certes discutables, mais de légères modifications de ces hypothèses n'affectent guère les prix : dans tous les cas de figure, la production se concentre dans le Sud-Est du pays (régions de Kolda et de Tambacounda, zones 11, 12, 13 et 16).

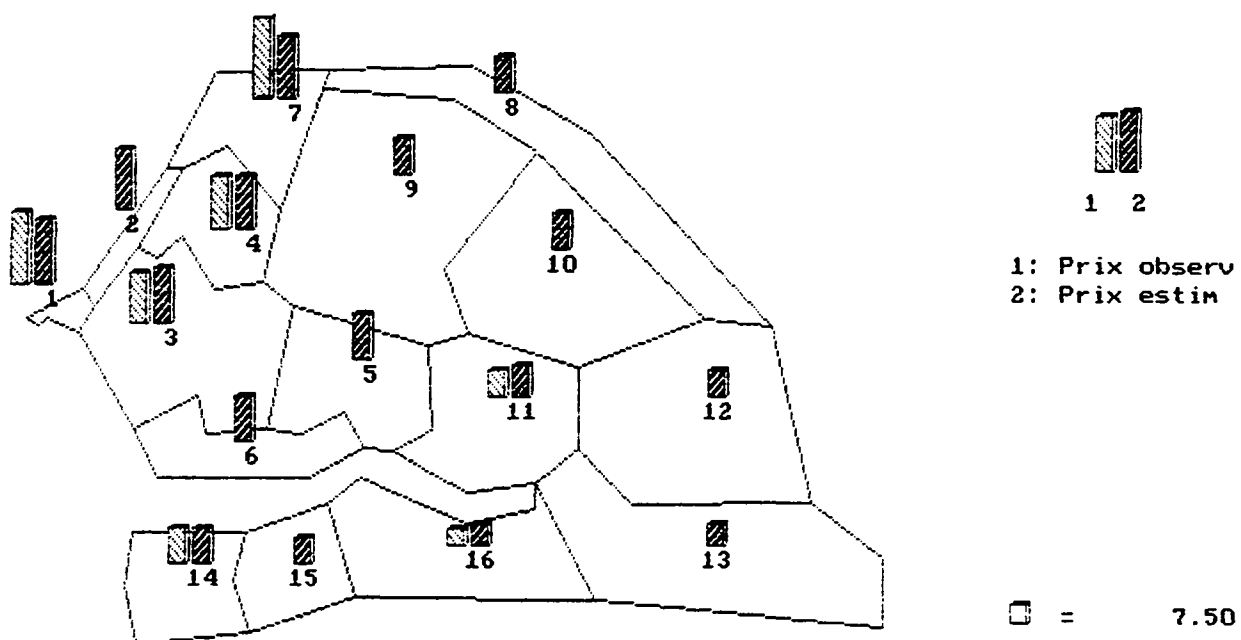


Carte 6.1 Prix observés et prix du modèle, charbon de bois, grandes villes
[F/Kg-équivalent bois]

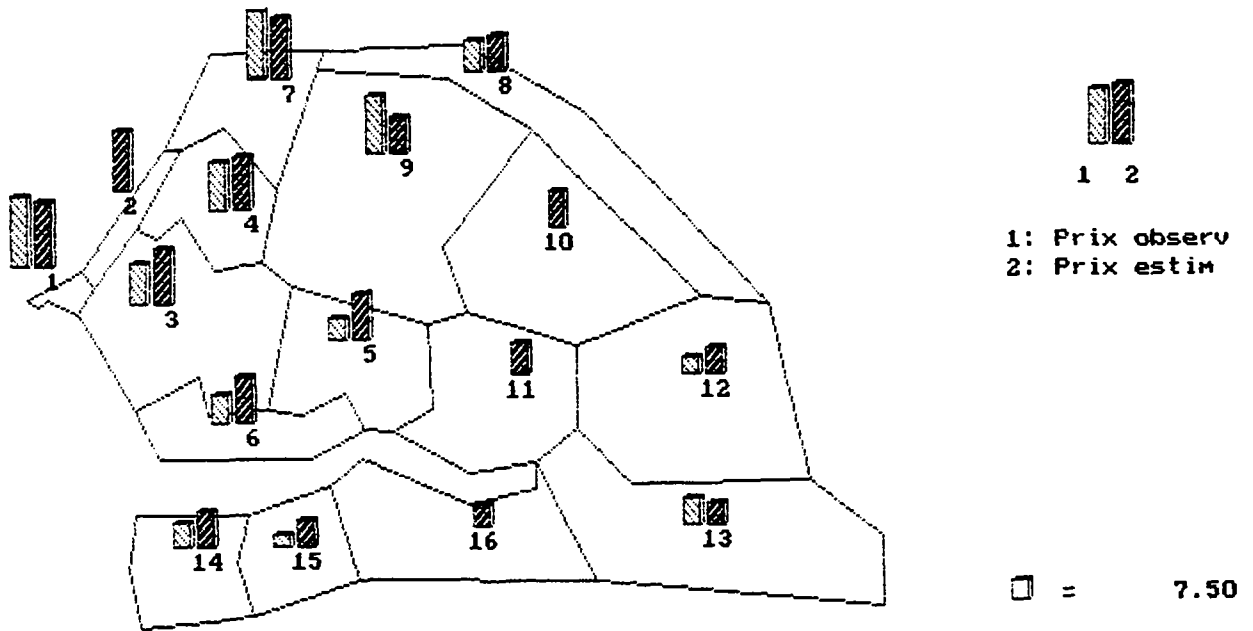
-
- 4 Toutes les données ont été utilisées, sauf les prix du charbon à Kolda, Goudiry et Bakel (cf. § 4.1.4, "Les exceptions aux lois prix-éloignement").
- 5 Un seul marché, pas de marchés régionaux.
- 6 Production proportionnelle aux volumes sur pied des formations accessibles sans statut légal particulier.



Carte 6.2 Prix observés et prix du modèle, charbon de bois, petites villes
[F/Kg-équivalent bois]



Carte 6.3 Prix observés et prix du modèle, bois de feu, grandes villes
[F/Kg-équivalent bois]



Carte 6.4 Prix observés et prix du modèle, bois de feu, petites villes
[F/Kg-équivalent bois]

Les cartes 6.1 à 6.4 montrent que la tendance générale des prix à augmenter du Sud-Est au Nord-Ouest est partagée par les prix observés et les prix du modèle, et dans l'ensemble les prix du modèle sont assez proches des prix observés. (Pour les chiffres, cf. tableau 6.1 ci-dessous).

Dans les zones qui se trouvent à cheval sur l'axe Sénégal-Oriental - Dakar, les écarts sont en gros le reflet de la qualité de l'ajustement qui a été effectué pour estimer les paramètres du modèle. Remarquons les faibles prix observés du bois dans les zones 5 et 6 déjà discutés dans le cadre des régressions (§ 4.1.4). Pour l'axe Fleuve-Saint-Louis, la correspondance entre les prix du modèle et les prix observés est un peu moins bonne que pour l'autre axe. En particulier, les prix observés pour le charbon dans les zones 7, 8 et 9 sont de près de 25 % plus bas que les prix du modèle. Cette situation peut s'expliquer par l'absence de simulation d'un marché local du Nord du Sénégal⁷.

Dans une optique de validation du modèle de la formation des prix, les zones intéressantes sont celles situées à l'écart des grands axes d'approvisionnement. En effet, les prix observés de ces

⁷ Un tel marché aurait pu être simulé. Cependant, l'absence d'informations précises sur les limites et la répartition des ressources à l'intérieur de ce marché local aurait exigé beaucoup d'arbitraire lors de la définition des variables exogènes, et le résultat n'aurait par conséquent guère eu d'intérêt dans le cadre de la validation du modèle.

zones ont été obtenus à partir de données qui n'ont pas été utilisées lors du calibrage. En particulier, les zones 2, 4, 6, 14 et 15 méritent de retenir notre attention (pour autant que des prix observés y existent). Remarquons la très bonne concordance des prix pour les grandes villes, à la fois pour le bois de feu et le charbon (écarts généralement inférieurs à 10 %) En revanche, les écarts sont plus importants pour les prix du bois des petites villes dans les zones 6, 14 et 15 : le modèle donne des prix plus élevés que l'observation. Les petites villes des zones 14 et 15 bénéficieraient-elles, tout comme la zone 6, d'un marché local du bois ?

Dans l'ensemble, nous pouvons dire que les prix observés non utilisés lors de l'estimation des paramètres sont tout aussi bien approchés par le modèle que les prix qui ont déjà été utilisés. Cette constatation permet d'affirmer que le modèle proposé donne une assez bonne représentation de la distribution des prix dans l'espace qui a été observée. Toutefois, la distribution observée des prix est de caractère statique : elle se rapporte en quelque sorte à un instant donné. Or, le modèle est censé pouvoir représenter des adaptations des prix à des variations des consommations et à des variations de la distribution des ressources. Pour cette raison, la validation du modèle de la formation des prix est loin d'être totale⁸.

Zone	Prix du bois				Prix du charbon			
	gdes villes obs.	gdes villes mod.	ptes villes obs.	ptes villes mod.	gdes villes obs.	gdes villes mod.	ptes villes obs.	ptes villes mod.
1	27.0	23.9	26.0	23.9	63.0	59.0	57.0	59.0
2		22.4		22.4		58.0		58.0
3	19.0	20.1	15.0	20.1	52.0	51.5	57.0	51.5
4	20.0	19.5	18.0	19.5	50.0	59.5	54.0	59.5
5		16.7	8.0	16.7		43.5	46.0	43.5
6		17.3	11.0	17.3		49.0	47.0	49.0
7	30.0	22.9	26.0	22.9	56.0	62.5	45.0	62.5
8		13.8	11.7	13.8		42.5	30.5	42.5
9		13.8	22.0	13.8		48.0	44.0	48.0
10		13.2		13.2		42.5		42.5
11	10.0	11.6		11.6	35.0	32.5		32.5
12		9.8	7.0	9.8		29.5		29.5
13		8.8	10.0	8.8		27.0	10.0	27.0
14	14.0	13.3	9.0	13.3	32.0	37.0		37.0
15		10.2	5.0	10.2		30.0	26.0	30.0
16	7.0	8.5		8.5		26.0		26.0

Tableau 6.1 Prix moyens observés (obs.) et donnés par le modèle (mod.)

⁸ Remarquons qu'un système de mesure des prix à intervalles réguliers est en train d'être mis sur pied par la Direction de l'Energie. Les données qui seront obtenues pourraient permettre sous peu une validation plus poussée du modèle

6.2 EXEMPLES D'APPLICATIONS

Les résultats de simulations présentés dans cette section montrent comment les variables exogènes agissent directement et indirectement sur les différentes parties du système représenté, dans le modèle global avec interaction de l'offre, la consommation et l'évolution des ressources ligneuses. Ils permettent ainsi de comprendre l'utilité du modèle pour la préparation des politiques énergétiques et forestières.

Afin de bien mettre en évidence les effets des différentes variables exogènes (facteur sécheresse, revenus par ménage, prix des combustibles de substitution ...), une seule de ces variables est modifiée à la fois, et les résultats du scénario sont comparés aux résultats d'un scénario de référence fixe.

Les résultats du scénario de référence en question sont présentés en détail au premier paragraphe de cette section. Le paragraphe suivant est consacré aux scénarios dans lesquels la variable exogène modifiée n'est pas une variable de décision (facteur sécheresse, sensibilité des forêts à la surexploitation, revenus ...), alors que le troisième paragraphe est dédié aux modifications des variables de décision (plantations, taxes sur les combustibles ligneux, prix des combustibles de substitution ...). Pour ces deux derniers paragraphes, les résultats des simulations sont donnés sous forme d'agrégats nationaux, suffisants pour illustrer les principaux effets des variables modifiées.

6.2.1 Le scénario de référence

Le scénario de référence se veut réaliste: les valeurs initiales des variables ont été choisies, dans la mesure où les données disponibles le permettaient, égales à des valeurs observées. Par ailleurs, les hypothèses sur l'évolution des variables exogènes sont des hypothèses plutôt "moyennes", donc non extrêmes. Il est donc tout à fait imaginable que l'évolution des ressources ligneuses et celle des consommations d'ici l'an 2020 correspondent à peu près aux résultats de simulation présentés ci-dessous.

Les principales hypothèses du scénario de référence

Il n'est pas question de commenter ici toutes les hypothèses qui constituent le scénario de référence⁹. Les quelques indications données ci-dessous sont destinées à faciliter l'interprétation des résultats de ce scénario et la discussion des scénarios suivants.

- *Productivités en bois -combustible : peu de changements*
Les chiffres de productivité utilisés sont ceux qui ont été présentés au chapitre 3. Il n'y a pas de variations de la productivité dues au climat (FSech = 1). Une légère baisse de la productivité est supposée se produire en cas de surexploitation (FSurex = 0.5).
- *Ventilation équilibrée des quotas sur les ressources ligneuses accessibles*
Il n'y a pas de zones privilégiées pour les quotas. Par contre, les forêts sans statut particulier sont nettement préférées aux autres et les parcs nationaux sont totalement épargnés. La distribution des coupes frauduleuses est proche de celle des quotas.
- *Importations de combustibles ligneux : nulles*
Le Sénégal a commencé à importer du charbon de bois de Guinée Bissau en 1991. Toutefois, ces importations sont largement tributaires de la volonté des pouvoirs politiques de part et d'autre de la frontière. Il ne serait donc pas prudent de compter fermement sur la réalisation de l'objectif de 60'000 tonnes par an. L'hypothèse du scénario de référence qui consiste à supposer que les importations soient nulles est certes un peu extrême, mais elle est prudente.
- *Politique des prix : une butanisation faiblissante*
Le prix du gaz populaire est légèrement revu à la hausse au cours de la période 1991 - 2020, passant de 121 F/Kg à 170 F/Kg (+ 1% par an). Les taxes sur les combustibles ligneux sont maintenus à leurs niveaux actuels.
- *Foyers améliorés : diffusion plutôt lente*
Les parts des foyers améliorés à charbon dans les grandes et les petites villes atteignent 40 % en 2020. Il en va de même des parts des foyers améliorés à bois en milieu rural et dans les petites villes.
- *Consommations en milieu rural : du bois, essentiellement*
Rappelons que les parts des combustibles et les consommations d'énergie utile en milieu rural sont exogènes. L'évolution des consommations en milieu rural est donc un reflet direct des variables exogènes qui la déterminent. Dans le scénario de référence, la part du bois

⁹ Les fichiers de données d'un scénario totalisent à eux seuls 24 pages A4, sans compter les valeurs initiales.

reste dominante dans toutes les zones. Cependant, le charbon fait une assez forte progression dans les zones 1, 2, 3, 4 et 7, les plus dépourvues en ressources ligneuses. Sa part atteint entre 20 % et 50 % selon les zones, en 2020. Le gaz populaire atteint 30 % pour la zone 1, 15 % pour la zone 2, mais ne dépasse pas les 5 % dans les autres zones. Les consommations d'énergie utile par ménage en milieu rural sont maintenues à leur niveau actuel, comme pour le milieu urbain.

D'autres caractéristiques du scénario de référence seront précisées lors de la présentation des scénarios suivants.

Les résultats du scénario de référence

A l'échelle nationale (fig. 6.5), on remarque une diminution constante des surfaces forestières qui s'explique par l'extension des surfaces agricoles. Cette diminution des surfaces forestières explique à son tour une partie de la perte de volume du bois sur pied. En particulier, entre 1980 et l'an 2000, la réduction du volume est à peu près proportionnelle à la perte de surface, ce qui signifie que les densités de bois sur pied sont restées proches de leurs valeurs initiales. Effectivement, comme le montre le graphique de l'évolution comparée des accroissements de biomasse ligneuse ("accroissements") et des prélèvements dans les formations ligneuses naturelles, les prélèvements sont, jusqu'en l'an 2000, à peu près compensés par la croissance végétale naturelle. Notons que l'augmentation des accroissements s'explique par l'extension du domaine accessible, donc par la mobilisation d'un capital forestier auparavant inexploité.

Après l'an 2000, les prélèvements dépassent la croissance végétale et la perte de volume du bois sur pied d'accélère. En 2020, le volume du bois sur pied a chuté de près d'un tiers!

La forte progression des prélèvements est essentiellement le reflet de l'évolution démographique : la population nationale se voit en effet multipliée par trois entre 1980 et 2020. L'augmentation importante des consommations de gaz populaire en milieu urbain entre 1980 et l'an 2000 est encore largement insuffisante pour infléchir significativement la progression des coupes de bois. Remarquons que les consommations de gaz populaire en milieu urbain stagnent à partir de l'an 2000 : le relèvement progressif du prix de ce combustible donne un véritable coup d'arrêt à la butanisation. La conséquence immédiate en est une flambée des consommations de charbon. Ces dernières totalisent environ 700'000 tonnes en 2020, ce qui

équivalent à 3'500'000 tonnes de bois coupé¹⁰, soit nettement plus que le bois coupé pour être consommé sous forme de bois de feu¹¹.

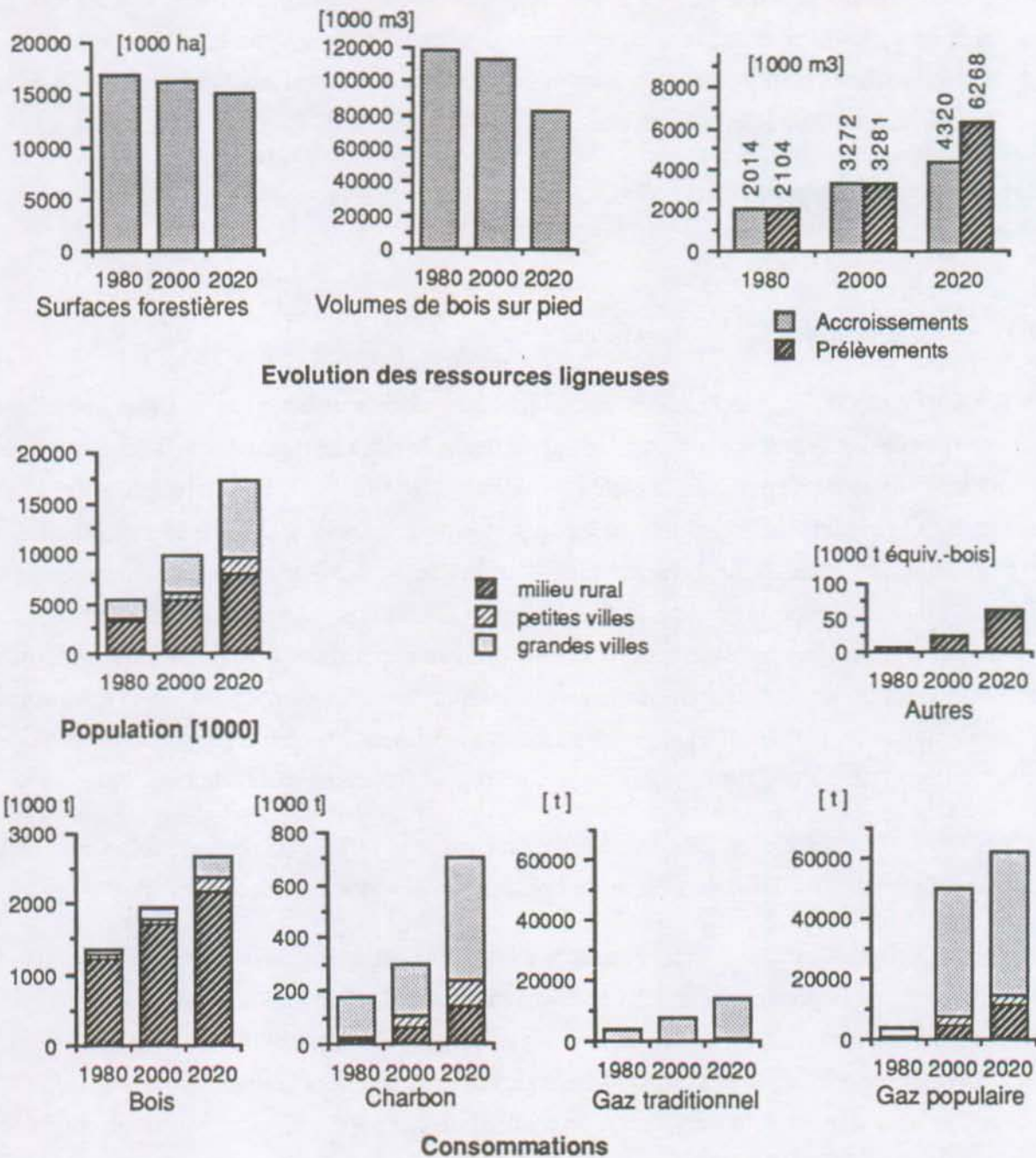
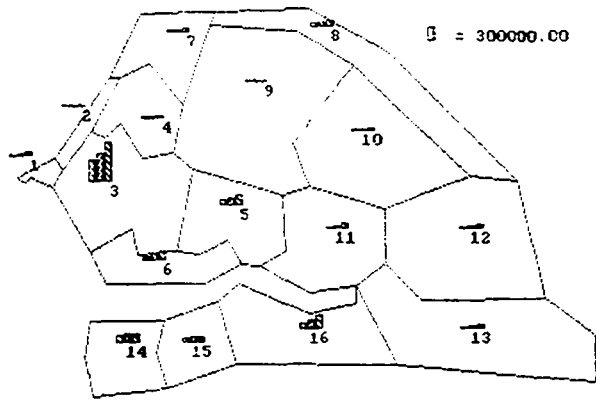


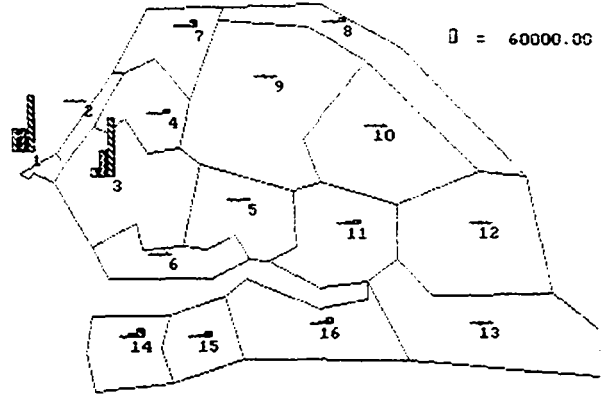
Fig. 6.5 Principaux résultats du scénario de référence à l'échelle nationale pour les années 1980, 2000 et 2020

¹⁰ Rendement pondéral de la carbonisation : 20 %.

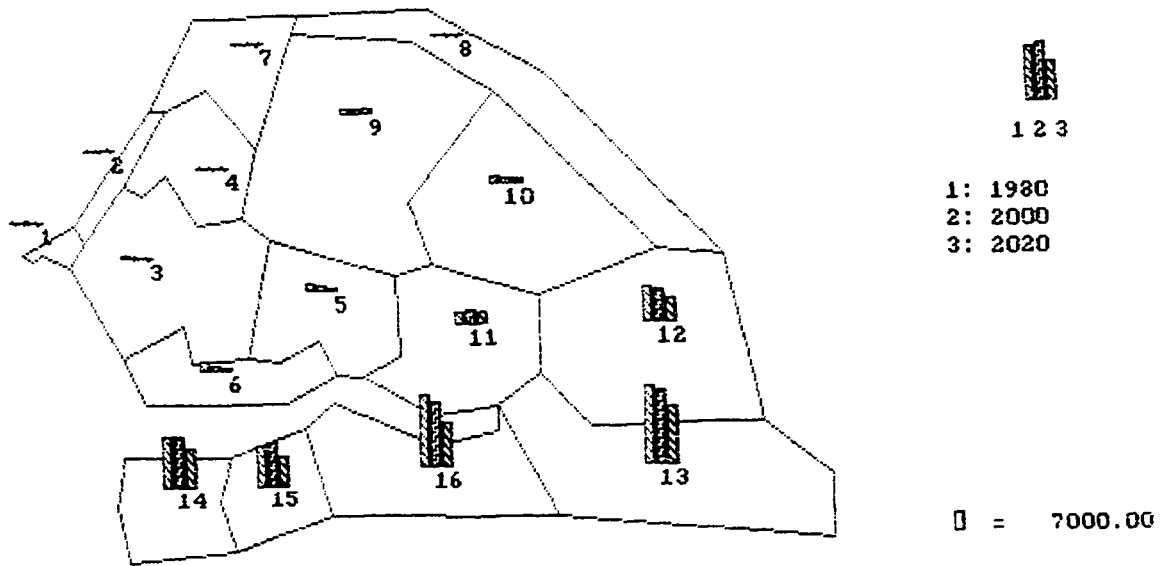
¹¹ Les quelque 2'200'000 t de bois consommées en milieu rural correspondent à des prélèvements dans les forêts naturelles bien inférieurs, en raison, d'une part, de l'utilisation de la production des terres agricoles et en raison, d'autre part, de l'utilisation des petites branches (qui se traduit par l'application du facteur MajorBois, cf. § 3.3.3).



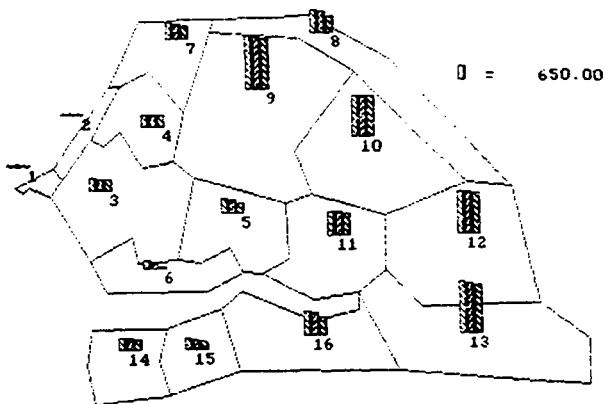
Consommations de bois de feu [t]



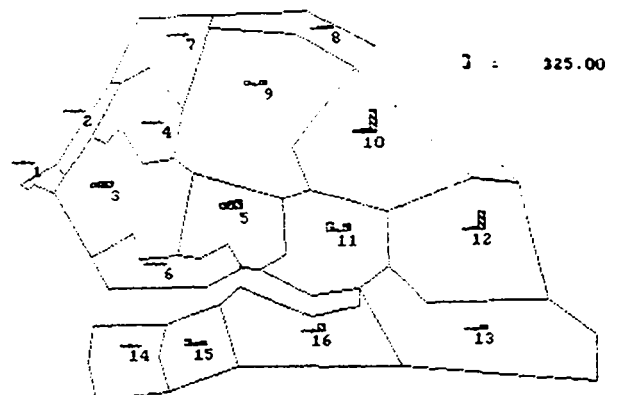
Consommations de charbon [t]



Volumes sur pied [1000 m3]



Surfaces forestières [1000 ha]



Erosion hydrique: surfaces fictives, niveau de risque ≥ 2 [1000 ha]

Fig. 6.6 Distributions dans l'espace de quelques-uns des résultats du scénario de référence pour les années 1980, 2000 et 2020

La figure 6.6 donne la répartition par zones de certains résultats du scénario. On remarque la forte concentration des consommations de combustibles ligneux dans les zones 1 et 3, les plus peuplées. Dans la zone 1, le bois reste très faiblement utilisé, alors que les consommations de charbon stagnent entre 1980 et l'an 2000 : c'est l'effet de la butanisation, qui connaît son plus grand essor à Dakar, avant que le prix du butane ne devienne trop élevé. Dans la zone 3, remarquons que la croissance des consommations de charbon est beaucoup plus rapide que celle des consommations de bois : le charbon est devenu plus économique dans les villes de cette zone. Au niveau des volumes de bois sur pied, l'attention se focalise dans un premier temps sur les fortes disparités régionales, qui ont déjà été signalées au chapitre 3 (cf. fig. 3.1). En analysant l'évolution des volumes on remarque qu'entre 1980 et l'an 2000 la gestion équilibrée des prélèvements permet même aux capitaux ligneux de certaines zones (11 et 15) de récupérer légèrement. Dans les autres zones, la diminution des volumes pour cette même période n'est pas beaucoup plus forte que la diminution des surfaces. En revanche, entre les années 2000 et 2020 les baisses de volume sont considérables pour toutes les zones.

Si les diminutions de volume sont spectaculaires dans les zones du Sud et du Sud-Est, les surfaces les plus soumises au risque d'érosion hydrique se concentrent dans l'Est (zones 10 et 12). Ces résultats indiquent qu'il serait vraisemblablement judicieux de reporter une partie des prélèvements effectués dans les zones de l'Est sur d'autres zones, ou, mieux encore, de chercher à épargner les formations ligneuses les plus exposées.

Il est bien évident que le scénario de référence est un scénario inacceptable, non seulement en raison de la très forte atteinte au patrimoine forestier à laquelle il conduit en 2020, mais surtout parce qu'il fait apparaître une forte accélération du déboisement : celui-ci est si bien lancé sur la fin du scénario qu'il devient difficile d'imaginer un redressement ultérieur de la situation. En donnant 15 années de plus à l'horizon des simulations on pourrait d'ailleurs remarquer que toutes les ressources ligneuses accessibles (hormis celles des parcs nationaux) sont complètement épuisées. Il y a alors pénurie généralisée de combustibles ligneux.

La politique énergétique mise en scène est d'autant plus inacceptable que, en raison des incertitudes qui affectent de nombreux paramètres - et notamment les productivités -, la dégradation des forêts pourrait s'avérer encore bien plus sévère. C'est ce que nous verrons au paragraphe suivant, avant de passer à l'analyse de quelques mesures de politique énergétique.

6.2.2 Scénarios sur les variables non contrôlées

Certains déterminants de l'évolution du système modélisé sont largement indépendants de la volonté des pouvoirs publics. Lorsque l'évolution future de ces déterminants ne peut pas être connue avec précision, il devient important de savoir dans quelle mesure l'incertitude qui affecte ces déterminants se répercute sur les réponses du système. Une telle connaissance permet en effet de rejeter les politiques qui peuvent conduire à des situations intolérables. Elle permet aussi de mettre en évidence les paramètres auxquels le système est le plus sensible et au sujet desquels l'approfondissement des connaissances peut par conséquent être considérée prioritaire.

Les variables dont les valeurs sont modifiées ici par rapport au scénario de référence, sont, pour celles qui affectent directement l'évolution des ressources ligneuses :

- le facteur FSech (§ 3.2.2) qui modifie globalement les productivités en bois
- le facteur FSurex (§ 3.2.2) qui permet de représenter une baisse de la productivité avec la surexploitation

et pour les variables qui affectent directement les consommations :

- les dépenses par standing (§ 5.1.1), qui sont le reflet du standing ou du revenu
- les facteurs FEnUt (§ 5.2.5) qui modifient les consommations d'énergie utile
- les paramètres β_0 bois (§ 5.3.6), qui traduisent l'appréciation du combustible bois par les consommateurs

Dans le modèle, seules les consommations en milieu urbain sont influencées par ces variables. C'est pourquoi les résultats de simulations présentés dans ce paragraphe - comme dans le suivant, d'ailleurs - feront abstraction des consommations du milieu rural.

Baisse générale de la productivité

Que se passerait-il si, pour cause de sécheresse, ou parce que les productivités ont été surestimées, les productivités des formations ligneuses naturelles étaient de 30 % inférieures à ce qu'elles étaient dans le scénario de référence?

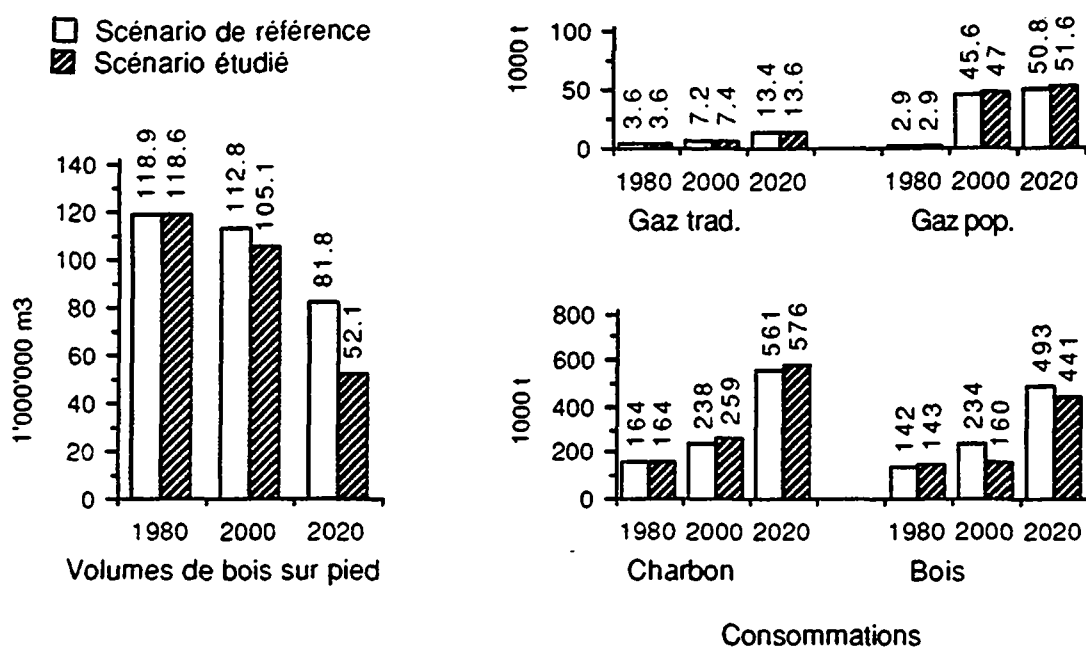


Fig. 6.7 Résultats du scénario "baisse générale de la productivité"

Dans les résultats du scénario inspiré par cette question (FSech a été modifié en conséquence), la baisse du volume de bois sur pied est catastrophique : plus de la moitié du capital ligneux initial a disparu en 2020. La perte est ainsi deux fois plus importante que dans le scénario de référence, alors que les consommations ont peu changé.

En raison de la raréfaction des ressources, les prix du bois de certaines zones ont légèrement augmenté, ce qui explique le léger recul des consommations de ce combustible au profit de celles de charbon et de gaz.

Ce scénario montre à quel point l'incertitude actuelle sur les productivités est gênante. Il n'est certes pas possible d'éliminer l'incertitude liée à l'évolution du climat. Une amélioration des connaissances des productivités actuelles et de leurs liens avec le climat est en revanche possible et constituerait un acquis extrêmement précieux pour la préparation des politiques énergétiques et forestières.

Baisse de la productivité avec la surexploitation

Que se passerait-il si les productivités baissaient d'une manière générale de 30 % et que, en plus, ces productivités baissaient fortement avec la surexploitation ? Dans le scénario dont les résultats sont présentés ci-dessous, le facteur FSurex (§ 3.2.2) a reçu la valeur extrême de 1. Dans le scénario de référence, tout comme dans le scénario précédent, FSurex valait 0.5.

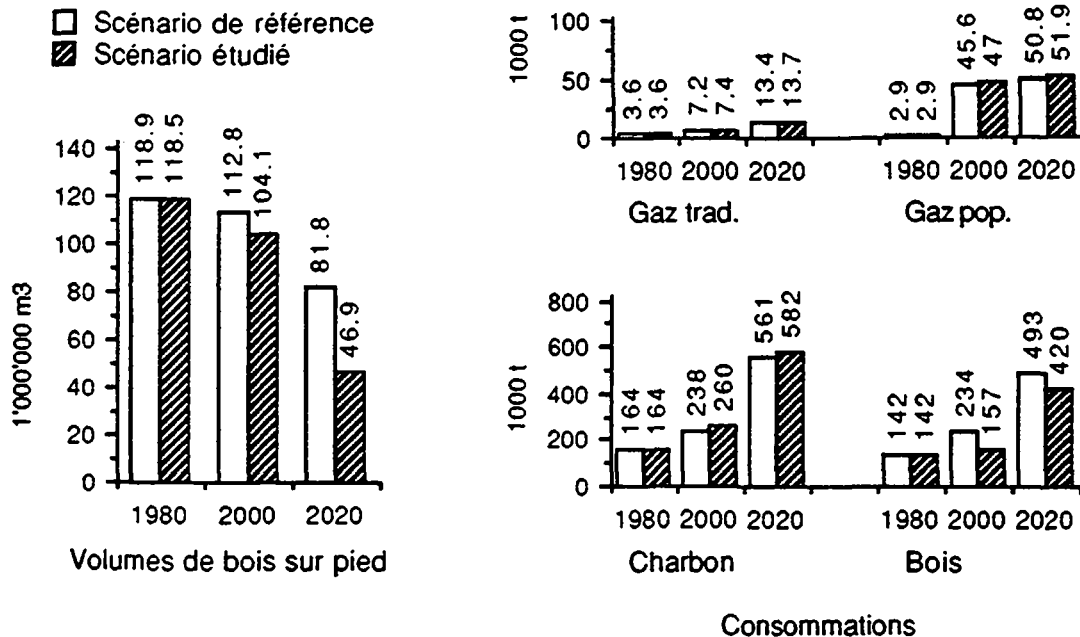


Fig. 6.8 Résultats du scénario "baisse de la productivité avec la surexploitation"

Par rapport au scénario précédent, le volume de bois sur pied en 2020 a encore baissé de 10 %. Cette baisse n'est pas énorme pour trois raisons :

- Le scénario précédent tient déjà compte d'une certaine baisse de la productivité avec la surexploitation.
- Etant donné les volumes encore assez considérables de bois sur pied, la surexploitation n'est, d'une manière générale, pas encore très forte. Rappelons qu'une formation ligneuse n'est considérée surexploitée qu'à partir du moment où sa densité tombe au dessous de la moitié de sa densité d'équilibre.
- La distribution des prélèvements est équilibrée. Il n'y a donc que peu de surfaces forestières qui atteignent le stade de la surexploitation bien avant les autres.

Il est certain que le paramètre FSurex jouerait un rôle plus important dans un scénario où les ressources ligneuses - de certaines zones du moins - en arriveraient à être quasiment épuisées.

Augmentation des revenus

Que se passerait-il si les revenus moyens par ménage doublaient d'ici l'an 2020 ? (dans le scénario de référence, les dépenses moyennes par ménage, qui tiennent lieu d'indicateurs du revenu, sont maintenues constantes).

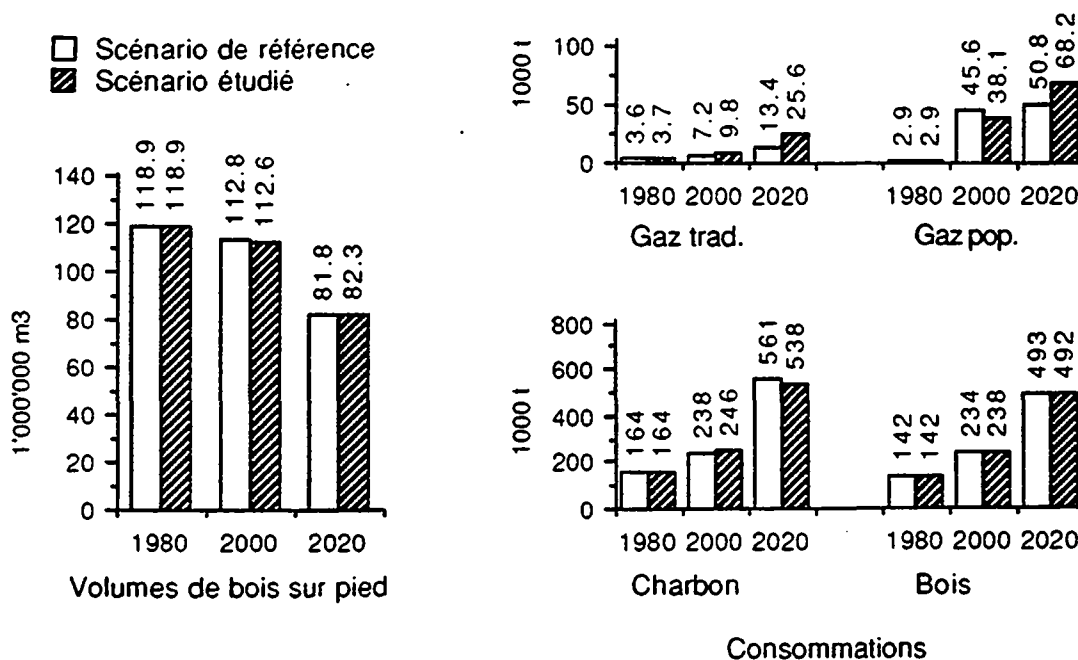


Fig. 6.9 Résultats du scénario "augmentation des revenus"

Parmi les résultats, l'évolution des consommations de gaz populaire est la plus intéressante. Elle montre la diminution de l'effet des prix sur les choix des consommateurs : entre 1980 et l'an 2000, le gaz populaire a encore un prix compétitif dans certaines villes - d'où sa progression relativement forte dans le scénario "des gens pauvres", le scénario de référence. En revanche, au cours de la période 2000 - 2020, la consommation dans le scénario "augmentation des revenus" prend le dessus, car le gaz populaire est devenu cher.

L'apparente invariabilité des consommations de bois est trompeuse, puisque les consommations représentées sont des agrégats nationaux. Les résultats détaillés du scénario feraient apparaître pour Dakar une consommation de 120'000 t en 2020, contre seulement 95'000 t dans le scénario de référence. A Dakar, contrairement à ce qui se passe à l'intérieur du pays, ce combustible profite donc aussi de l'augmentation des revenus. Prudence, cependant, car le modèle fonctionne ici dans un domaine pour lequel il n'a pas été validé!

Remarquons encore l'augmentation générale des consommations avec les revenus : en termes d'énergie utile, les augmentations des consommations de gaz font plus que compenser la légère baisse des consommations de charbon.

Baisse des consommations d'énergie utile

Que se passerait-t-il si, en raison d'une modification des habitudes alimentaires, les consommations moyennes d'énergie utile par ménage baissaient de 30 % dans les villes des zones 1 à 8, entre 1980 et 2020 ? Une telle évolution a été représentée à l'aide des paramètres FEnUt.

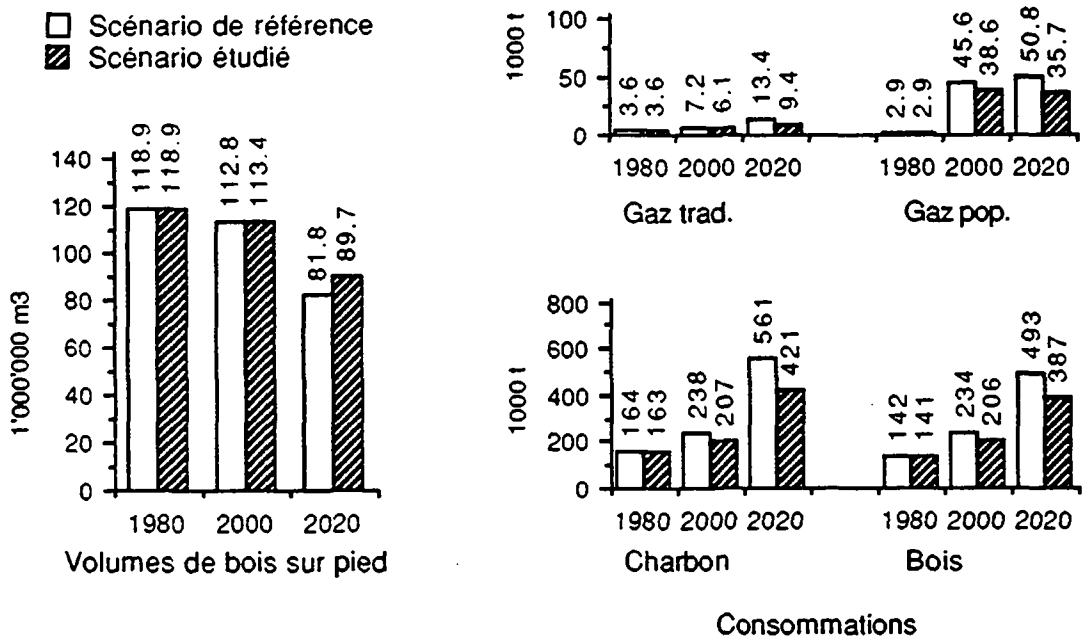


Fig. 6.10 Résultats du scénario "baisse des consommations d'énergie utile"

En examinant les diminutions - par rapport au scénario de référence - des consommations en 2020, on constate que les consommations de tous les combustibles ont baissé dans des proportions assez voisines. Si celles de gaz ont baissé davantage que celles de bois, c'est essentiellement parce que les villes des zones 1 à 8 consommaient plutôt beaucoup de gaz et plutôt peu de bois.

Au niveau des ressources ligneuses, la baisse des consommations a évidemment un effet favorable. Toutefois, le "redressement" des volumes n'est pas spectaculaire. Tout au mieux on peut dire que la courbe de disparition des ressources ligneuses est retardée de quelques années.

S'il ne faut pas exclure que les consommateurs modifieront d'eux-mêmes légèrement leurs habitudes, il semble en revanche que des mesures visant à influencer le choix des aliments ou le nombre de repas chauds pris par jour ne constitueraient pas des mesures de politique énergétique efficaces : leurs effets resteraient probablement assez faibles et ne se manifesteraient qu'à long terme, sans parler de l'acceptabilité de telles mesures sur d'autres plans.

Mauvaise opinion du combustible "bois"

Que se passerait-il si les consommateurs avaient une opinion encore beaucoup moins bonne du combustible "bois" que celle que traduit le paramètre β_0 bois utilisé dans le scénario de référence? Dans ce scénario, β_0 bois passe à -2 (contre -1 précédemment) dans toutes les villes du pays.

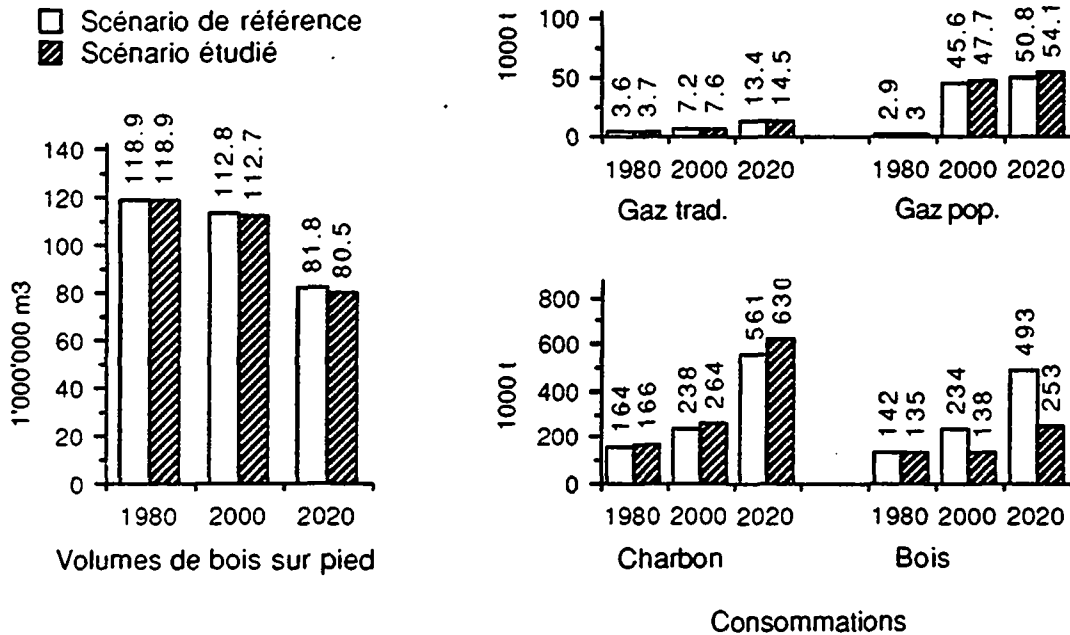


Fig. 6.11 Résultats du scénario "mauvaise opinion du combustible bois"

Conformément à ce qui était attendu, les consommations de bois baissent fortement, à la longue, par rapport au scénario de référence. Tous les autres combustibles bénéficient du désintérêt des consommateurs pour le bois, mais le charbon est privilégié. Or, l'utilisation du charbon implique des quantités de bois coupées plus importantes que celle du bois. C'est la raison pour laquelle l'évolution des volumes sur pied est affectée négativement par le désintérêt pour le bois de feu.

Le fait que les volumes de bois sur pied soient peu différents de ceux du scénario de référence est rassurant : au niveau de l'évolution des ressources ligneuses, les résultats du scénario de référence semblent être relativement insensibles aux erreurs qui pourraient affecter - et qui affectent certainement - le paramètre β_0 bois. Ceci ne veut malheureusement pas dire que les résultats de tout scénario présenteront nécessairement cette même insensibilité.

6.2.3 Scénarios sur les variables de décision

L'objectif principal du modèle développé est évidemment de permettre à ses utilisateurs de simuler différentes politiques énergétiques et forestières. La simulation de telles politiques se fait par la modification des variables exogènes de décision.

Bien entendu, le nombre de combinaisons imaginables de valeurs de ces variables est immense, pour ne pas dire infini. Nous nous limiterons ici à des scénarios dans lesquels une seule des variables de décision aura été modifiée, ce qui permet de mettre en évidence l'effet spécifique de la variable en question.

Les variables modifiées dans les scénarios ci-dessous par rapport au scénario de référence sont, pour celles qui ont trait à la politique forestière:

- les surfaces des plantations forestières
- le rendement pondéral moyen de la carbonisation
- les taxes à la production sur le charbon

pour celles qui ont trait à la politique énergétique :

- le prix ex-Dakar du gaz populaire
- les parts PartFA (§ 5.3.6) des foyers améliorés à charbon
- le prix du kérosène, qui fait son entrée en tant que combustible de substitution

Les résultats de ces divers scénarios montrent qu'il existe de nombreuses manières efficaces - et d'autres qui le sont beaucoup moins - pour infléchir l'évolution des ressources ligneuses qui se profile. De nombreuses autres mesures peuvent être envisagées : il est notamment évident que des importations de charbon peuvent faire baisser les prélèvements de bois dans les forêts nationales dans toutes les proportions voulues.

Augmentation des surfaces des plantations

Dans quelle mesure un effort soutenu du côté des plantations forestières soulagerait-il les ressources ligneuses naturelles? Dans ce scénario, 20'000 ha supplémentaires de forêts naturelles sont aménagées annuellement dès 1995 dans la zone 3 et produisent 20 m³ / ha tous les 7 ans.

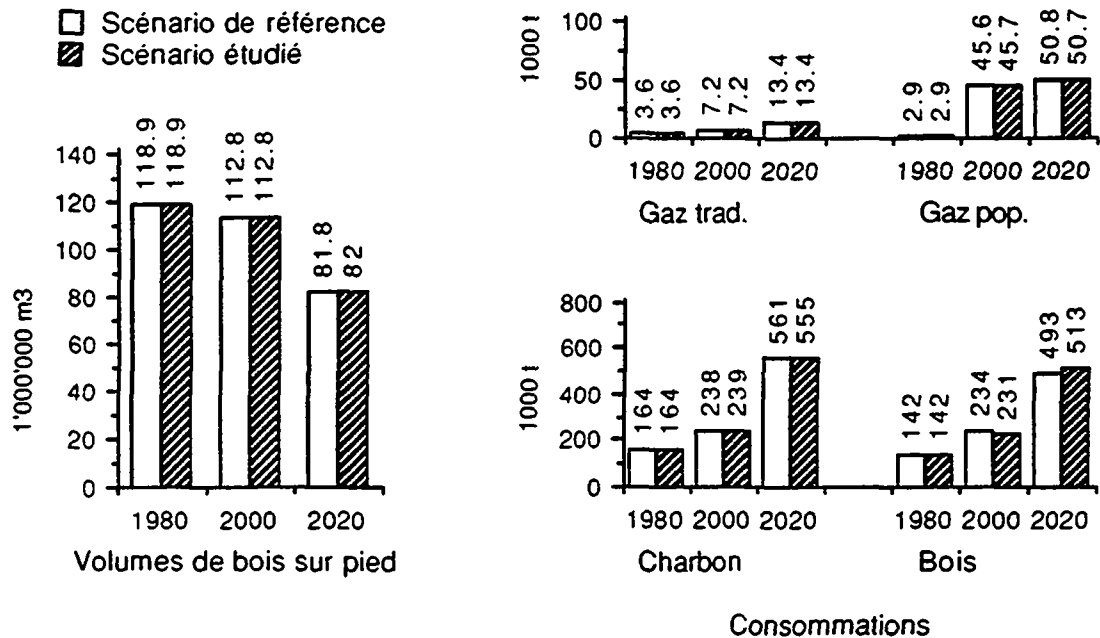


Fig. 6.12 Résultats du scénario "augmentation des surfaces des plantations"

Comme le montrent les résultats ci-dessus, les plantations envisagées ne sont pas de nature à influencer notablement l'évolution des ressources ligneuses : les volumes de bois sur pied sont pratiquement inchangés¹².

Remarquons l'évolution des consommations de bois : ces dernières sont dans un premier temps (2000) plus faibles et ensuite plus élevées que dans le cas du scénario de référence. Cette évolution s'explique par les prix : en 2020, l'amélioration de l'offre de bois près des grands centres de consommation se concrétise pour les consommateurs par des baisses des prix du bois dans certaines zones. En revanche, en l'an 2000, les plantations n'ont pas encore porté leurs fruits alors que d'importantes surfaces ont déjà été réservées à ces plantations.

¹² Etant donné que les volumes représentés sont uniquement ceux des formations ligneuses naturelles, il conviendrait de rajouter au chiffre du scénario étudié le volume du bois sur pied des nouvelles plantations. Ce volume est cependant relativement faible.

Amélioration du rendement pondéral de la carbonisation

Que se passerait-il si on arrivait à faire passer progressivement le rendement moyen de la carbonisation de 20 % en 1980 à 28 % en 2020 ?

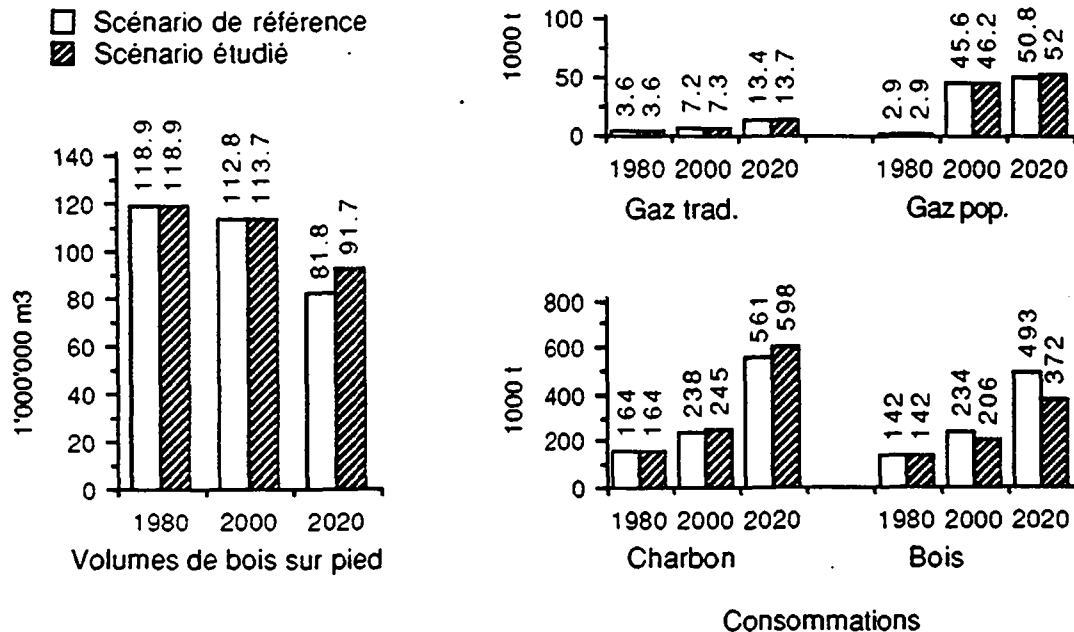


Fig. 6.13 Résultats du scénario "amélioration du rendement pondéral de la carbonisation"

On constate avec satisfaction qu'il reste plus de bois sur pied en 2020 que dans le cas du scénario de référence. Les résultats les plus surprenants à première vue se situent cependant au niveau des consommations, et en particulier au niveau des consommations de bois. Celles-ci sont beaucoup plus basses que dans le cas du scénario de référence : l'amélioration du rendement de la carbonisation permet au charbon d'avoir des prix à l'énergie utile plus compétitifs, et les consommations de ce combustible augmentent aux dépens de celles de bois, ce qui est d'ailleurs néfaste à l'évolution des ressources ligneuses.

Remarquons que le prix de production du charbon a été supposé constant, alors qu'il aurait peut-être dû être légèrement corrigé à la hausse.

Quoi qu'il en soit, un ajustement de la taxe sur le charbon permettrait de maintenir le prix du charbon et de faire bénéficier ainsi pleinement les ressources ligneuses de l'amélioration du rendement de la carbonisation.

Augmentation des taxes sur le charbon

Que se passerait-il si les taxes à la production sur le charbon étaient progressivement relevées jusqu'à 50 F / Kg ?

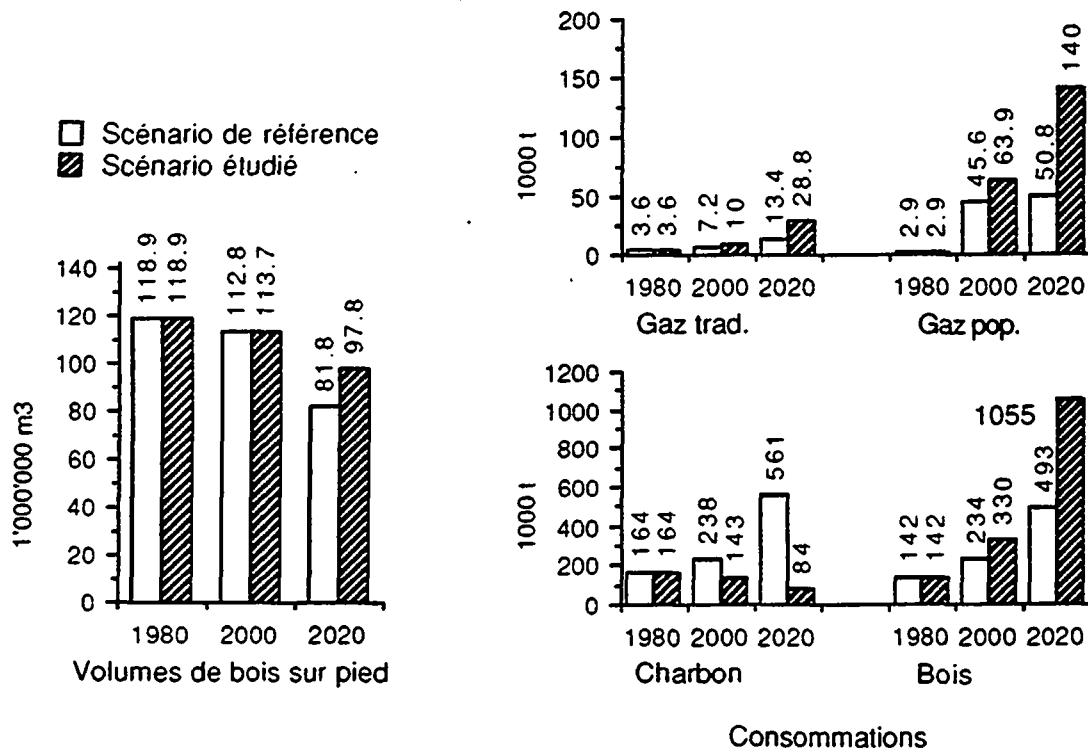


Fig. 6.14 Résultats du scénario "augmentation des taxes sur le charbon"

Les effets de cette taxe sont impressionnants : les consommations urbaines de charbon en 2020 sont divisées par sept ! En valeurs relatives, les consommations de gaz populaire connaissent l'essor le plus grand, mais en valeurs absolues les consommations de bois sont indéniablement les premiers bénéficiaires de la débâcle du charbon.

Les deux substitutions observées - celle en faveur du gaz et celle en faveur du bois - contribuent à préserver les ressources ligneuses naturelles. Les résultats détaillés du scénario montreraient qu'en 2020 les prélèvements ne sont encore que légèrement supérieurs à l'incrément net de biomasse ligneuse avant prélèvements.

Il est certain que la taxe envisagée ne peut pas être mise en oeuvre facilement. En particulier, il risque d'y avoir une forte fraude fiscale en l'absence d'une surveillance adéquate de la filière de production du charbon. Remarquons toutefois que la fraude fiscale ferait gagner aux fraudeurs des sommes dues à l'Etat, mais qu'elle ne ferait très probablement pas baisser sensiblement les prix du charbon. Elle n'affecterait donc guère l'efficacité de la mesure envisagée.

Baisse des prix du gaz populaire

Que se passerait-il si les prix ex-Dakar du gaz populaire, au lieu d'être relevés, étaient abaissés progressivement de 121 F/Kg à 100 F/Kg ?

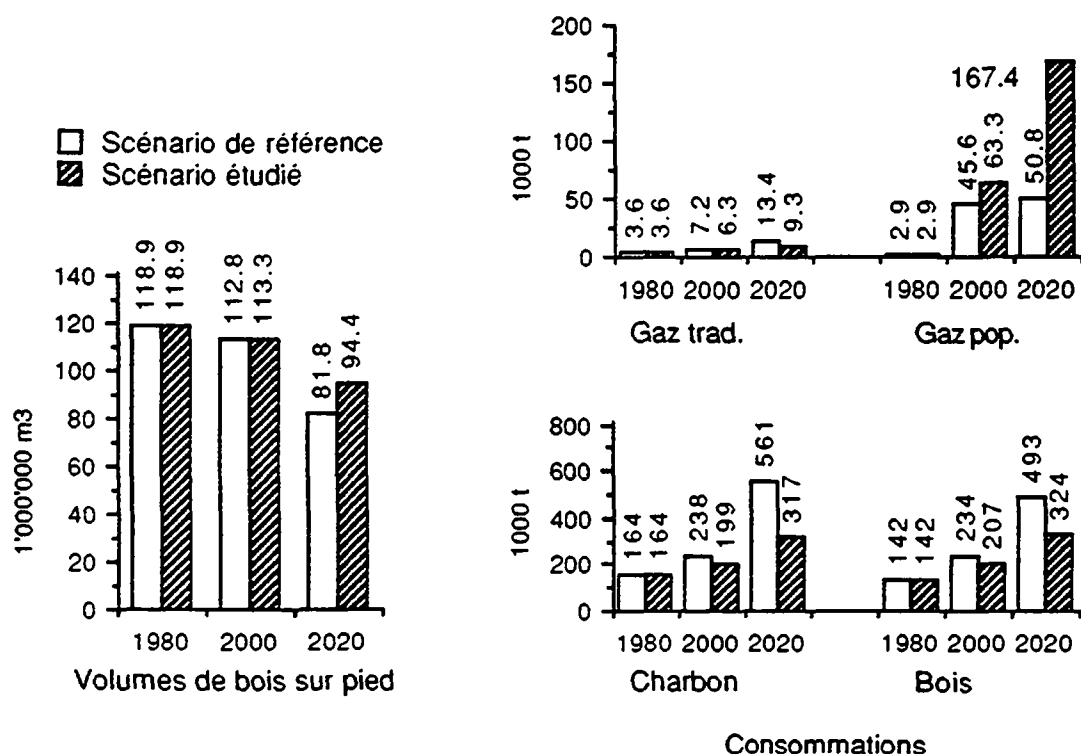


Fig. 6.15 Résultats du scénario "baisse des prix du gaz populaire"

L'augmentation des consommations de gaz populaire en 2020 - par rapport au scénario de référence - est plus forte que dans le cas du scénario précédent ("augmentation des taxes sur le charbon"), mais au niveau des ressources ligneuses, l'effet bénéfique de cette mesure est moins marqué, parce que les consommations de charbon restent cette fois-ci encore relativement importantes.

Or, la promotion du gaz butane coûte cher au pays, puisque le gaz doit être importé. Baisser les prix du butane constitue donc une mesure efficace et qui est facilement mise en oeuvre, mais qui est loin d'être, à elle toute seule, la meilleure réponse au problème du déboisement.

Diffusion plus rapide des foyers améliorés à charbon

Que se passerait-il si, au lieu d'atteindre 40 % en 2020, les parts des foyers améliorés à charbon en milieu urbain atteignaient 90 % cette même année ?

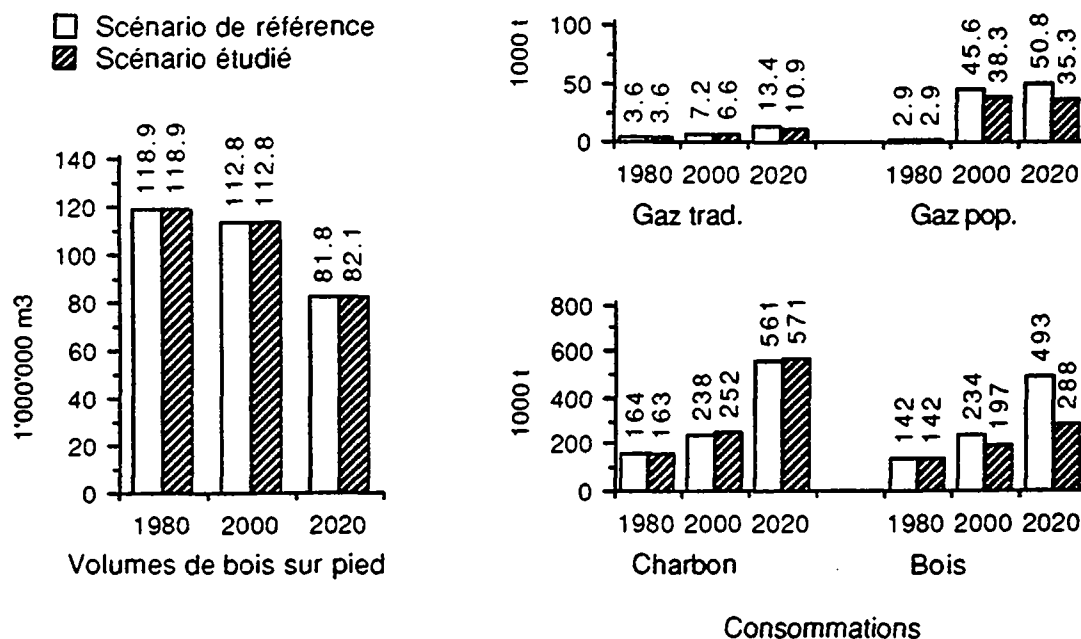


Fig. 6.16 Résultats du scénario "diffusion plus rapide des foyers améliorés à charbon"

On pourrait s'attendre à priori à de fortes économies de charbon et à une baisse de la pression sur les ressources ligneuses. Il n'en est rien : la diffusion massive des foyers améliorés a pour effet de réduire le prix de revient de l'énergie utile tirée du charbon, ce qui amène les consommateurs à satisfaire davantage de besoins à partir du charbon. Ainsi, la mesure adoptée produit bien une diminution des consommations d'énergie, mais, par l'entremise du choix des combustibles qu'effectuent les consommateurs, cette économie d'énergie se trouve transférée sur les autres combustibles. En fin de compte, les consommations de charbon sont même légèrement supérieures à ce qu'elles étaient dans le scénario de référence, et les prélèvements de bois dans les ressources ligneuses naturelles atteignent presque le même niveau.

Ce scénario donne ainsi une excellente illustration de l'intérêt d'une modélisation de l'ensemble du système énergétique-forestier.

Des mesures d'accompagnement efficaces pour la diffusion des foyers améliorés seraient le relèvement des taxes sur le charbon ou encore la diffusion massive parallèle de foyers améliorés à bois.

Promotion du kérosène

Dans le scénario de référence, l'offre de kérosène pour la cuisine était supposée inexistante. Que se passerait-il si le kérosène avait été lancé dès 1980 avec un prix le rendant légèrement plus attrayant que le gaz populaire ? Un paramètre β_0 nul est attribué au kérosène (comme pour gaz populaire).

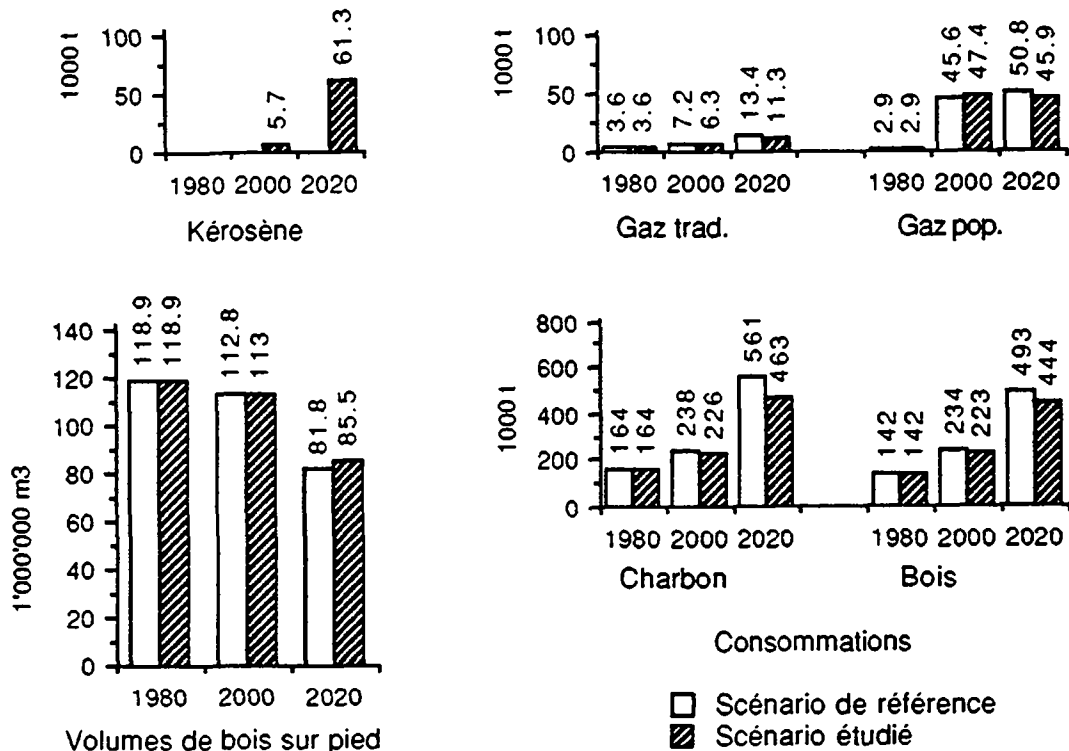


Fig. 6.17 Résultats du scénario "promotion du kérosène"

En tenant compte des rendements et des pouvoirs calorifiques on peut constater que le nouveau combustible parvient en 2020 à un score à peu près équivalent à celui du gaz populaire dans le scénario de référence, en termes d'énergie utile consommée.

Les résultats détaillés du scénario montreraient que la percée du kérosène se fait surtout à Dakar - comme, du reste, celle du gaz populaire : 35'500 tonnes sur le total de 61'300 tonnes pour l'an 2020. C'est en effet dans cette ville qu'il est le plus compétitif par rapport aux combustibles traditionnels.

Pour la satisfaction des mêmes besoins, le kérosène coûte généralement moins cher à l'importation que le GPL ("gaz butane"). Même s'il ne peut pas s'imposer à moyen terme (remarquer que l'état des ressources ligneuses en l'an 2000 est encore presque identique à celui du scénario de référence), il pourrait permettre au pays de réaliser d'importantes économies à long terme.

7 CONCLUSION GÉNÉRALE

Les contributions de cette thèse sur le plan méthodologique

Les contributions de cette thèse à l'élargissement de nos connaissances se situent essentiellement sur le plan méthodologique. Une méthode a en effet été développée pour représenter formellement l'ensemble des relations qui gouvernent un système énergéico-forestier relativement complexe. De nombreuses variables qui influencent l'évolution de parties de ce système ont pu être rendues endogènes. C'est le cas des quantités de combustibles ligneux commercialisés qui sont prélevées dans les ressources ligneuses, c'est le cas des prix et des quantités transportées, c'est le cas des parts des différents agents énergétiques dans la satisfaction des besoins des ménages urbains en énergie de cuisson. Cette endogénéisation de variables importantes augmente la cohérence des scénarios portant sur l'avenir énergétique et forestier du pays.

Parallèlement, un niveau de désagrégation élevé des éléments observés (ressources ligneuses, consommateurs) a pu être préservé, ce qui permet d'obtenir une représentation plus fiable de la réalité, une meilleure exploitation de l'information contenue dans les données disponibles, et un niveau de détail plus élevé des résultats.

Le système énergéico-forestier du Sénégal est, dans son ensemble, un système extrêmement lent. Il se prête donc mal à une analyse de sa dynamique par l'observation courante. Néanmoins, les principales hypothèses faites ont pu être confrontées à des données disponibles. Dans certains cas, elles ont pu être partiellement validées (hypothèses sur la formation des prix, formalisation du processus de choix des équipements); dans d'autres, il a seulement été possible de dire que les observations n'infirmèrent pas les hypothèses faites (indépendance entre la consommation d'énergie utile et le choix des équipements, pertinence des variables explicatives "taille du ménage" et "standing" pour l'énergie utile). L'analyse effectuée permet donc d'évaluer valablement différentes options de politique énergétique et forestière.

Les options prometteuses de politique énergétique et forestière

- Du côté de l'exploitation forestière, l'importance d'une gestion différenciée dans l'espace est évidente. Les formations déjà surexploitées, les formations à faible capacité de régénération et les formations sur sols sensibles doivent, dans la mesure du possible, être épargnées pour éviter que leur productivité ne baisse davantage et que leur environnement ne subisse d'importantes et irréversibles dégradations. Une telle gestion doit se fonder sur un inventaire cartographique détaillé.

Parallèlement, des mesures doivent être prises pour limiter la fraude, qui empêche la réalisation d'une gestion équilibrée de l'exploitation et peut même, si elle est assez importante, faire baisser régionalement les prix des combustibles ligneux sur le marché par la modification des quantités disponibles aux lieux de production.

En outre, l'amélioration du rendement moyen de la carbonisation devrait rester un objectif de premier plan, car les quantités prélevées y sont très sensibles.

- Les taxes sont le principal moyen par lequel l'Etat peut agir efficacement sur la commercialisation et la distribution des combustibles ligneux. L'analyse faite du comportement des agents économiques de l'offre mène en effet à la conclusion que l'imposition de quotas sur les flux interrégionaux ferait perdre de l'efficacité au système de transport.

Des taxes sur le bois coupé permettent à l'Etat d'augmenter l'attrait des combustibles de substitution, tout en dégageant des revenus qui lui permettront de favoriser la régénération des ressources ligneuses (travaux de protection, d'aménagement). Cependant, l'augmentation des prix doit pouvoir être acceptée sur le plan politique, avec ses implications sociales.

Comme nous l'avons vu au chapitre 4, des taxes qui ne modifient pas les prix sont celles qui pourraient être prélevées pour encaisser les marges supplémentaires, qui reviennent actuellement aux bénéficiaires de quotas de production bien situés. De telles taxes pourraient apporter à l'Etat des recettes supplémentaires substantielles. La modélisation proposée permet d'évaluer les valeurs que devraient prendre ces taxes en différents endroits de l'espace.

Il est par ailleurs possible de favoriser la consommation de bois de feu aux dépens de celle de charbon, et de réduire ainsi les prélèvements totaux de bois, en taxant davantage le bois à carboniser que le bois commercialisé comme tel. Une telle mesure n'a pas nécessairement de répercussions importantes au niveau des dépenses des ménages.

- Les combustibles de substitution ne semblent avoir de chances de propagation que si leurs prix à l'énergie utile sont inférieurs à ceux des combustibles ligneux auxquels ils doivent se substituer. D'un autre côté, l'écart des prix ne semble plus avoir d'importance au delà d'un certain seuil. Le modèle proposé peut donc être mis à profit pour définir une politique des prix efficace qui, en cas de subventionnement, ne charge pas le trésor public au-delà de ce qui est nécessaire.

- Du côté des actions visant directement les consommateurs, l'importance des mesures favorisant la diffusion de foyers améliorés à bois et à charbon n'est plus à démontrer. L'augmentation du rendement a une influence immédiate sur les prélèvements de bois. Cependant, elle peut aussi avoir un effet pervers bien représenté par le modèle : en raison de la baisse du prix à l'énergie utile qui accompagne l'augmentation d'un rendement, les consommateurs auront tendance à se désintéresser des combustibles de substitution, à moins que ne soient prises des mesures d'accompagnement appropriées, comme une augmentation des taxes sur les combustibles ligneux. Enfin, la publicité en faveur des combustibles de substitution est certainement un outil efficace de politique énergétique, bien que son influence n'ait pas pu être mise en évidence.

Les perspectives de recherche

La modélisation a été, dans la mesure du possible, étendue à tous les domaines du système énergéico-forestier. Cependant, certaines relations n'ont pas pu être analysées en raison du manque de données :

- l'influence des prix des combustibles, des prix des foyers et du profil socio-économique des ménages sur l'évolution des parts des foyers améliorés;
- l'influence des prix des combustibles sur l'évolution des consommations globales d'énergie;
- l'influence de l'adaptation de certains combustibles à certains usages sur les possibilités de substitution.

L'intégration de telles relations constituerait un enrichissement sensible du modèle. Elle pourrait se faire sur la base d'enquêtes appropriées qui s'étendraient sur plusieurs années. D'autre part, le modèle pourrait être étendu au delà du système énergéico-forestier, par exemple en reliant les variables socio-économiques à des indicateurs macro-économiques.

Il sera par ailleurs intéressant de confronter à de nouvelles données les hypothèses faites dans cette étude, notamment sur le comportement des agents économiques du système d'offre et sur celui des consommateurs. On pourrait par exemple utiliser des données provenant de pays voisins ou se trouvant dans des situations similaires (Mali, Burkina, Niger, Tchad, Soudan, Kenya, etc...)

Le Sénégal, comme de nombreux autres pays sahéliens ou plus lointains, se trouve actuellement dans une situation difficile, et ses intérêts à long terme sont probablement plus que jamais menacés. Dans une telle situation, l'approfondissement des connaissances des phénomènes en jeu est impératif : il permet non seulement de reconnaître à temps les dangers, mais aussi de trouver de nouvelles voies pour les éviter.

BIBLIOGRAPHIE

Allen J.C., 1983

"Deforestation, Soil Degradation and Wood Energy in Developing Countries", Thèse, The Johns Hopkins University

Allen J.C., 1986

"Multiobjective Regional Forest Planning Using the Noninferior Set Estimator (NISE) Method in Tanzania and the United States". Forest Science, Vol. 32, No 2, pp. 517-533

Aubreville A., 1949

"Climats, forêts et désertification de l'Afrique Tropicale", Société d'Editions Géographiques, Maritimes et Coloniales, Paris

Banque Mondiale, 1989

"Sénégal: Stratégie pour l'énergie domestique urbaine", Banque Mondiale / PNUD, mars 1989.

Baril P., 1991

"Erodibilité des sols et erodabilité des terres: Application au Plateau Vaudois" (Thèse), Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Lausanne

Ben Akiva M., Lerman S. R., 1985

"Discrete Choice Analysis: Theory and Application to Travel Demand", MIT Press, Cambridge, Massachusetts

Bergeret A., Ribot J. C., 1990

"L'arbre nourricier en pays sahélien", Ministère de la Coopération et du Développement et Fondation de la Maison des sciences de l'homme, Paris

Biarnes P., 1988

"Sénégal - 1988", Marchés Tropicaux, 15 juillet 1988, pp. 1935- 1958

Carlevaro F., 1975

"Sur la comparaison et la généralisation de certains systèmes de fonctions de consommation semi-agrégées" (Thèse), Herbert Lang, Berne

Carlevaro F., Spierer Ch., 1983

"Dynamic Energy Demand Models with Latent Equipment", European Economic Review 23, North Holland, pp. 161-194

Chauvel A., 1977

"Recherches sur la transformation des sols ferrallitiques dans la zone tropicale à saisons contrastées", Trav. et Doc. ORSTOM, no 62

Chauvel A., Pedro G., 1978

"Genèse de sols beiges (ferrugineux tropicaux lessivés) par transformation de sols rouges (ferrallitiques) de Casamance (Sénégal). Modalités de leur propagation", Cahiers ORSTOM, Série Pédologie, vol. XVI, no 3, pp. 231-249

CERER, 1982

"Les consommations de combustibles domestiques au Sénégal sur foyers traditionnels et foyers améliorés", Centre d'Etudes et de Recherches sur les Energies Renouvelables, Dakar, mars 1982

Chiang A. C., 1984

"Fundamental Methods of Mathematical Economics"

Cisse S., 1988

"Politique des prix et substitution entre les combustibles: l'option gaz butane", (Note du Directeur de l'Energie), Dakar

Clément J., 1982

"Estimation des volumes et de la productivité des formations mixtes forestières et graminéennes tropicales", Revue Bois et Forêts des Tropiques, no 198, 4ème trimestre, pp. 35-58

Corps de la Paix Américain, 1982

"Enquête sur l'énergie en milieu rural", Energy Sector, Office of Program Development, United States Peace Corps, Washington D.C., juin 1982

C.T.F.T., 1981

"Plan directeur de développement forestier. Phase de diagnostic", Rapport A : Les ressources forestières, Centre Technique Forestier Tropical

De Lepeleire G., Krishna K., Verhaart P., Visser P., 1984

"Guide technique des fourneaux à bois", Collection de l'Association Bois de Feu, Edisud, Aix-en-Provence

Delwaulle J.-C., 1973

"Désertification de l'Afrique au Sud du Sahara", Revue Bois et Forêts des Tropiques, no 149, Mai-Juin, 1973

Di Meo G., 1985

"Quelles énergies domestiques pour les populations urbaines d'Afrique noire?", Energie populaire dans le tiers - monde, ENDA, Dakar, pp. 61-84

Dieme M., Ndiaye Kone O, Laura Ph., 1991

"Etude sur les points de vente et les prix des combustibles ligneux à Dakar", République du Sénégal, Ministère de l'Industrie, du Commerce et de l'Artisanat, Direction de l'Energie, des Mines, et de la Géologie, Programme FAC / ABF, Dakar

Direction de l'aménagement du territoire / D.A.T. (Dakar, Sénégal) et Nations Unies, 1984

"Schéma national d'aménagement du territoire", Version préliminaire

Direction de l'aménagement du territoire / D.A.T. (Dakar, Sénégal) et Nations Unies, 1989

"Esquisse Finalisée du Plan National d'Aménagement du Territoire"

Domenich Th. A., Mc Fadden D., 1975

"Urban Travel Demand: A Behavioral Analysis", North Holland, Amsterdam, ...

Doyen A., Thill G., Wade T., 1985

"Une filière de paupérisation: le bois dans la région dakaroise", Energie populaire dans le tiers - monde, ENDA, Dakar, pp. 133-160

Duhamel B., 1985

"Crise énergétique et environnementale en Afrique", Energie populaire dans le tiers - monde, ENDA, Dakar, pp. 85-106

ENDA, 1988

"Bulletin Afrique-Liaison-Energie", ENDA, Dakar, avril 1988

ENDA , MDIA, 1987

"Statistiques et bilans énergétiques du Sénégal", ENDA - Programme Energie / République du Sénégal, Ministère du Développement Industriel et de l'Artisanat

Feller C., 1977

"Evolution des sols de défriche récente dans la région des Terres Neuves (Sénégal Oriental)", 2ème partie : Aspects biologiques et caractéristiques de la matière organique, Cahiers ORSTOM, Série pédologie, Vol. XV, no 3, ORSTOM, Paris

Feller C., Milleville R., 1977

"Evolution des sols de défriche récente dans la région des Terres Neuves (Sénégal Oriental). 1ère partie : Présentation de l'étude et évolution des principales caractéristiques morphologiques et physico-chimiques", Cahiers ORSTOM, Série biologie, Vol. XII, no 3, ORSTOM, Paris

Gardel A., 1979 et 1981

"Energie - Economie et prospective", Pergamon Press

Gavaud M., 1989

"Nature et localisation de la dégradation des sols au Sénégal", Cahiers ORSTOM, Série pédologie, Vol XXV, no 3, 1989-1990, pp. 253-262

Giffard P.L., 1974

"L'arbre dans le paysage sénégalais : Sylviculture en zone tropicale sèche", Centre Technique Forestier Tropical

Giffard P.L., et De Bongnie B., 1984

"Stratégie d'utilisation des terres et délimitation du patrimoine forestier : Sénégal", FAO, Rome

Gorse J.E., et Steeds D.R., 1987

"Desertification in the Sahelian and Sudanian Zones of West Africa", World Bank Technical Paper no 61, World Bank, Washington, D.C., juin 1987

Greenhut M. L., Ohta H., 1975

"Theory of Spatial Pricing and Market Areas", Duke University Press, Durham, N.C.

Healy M. J. R., 1988

"GLIM: An Introduction", Clarendon Press, Oxford

Hosmer D. W., Lemeshow S., 1989

"Applied Logistic Regression", Wiley, New York

Jaccard M., 1987

"Analyse et modélisation désagrégée de la demande industrielle d'énergie: application au cas de l'industrie du papier-carton en France" (Thèse), Université des Sciences Sociales de Grenoble II

Jambes J.-P., Lauribe M., 1983

"Energie, espace et société dans l'agglomération de Dakar", sous la direction de Di Meo G. et Guerrero R., Université de Pau et des Pays d'Adour, République du Sénégal, T.E.R. Aménagement du Territoire

Keita N.M., 1982

"Les disponibilités de bois de feu en région Sahélienne de l'Afrique Occidentale", Rome, UNFAO

Kirkby M.J., 1980

"The problem" in M.J. Kirkby, R.P.C. Morgan, Soil Erosion, pp. 1-16, John Wiley & Sons, Chichester

Lapillone B., 1984

"L'approche MEDEE-S pour l'évaluation de la demande d'énergie dans les pays en développement", Institut Economique et Juridique de l'Energie, Grenoble

Laura Ph., 1990

"Projet de diffusion de foyers améliorés à Dakar: rapport de synthèse des activités", Ministère Français de la Coopération, République du Sénégal, Ministère de L'Industrie et de l'Artisanat, Direction de l'Energie, des Mines, et de la Géologie, Association Bois de Feu, Dakar

Le Borgne J., 1988

"La pluviométrie au Sénégal et en Gambie", Université Cheikh Anta Diop, Laboratoire de Climatologie, Dakar

Le Houerou H.N., 1976

"Nature and Causes of Desertization", in M. Glantz, Desertification in and around arid-lands, Westview, Boulder, Colorado, pp. 17-38

Madon G., 1985

"Sénégal: Le secteur des combustibles domestiques", Rapport préliminaire, Banque Mondiale, avril 1985

Madon G., Matly M., 1987

"Sénégal, Energie Domestique: Eléments de Stratégie", République du Sénégal, Ministère du Développement Industriel et de l'Artisanat, Direction de l'Energie, SEED / Banque Mondiale, août 1987

Maignien R., 1965

"Notice explicative de la carte pédologique du Sénégal au 1/1 000 000", ORSTOM

Mainguet M., 1986

"The Wind and Desertification Processes in the Saharo-Sahelian and Sahelian Regions", in F. El Baz, M.H.A. Hassan, Physics of Desertification, Martinus Nijhoff Publishers, Dordrecht

Malinvaux E., 1969

"Méthodes statistiques de l'économétrie", Dunod, Paris

Marius C., 1986

"Contribution à l'étude des mangroves du Sénégal et de la Gambie. Ecologie, Pédologie, Géochimie. Mise en valeur et aménagement", Cahiers ORSTOM, Série Pédologie, Vol. XXI no 1, 1984-1985, ORSTOM, Paris, pp. 127-131

McFadden D., 1974

"Conditional Logit Analysis of Qualitative Choice Behavior", In Frontiers in Econometrics, P. Zarembka, Ed. Academic Press, New-York, pp. 105-142

McFadden D, Cowing Th. G., 1984

"Microeconomic Modeling and Policy Analysis: Studies in Residential Energy Demand", Academic Press, Orlando ...

Mitchell J.K., Bubbenzer G.D., 1980

"Soil Loss Estimation", in M.J. Kirkby, R.P.C. Morgan, Soil Erosion, John Wiley & Sons, Chichester, pp. 17-62

Munro D.D., 1983

"Teaching Growth Model Construction; a Case Study", In Forest Growth Modeling and Simulation, Mitteilungen der Forstlichen Bundesversuchsanstalt Wien, 147. Heft, Wien

National Research Council, 1984

"Agroforestry in the West African Sahel", Advisory Committee on the Sahel Board on Science and Technology for International Development, Office of International Affairs, National Research Council, United States of America, National Academy Press, Washington, D.C.

Neumann A., 1992

"Analyse du problème du bois-combustible et modélisation de la dynamique des ressources ligneuses au Sénégal", Actes du XXXIIIème Colloque international de l'Association d'Econométrie Appliquée, «Econométrie de l'Environnement», Centre Universitaire d'Etude des Problèmes de l'Energie, Genève et, Office Fédéral de l'Environnement, des Forêts et du Paysage, Berne

ORSTOM-Unesco, 1983

"Ecosystèmes forestiers tropicaux d'Afrique", ORSTOM et Unesco

Papee J., 1985

"La modélisation des demandes énergétiques substituables: l'approche Translog" (Thèse, Ecole Nationale Supérieure du Pétrole et des Moteurs), Editions Technip, Paris

Pedro G., Kilian J., 1987

"Les travaux pédologiques et les études des milieux physiques réalisés par les organismes français de recherche pour le développement dans les régions chaudes", Sols et eaux, acquis et perspectives de la recherche agronomique française en zone intertropicale, ORSTOM

Phlips L., 1987

"La formation des prix", De Boeck-Wesmael S.A., Bruxelles

Pieri C.J.M.G., 1992

"Fertility of soils. A Future for Farming in the West African Savannah"

Poulsen, 1978

"Man and tree in tropical Africa: Three essays on the role of trees in the African Environment", IDRC - International Development Research Centre, Ottawa

Raskin P. D., 1986

"LEAP: A Description of the LDC Energy Alternatives Planning System", The Beijer Institute, Stockholm, and The Scandinavian Institute of African Studies, Uppsala

République du Sénégal, 1985

"Document de travail pour la réunion des bailleurs de fonds sur le secteur de l'énergie au Sénégal", Paris, 11-12 juillet 1985, Dakar, juin 1985

République du Sénégal, 1987

"Situation économique", édition 1986, République du Sénégal, Ministère de l'Economie et des Finances, Direction de la Statistique

République du Sénégal, 1990a

"Analyse du système énergétique au Sénégal: politique de l'environnement", (document de travail du projet MASENS). Ce document est repris dans : Projet MASENS, Evaluation économique, bilan et perspectives, Ministère de l'Industrie et de l'Artisanat, 1991.

République du Sénégal, 1990b

"Tableau récapitulatif des travaux de reboisement 1961-1989", Direction des Eaux, Forêts et Chasses, Dakar

République du Sénégal, 1991

Voir République du Sénégal 1990a.

Ribot J. C., 1990

"Markets, States and Environmental Policy: The Political Economy of Charcoal in Senegal", (Thèse), University of California at Berkeley

Riou G., 1990

"L'eau et les sols dans les géosystèmes tropicaux", MASSON, Paris

Roose E., 1977

"Erosion et ruissellement en Afrique de l'Ouest", ORSTOM, Paris

Roose E., 1981

"Dynamique actuelle de sols ferrallitiques et ferrugineux tropicaux d'Afrique Occidentale", ORSTOM, Paris

Saboohi Y., 1990

"Ein regionalisiertes Modell für die Energieplanung in Entwicklungsländern", (Thèse), Institut für Kernenergetik und Energiesysteme, Universität Stuttgart

Sarlos G., 1989

"Analyse des systèmes énergétiques - Notes sur le cours du Professeur Dr G. Sarlos", Laboratoire de Systèmes Energétiques, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne

Sarr A, Diao Dj., Sow B., 1987

"Rapport sur les enquêtes de vérification de poids ; ventes du charbon de bois au niveau des agglomérations dakaroises", Ministère du Développement Industriel et de l'Artisanat, Compagnie des Tourbières du Sénégal, et Ministère du Commerce Intérieur et des Prix, février 1987

Scham J., 1985

"Das Experiment Guesselbodi", Projet Planification et utilisation des Sols et Forêts (PUSF), MHE et USAID, Niamey, Janvier 1985

SEMA, ORGATEC, 1983

"Etude de l'importation de bois et de charbon minéral au Sénégal", République du Sénégal, Ministère du Développement Industriel et de l'Artisanat, Direction de l'Energie, SEMA, F-92126 Montrouge, ORGATEC, Dakar

Soltner D., 1981

"Les bases de la production végétale", Tome II, Coll. Sciences et techniques agricoles, Le Clos Lorelle, Angers

Sow H., 1990

"Le bois-énergie au Sahel", ACCT, CTA et Karthala, Ede, Pays Bas

Suarez C., 1985

"Pour une méthodologie de la planification énergétique dans les pays du tiers-monde", Energie populaire dans le tiers-monde, ENDA, Dakar, pp. 257-280

Thiam A., 1985

"Etude de cas: 'Filière bois et charbon de bois' au Sénégal", ENDA T.M. Programme Energie, Dakar

Thiam A., 1985

"Filière bois et charbon de bois au Sénégal", Energie populaire dans le tiers-monde, ENDA, Dakar, pp. 107-132

Tibesar A, White R., 1990

"Pricing Policy and Household Energy Use in Dakar, Senegal", The Journal of Developing Areas 25 (October 1990), pp. 33-48

Trans-Energ, 1982

"Substitution du butane au charbon de bois", (rapport d'étude / projet), pour : République du Sénégal, Ministère du Développement Industriel et de l'Artisanat, par : Trans-Energ, Paris

Tzieropoulos P., 1980

"Contribution à l'étude de la demande de transport: Pertinence de modèles désagrégés", (Thèse), Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne

USAID, 1986

"Cartographie et télédétection des ressources de la République du Sénégal", Etude de la géologie, de l'hydrogéologie, des sols, de la végétation et des potentiels d'utilisations des sols", USAID

Valentin C., 1989

"Les états de surface des savanes de l'Ouest Africain : relations avec les sols et l'économie en eau", SOLTROP 89, Actes du premier Séminaire franco-africain de pédologie tropicale, ORSTOM, Paris

Verstraete M., van Ypersele J.-P., 1986

"Wind versus Water Erosion in the Context of Desertification", in F. El Baz, M.H.A. Hassan, Physics of Desertification, Martinus Nijhoff Publishers, Dordrecht

Wilson S.J., Cooke R.U., 1980

"Wind Erosion", in M.J. Kirkby, R.P.C. Morgan, Soil Erosion, John Wiley & Sons, Chichester pp. 217-252

White R.E., 1979

"Introduction to the Principles and Practice of Soil Science", Second Edition, Blackwell Scientific Publications, Oxford, 1979 et 1987

Zimmermann Karl, 1983

"Enquête sur les besoins et la consommation d'énergie en milieu rural au Sénégal", G.T.Z. (Office Allemand de la Coopération Technique), Eschborn

DOCUMENTS DANS LES ARCHIVES DU PROJET MASENS

Les documents suivants qui figurent dans les archives du projet MASENS sont en relation directe avec le sujet de cette thèse ¹:

- [1] **Ein Modellansatz für Energiesysteme am Beispiel der Küchenbrennstoffe in Senegal**, A. NEUMANN, Prof. G. SARLOS, déc. 1989
- [2] **Méthodes d'Analyse du Système Énergétique du Sénégal (MASENS), Evolution des ressources ligneuses au Sénégal : Données de base**, A. NEUMANN, Janv. 1990
- [3] **Postformation en énergie en Afrique : Méthodes d'Analyse du Système Énergétique du Sénégal (MASENS), Schémas prédéfinis de variation des variables exogènes**, No 405.115, A. NEUMANN, mars 1990
- [4] **Direction de la coopération au Développement et de l'Aide Humanitaire, ..., Méthodes d'Analyse du Système Énergétique du Sénégal (MASENS), Un modèle de simulation de l'offre d'un bien épuisable disponible en différentes qualités par l'attribution de préférences**, No 405.118/Nm/bt, A. NEUMANN, juin 1990
- [5] **Dynamique des ressources et de l'utilisation des combustibles ligneux. Analyse et modélisation dans le cas du Sénégal. Le modèle de simulation de l'évolution des ressources ligneuses. Partie A : Modélisation de l'évolution des ressources ligneuses**, No 405.119/Nm/ea, A. NEUMANN, août 1990
- [6] **Dynamique des ressources et de l'utilisation des combustibles ligneux. Analyse et modélisation dans le cas du Sénégal. Le modèle de simulation de l'évolution des ressources ligneuses. Partie B : L'utilisation du modèle**, No 405.119/Mn/ea, A. NEUMANN, août 1990
- [7] **Dynamique des ressources et de l'utilisation des combustibles ligneux. Analyse et modélisation dans le cas du Sénégal. L'équilibre spatial des prix des combustibles ligneux à demande fixe**, No 405.125/Nm/ea, A. NEUMANN, sept. 1990

¹ Certains sont confidentiels, d'autres peuvent être consultés. S'adresser au secrétariat du Laboratoire de Systèmes Énergétiques, EPFL, Lausanne

- [8] Direction de la Coopération au Développement et de l'Aide Humanitaire, ..., Méthodes d'Analyse du Système Energétique du Sénégal (MASENS), **Prétraitement des résultats des enquêtes "Dakar 1989"**, No 405.124, A. NEUMANN, nov. 1990
- [9] Dynamique des ressources et de l'utilisation des combustibles ligneux. Analyse et modélisation dans le cas du Sénégal. **Un programme d'estimation des coefficients d'un modèle logistique linéaire par la méthode du maximum de vraisemblance**, No 405.129, A. NEUMANN, mai 1991
- [10] Direction de la Coopération au Développement et de l'Aide Humanitaire, ..., Méthodes d'Analyse du Système Energétique du Sénégal (MASENS), **Modèle combustibles domestiques : conception informatique**, No 405.130, A. NEUMANN, juin 1991
- [11] Dynamique des ressources et de l'utilisation des combustibles ligneux. Analyse et modélisation dans le cas du Sénégal. **Esquisse d'une application de la théorie probabiliste des choix à la consommation de combustibles domestiques au Sénégal**, No 405.131/bt, A. NEUMANN, juillet 1991
- [12] Direction de la Coopération au Développement et de l'Aide Humanitaire, ..., Méthodes d'Analyse du Système Energétique du Sénégal (MASENS), **Le modèle ACACIA (ou DOMESCO - titre non encore fixé) : mode d'emploi**, E. GNANSOUNOU, A. NEUMANN, Th. NOUATIN, (à paraître)
- [13] **Projet MASENS - Méthodes d'Analyse du Système Energétique du Sénégal. Document de synthèse des travaux scientifiques de juin 1989 au Sénégal.** A. NEUMANN, Dakar, 30 juin 1989.
- [14] Direction de la Coopération au Développement et de l'Aide Humanitaire, ..., Méthodes d'Analyse du Système Energétique du Sénégal (MASENS), **Méthode d'Aide à la Génération de Scénarios (MAGES) : 1. Présentation de la méthodologie et du contexte d'utilisation dans le cas du projet MASENS**, No 405.120/gn/bd, E. GNANSOUNOU, T. NOUATIN, août 1990

LISTE DES SERVICES ET ORGANISATIONS AU SENEGAL

Les services et organisations énumérés ci-dessous ont contribué dans une large mesure à la réussite de ce travail de recherche. Que les personnes citées et toutes celles qui ont été oubliées en soient chaleureusement remerciées.

Ambassade de Suisse, S.E. l'Ambassadeur M. Barras, Rue René Ndiaye / Seydou Norou Tall, B.P. 1772, Tél. 23.58.48

Association Bois de Feu : M. Philippe Laura, s/c Direction de l'Energie

CERER (Centre d'Etudes et de Réalisations sur les Energies Renouvelables) M. Lamine DIOP, Hann.

CONACILSS (Comité National du CILSS), M. Bassirou DIEDHIOU, Tél. 21.24.61

Corps de la Paix Américain : Shirley BACK (documentation), Allées Papa Gueye Fall, Tél. 23.71.79

CRHUA (Centre de Recherches sur l'Habitat et l'Urbanisme ...), M. DIOUF (Directeur, Fann résidence)

CSE (Centre de Suivi Ecologique), M. Malcolm MARKS (Conseiller technique principal), M. Hubert GEORGE, Hann, Concession de l'Elevage, Tel. 32.10.50

DAT (Direction de l'Aménagement du Territoire); M. Vélance MANGA (Expert sénégalais pour le projet MASENS), Tél. 22.15.77, s/c. Ministère de l'Economie et des Finances, B.P. 3838

Direction des Eaux, Forêts et Chasses, M. SALL (Directeur), B.P. 1831

- Division Exploitation, M. Yoro SOW, Tél. 32.06.28

- Division Sylviculture et Reboisement, M. NDiogou GUEYE, M. Diéthié NDIONE, Tél. 32.35.01

- Bureau Suivi et Evaluation, MM. WADE et DIAYE
- Projet Cofinancement; MM. Amadou Mokhtar NIANG (Chef de projet), Louis VERCHAUD, Clément DIEDHIOU

Direction de l'Energie, des Mines et de la Géologie, B.P. 4037

- Direction du Projet MASENS; MM. Saloum CISSE, DIANKA et DIEME, Tél. 32.07.28

Direction de la Prévision et de la Conjoncture (MEF), MM. TOURE, BA

Direction de l'Urbanisme, M. Babacar Ba, M. Samba DIOUF

ENDA (Environnement et Développement du Tiers-Monde) - Programme Energie, M. Youba SOKONA (Directeur du Programme-Energie), MM. Masse Lo, Libass BA, B.P. 3370, Tél. 22.59.83

ENEA (Ecole Nationale d'Economie Appliquée), Route de Ouakam, en face du dépôt SOTRAC, MM. Alain GALOUP, Adamou HADJ

ENAES (Ecole Nationale ..., formation de cadres administratifs), Route de Ouakam, Point E, M. Marc O'DEYE (Professeur)

GTZ, Bureau, 15, Rue Kleber, Mmes DENTLINGER et BECKER - Projet photovoltaïque, B.P. 3867, M. Benno SCHMIDT-KÜNTZEL (Chef de Projet), Tél. 22.89.39

MIA (Ministère de l'Industrie et de l'Artisanat) - Cabinet, MM. Moussa FAYE (Conseiller, statisticien), Aboubakrem Demba LOM

ORANA (Organisation de Recherche sur l'Alimentation et la Nutrition en Afrique), Dr E.H. NDIAYE (Directeur), en face de l'hôpital Le Dantec, B.P. 2089, tél. 21.79.65 - 22.58.92

ORSTOM (Institut Français de Recherche Scientifique pour le Développement en Coopération), M. MONTOROI (Pédologue), Hann.

SENELEC, Rue Vincens, Tél. 23.72.82, M. E. H. Babacar CISSE (†), Coordinateur international du projet MASENS)

Université de Dakar, Faculté de Géographie, MM. MENE, DIENDIONG

USAID, Mme Fatou KADAR (documentaliste), Place de l'Indépendance

ANNEXES

LISTE DES ANNEXES

- Annexe 1.1** La qualité des données recueillies par enquête
- Annexe 2.1** Unités et facteurs de conversion utilisés
- Annexe 3.1** Ressources ligneuses naturelles du Sénégal : Superficies initiales (1980) par unité forestière
- Annexe 3.2** Ressources ligneuses naturelles du Sénégal : Estimation des taux d'accessibilité, des densités limites d'utilisation, des densités d'équilibre, des taux d'exploitation initiaux et des densités initiales (1980)
- Annexe 3.3** Evolution des surfaces cultivées
- Annexe 3.4** Les sols et leurs niveaux de risque de dégradation
- Annexe 4.1** Justification de l'utilisation des coûts modifiés c^*_{ij} à la place des coûts c_{ij} dans les conditions d'équilibre des prix et des flux
- Annexe 4.2** Distances moyennes entre localités de production et localités de consommation (combustibles ligneux)
- Annexe 5.1** Méthode suivie pour l'évaluation du coefficient de régression linéaire de l'énergie utile avec simulations d'enquêtes (paragraphe 5.2.3)
- Annexe 5.2** Prévisions ex-post de la consommation d'énergie utile des ménages utilisant un foyer Nopalé
- Annexe 5.3** Estimation des paramètres d'un modèle logistique linéaire
- Annexe 5.4** Principales données utilisées pour l'estimation des paramètres des modèles de la dynamique des parts
- Annexe 5.5** Interprétation de la "perte"

ANNEXE 1.1

La qualité des données recueillies par enquête

La qualité des données est déterminante pour la confiance que l'on peut apporter à un modèle, au niveau de la formalisation et, plus encore, au niveau de l'estimation des paramètres.

Les principales questions concernant la qualité des données recueillies sur les prix réels sont développées au paragraphe 4.1.3. Nous nous concentrerons ici sur les questions relatives aux enquêtes auprès des consommateurs.

Organisation des enquêtes

Les premières enquêtes auprès des consommateurs, portant sur les villes de Dakar (juillet-août 1989) puis Gossas, Kaolack, Kaffrine, Malem-Hodar, Tambacounda, Goudiry et Kedougou (juin-août 1990), ont été organisées par la Direction de l'Energie, des Mines et de la Géologie (MLA) en collaboration avec ENDA et d'autres organisations et services du Sénégal¹.

L'organisation de la suite des enquêtes (avril-juin 1991), y compris des enquêtes rurales, a été confiée à ENDA. La Direction de l'Energie a cependant été étroitement associée à leur exécution. Tout au long des enquêtes, ma participation personnelle à la mise au point des questionnaires et à la définition des échantillons m'a permis de veiller à l'adéquation des enquêtes aux besoins de cette étude.

L'échantillonnage

Les échantillons ont été définis en tenant compte des deux objectifs suivants :

- permettre d'obtenir une vue aussi désagrégée que possible des comportements énergétiques grâce à la distinction de zones et de classes de taille d'agglomération
- se prêter à un traitement statistique grâce à un nombre de ménages suffisamment élevé par classe de ménage

... tout en respectant les contraintes financières et organisationnelles qui limitaient la taille de l'échantillon global.

¹ Voir : Ministère de l'Industrie et de l'Artisanat, Direction de l'Energie, des Mines et de la Géologie : *Analyse des Systèmes Energétiques du Sénégal - Enquête consommation d'énergie du secteur domestique - Note d'avancement.*

Le nombre de ménages par ville a ainsi oscillé entre 60 (pour certaines petites villes) et 1000 (pour l'agglomération de Dakar). En milieu rural, le nombre de ménages par village a été fixé à 10 avec en moyenne 4 villages par zone.

Méthode d'enquête

Les enquêtes d'une ville ont été effectuées par des enquêteurs domiciliés dans cette ville ou dans la région administrative. Ils avaient en général déjà participé à des enquêtes, notamment au recensement national de la population. Ces enquêteurs ont été initiés à leur travail par les organisateurs de l'enquête. Ils ont ensuite travaillé sous la supervision d'un responsable local, en général le représentant de la Direction de la Statistique. Ce dernier avait notamment pour tâche de contrôler la crédibilité et la cohérence de certaines réponses figurant sur les questionnaires remplis. Lors d'une mission d'évaluation, les organisateurs récupéraient les questionnaires et décidaient d'éventuelles prestations supplémentaires à fournir par les enquêteurs².

Le tirage de l'échantillon a été fait en découpant la ville en zones homogènes (critère principal : type d'habitat), puis en découpant les zones homogènes en districts d'enquête, en choisissant au hasard un ou plusieurs districts par zone et en sélectionnant à intervalles réguliers des concessions (ou propriétés) le long d'un itinéraire. Lorsque plusieurs ménages se trouvaient dans une même concession, ils ont tous été sélectionnés. En principe, le nombre de personnes objet de l'enquête dans chaque zone homogène a été proportionnel à la population³.

Saisie des questionnaires

La saisie sur support informatique des réponses contenues dans les questionnaires a été effectuée au Sénégal par les organisateurs des enquêtes. Des photocopies d'une petite partie des questionnaires m'ont permis de contrôler la qualité de la saisie. Les chiffres étaient presque toujours reportés fidèlement. En revanche, certaines erreurs graves ont été commises lors de

² Par exemple, les enquêtes sur les prix, effectuées en même temps que les enquêtes auprès des ménages, ont dû être refaites dans la région de Saint-Louis parce que le nombre de pesées avait été insuffisant.

³ Lors de la deuxième phase des enquêtes dans les villes de l'intérieur, des taux de sondage plus élevés ont été appliqués aux zones homogènes "marginales" (les quartiers riches et les quartiers très pauvres). L'objectif était de pouvoir analyser le comportement des groupes sociaux marginaux grâce à des échantillons suffisamment grands. Malheureusement, les enquêteurs ont omis de mentionner le numéro de la zone homogène sur un grand nombre de questionnaires (près de 50 % pour certaines villes). L'échantillon entier a été utilisé pour l'analyse des comportements; par contre, pour définir les classes de ménages et leurs caractéristiques, il a fallu rendre l'échantillon représentatif au niveau de la ville en éliminant (au hasard parmi les questionnaires qui portaient la mention de la zone) un certain nombre de questionnaires des zones homogènes surreprésentées.

l'agrégation de données avant la saisie. Dans certains cas, ces erreurs ont rendu nécessaire une nouvelle saisie⁴.

Représentativité des échantillons

Représentativité au niveau d'une ville

Au niveau d'une ville, la représentativité de l'échantillon devrait être garantie par la technique du choix de l'échantillon décrite ci-dessus. Bien qu'il ne soit pas possible de savoir dans quelle mesure cette technique a réellement été appliquée, il est très probable que les échantillons aient été assez représentatifs. En effet, les taux de sondage élevés (près de 1 % pour Dakar, environ 3 % pour la plupart des grandes villes de l'intérieur et jusqu'à 100 % pour les petites villes) contribuent eux aussi à assurer la représentativité de l'échantillon. Remarquons en outre que, comme le fait ressortir le tableau 5.12, les consommations obtenues par extrapolation des enquêtes dakaroises correspondent assez bien aux autres chiffres disponibles.

Représentativité au niveau d'une zone

L'extrapolation des enquêtes aux villes qui n'ont pas été visitées a été faite en associant à chaque ville une ville représentative ayant fait l'objet d'une enquête. La ville représentative était généralement la ville voisine (de la même zone - sauf exception) ayant la taille la plus proche. Pour les grandes villes, la question de la représentativité de la "ville représentative" ne se pose pas, étant donné que toutes les grandes villes (plus de 40 000 hab. ou capitale régionale) ont subi une enquête. Par contre, la représentativité des échantillons retenus au niveau des petites villes d'une zone est beaucoup plus incertaine. En particulier dans la zone 3 (qui renferme le plus grand nombre de petites villes) les résultats des deux villes visitées de Gossas et Tivaouane montrent que les habitudes en matière de consommations énergétiques peuvent varier considérablement d'une petite ville à l'autre : à Tivaouane, moins de 25 % de l'énergie utile sont tirés du bois de feu, alors que ce sont plus de 50 % à Gossas.

Au niveau des villages, le fait de choisir les villages visités sur la carte au 1:500 000 (IGN) du Sénégal a conduit à une sur-représentation des grands villages. Il n'a cependant pas été possible de mettre en évidence des différences significatives entre les résultats d'enquête des grands et des petits villages - et de corriger la représentativité des données - en raison notamment de la faible taille des échantillons.

⁴ Lors d'une première saisie des enquêtes de Dakar, les "kilogrammes de charbon par jour" ont été mis dans la même colonne que les "kilogrammes par mois". Ils ont donc été additionnés sans prise en compte de la différence d'unités !

Si des erreurs importantes ont certainement été faites lors de l'évaluation de certaines consommations par zone, il est en revanche très probable que, sous réserve de mauvaise qualité des réponses obtenues (voir ci-dessous), les consommations totales par combustible pour le Sénégal aient été relativement bien estimées, ce qui signifie que l'évolution des ressources ligneuses ne devrait pas être entachée d'erreurs importantes liées à l'évaluation des consommations initiales.

Qualité des réponses obtenues

Les réponses obtenues sur les consommations énergétiques sont entachées de diverses erreurs. Ces erreurs sont discutées au paragraphe 5.2.3. Cependant, les données utilisées au chapitre 5 sont déjà partiellement épurées : les questionnaires non cohérents et les réponses aberrantes ont été éliminées.

Les questionnaires non cohérents ou incomplets

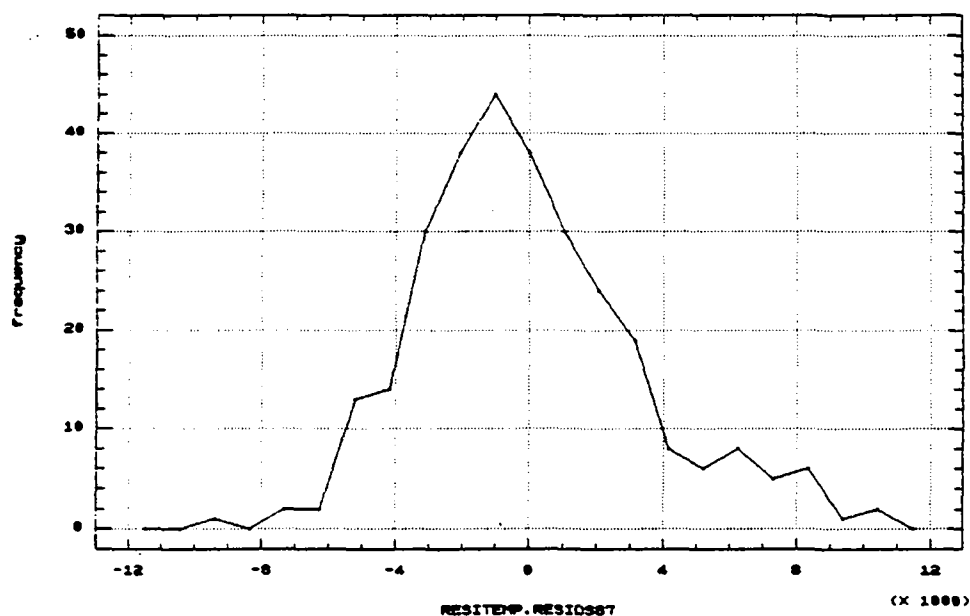
Le principal test de cohérence effectué a porté sur la comparaison des quantités de combustible consommées à la réponse à la question "Quel est votre combustible principal ?". Les questionnaires dans lesquels le "combustible principal" représentait moins de 20 % de l'énergie utile totale consommée ont été éliminés. D'autres questionnaires n'ont pas pu être utilisés pour les raisons suivantes :

- absence totale de consommations d'énergie,
- consommations visiblement aberrantes,
- absence de la taille du ménage.

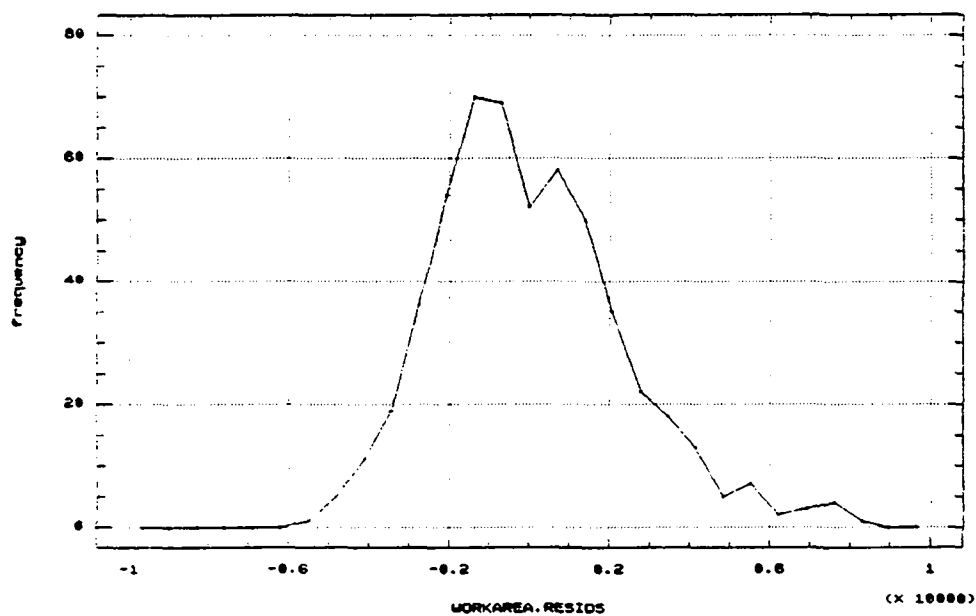
En outre, pour certaines applications, d'autres questionnaires ont été rejetés en raison de l'absence de l'indicateur du standing.

Les consommations aberrantes

Certaines consommations sont visiblement aberrantes. D'autres consommations aberrantes peuvent être identifiées en examinant la distribution des résidus de l'énergie utile totale consommée, obtenus suite à une régression linéaire par rapport au standing et à la taille du ménage (le modèle formel retenu). Ces distributions sont représentées ci-dessous pour les deux enquêtes de Dakar (1987 et 1989).



Résidus des consommations d'énergie utile, Dakar 1987
(régression par rapport au standing et à la taille du ménage)



Résidus des consommations d'énergie utile, Dakar 1989
(régression par rapport au standing et à la taille du ménage)

Les graphiques font apparaître une distribution approximativement normale dans leur partie centrale, qui peut s'expliquer par la somme des différentes erreurs discutées au paragraphe 5.2.3. En revanche, des amas d'observations étranges apparaissent dans les queues des distributions, et plus particulièrement dans les queues droites. Ces amas devraient correspondre

à des réponses franchement fausses. Ils ont été éliminés en fixant des seuils à ± 5000 MJ/an (-6000 MJ/an pour la queue gauche de 1987). Ainsi, 32 observations ont été éliminées en 1987 et 16 en 1989.

Au total, sur quelque 1000 questionnaires remplis, seulement 688 ont été conservés pour Dakar en 1989, et 414 sur 450 ont été conservés pour Dakar en 1987. Pour les villes de l'intérieur du pays, la proportion des questionnaires rejetés a généralement varié entre 5 et 25 %.

ANNEXE 2.1

Unités et facteurs de conversion utilisés

Bois

Masse volumique : 860 kg/m^3 (d'après CTFT, 1981)

Pouvoir calorifique (PCI) : $M_{\text{bois}} = 17 \text{ MJ/kg}$ (d'après CTFT, 1981)

1 stère (quantité de bois à l'état brut pouvant prendre place dans un volume de 1 m^3) = 270 kg (d'après MADON, 1985).

Charbon

Pouvoir calorifique (PCI) : $M_{\text{char}} = 29 \text{ MJ/kg}$ (d'après CTFT, 1981)

Rendement pondéral de la carbonisation : 20% (chiffre couramment admis; on trouve aussi 18%).

Poids d'un sac de charbon "50 kg" : 45 kg (moyenne des valeurs couramment utilisées)

GPL

Pouvoir calorifique (PCI) : $M_{\text{gaz}} = 45,7 \text{ MJ/kg}$ (d'après Banque Mondiale, 1989).

Rendements des équipements du consommateur

Combustible	Foyer	η
Bois	3-pierres	12%
	amélioré (B.A.S.)	20%
Charbon	malgache	20%
	amélioré (Sakkanal)	28%
Gaz	cuisinière	40%
	Blip Banekh	35%
	Nopalé	35%
Kérosène	Zeppelin	27%
	Thomas Cup 20	30%

(cf. tableau 5.3, § 5.2.1)

ANNEXE 3.1

Ressources ligneuses naturelles du Sénégal : Superficies initiales (1980) par unité forestière

Les superficies présentées ci-dessous ont été obtenues par planimétrie sur la carte de la couverture végétale du Sénégal (CTFT, 1981) et ajustement des totaux par région et par genre de formation ligneuse aux chiffres donnés par le CTFT¹.

La colonne "Autres" donne les superficies des surfaces qui n'entrent pas dans les catégories précédentes (y.c. surfaces bâties, surfaces agricoles, voies d'eau).

SUPERFICIES TOUS STATUTS LEGAUX CONFONDUS (en milliers d'ha)

Zone	Steppe arbustive	Steppe arborée	Prairie arborée	Steppe boisée	Savane arbustive	Savane arborée	Savane boisée	Forêt claire	Forêt galerie	Forêt dense	Mangrove	Autres	Total
1	12,6	2,5			0,5							57,4	72,8
2		20,9	3,5	0,7								100,2	125,4
3	224,6	137			169,5	61,1					12,6	1155,1	1759,9
4	17	73	15,2	3,2								500,5	608,9
5	38	62,2			19	305	21,2					541,8	137,8
6	1				1	84,4	14,8				47,6	511,2	660,0
7	130	287	25,6	7								471,8	921,4
8	490	218		1,8	40	74						323,5	1147,3
9	1018	223	78	22,9		1,7						654,4	2638,0
10	228	1307		9,9	37	259,5						148,1	2029,5
11		1,4			17	666,4	105					398,6	1188,4
12					106	1672,4	130,8					193,3	2102,5
13		4			74	1100,5	1198,8		20			138,2	2535,5
14						29,3	20,2	172	7	13	85,2	406,1	732,8
15						90,5	191,6	177,2	3		16,6	255,6	734,3
16					6,5	296,5	756,2		15			293,8	1368,0
Total Sénégal	2158,6	3034,1	122,3	45,5	470	4021,1	2438,6	349,2	45	13	162	6149,7	19672,5

¹ La détermination de ces surfaces est décrite en détail dans le document [2]

ANNEXE 3.2

Ressources ligneuses naturelles du Sénégal : Estimation des taux d'accessibilité, des densités limites d'utilisation, des densités d'équilibre, des taux d'exploitation initiaux et des densités initiales (1980)

Taux d'accessibilité

Les taux d'accessibilité retenus pour 1980 sont proches de ceux proposées par KEITA (1982) et MADON (1985).

Zones	1980	2020
1, 2, 3, 4, 7, 8	80 %	100 %
5, 6, 11, 12, 14, 15, 16	70 %	90 %
9, 10, 13	40 %	70 %

Ces chiffres sont utilisés pour toutes les formations ligneuses et tous les statuts. La progression entre les valeurs de 1980 et celles de 2020 est supposée linéaire.

Densités limites d'utilisation

MADON (1985) a estimé que les taux d'utilisation (1 - densité limitée d'utilisation / densité avant coupe) variaient entre 70 % dans les régions boisées du Sud et de l'Est et 95 % dans les régions à pénurie de bois. Ces taux tiennent compte des utilisations concurrentes du bois et ne devraient guère évoluer à moyen terme. Ils seront repris et considérés constants, d'où les densités limites d'utilisation par domaine climatique :

Domaine climatique	Densité limite d'utilisation
Sahélien	5 % d _{eq}
Soudano-sahélien	10 % d _{eq}
Soudano-guinéen	30 % d _{eq}
Guinéen	30 % d _{eq}

Taux d'exploitation et densités moyennes (1980)

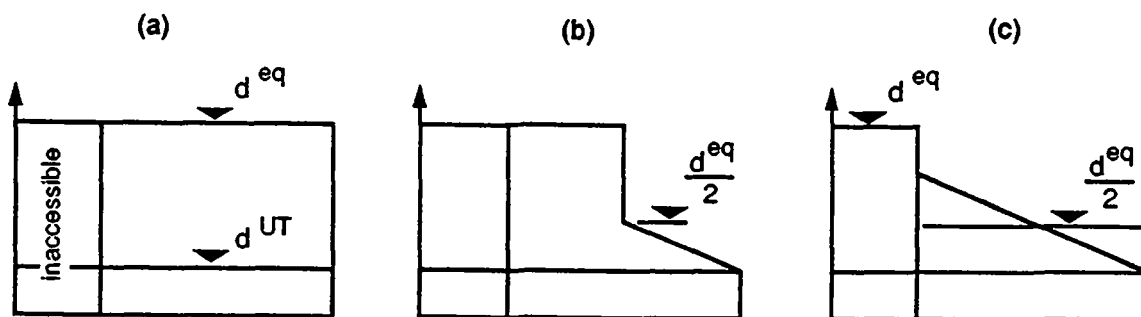
En 1980, l'exploitation forestière à grande échelle, menée en vue de la satisfaction des besoins en charbon des grandes villes, battait son plein dans les régions de Saint Louis et du Sine-

Saloum. Les zones proches des grandes villes commençaient à être surexploitées, alors que les régions plus éloignées ne satisfaisaient guère que des besoins locaux.

On peut estimer que les taux d'exploitation des formations ligneuses par zone s'établissaient comme suit (statuts "sans statut particulier" et "forêts domaniales aménagées"²).

Zones	Part exploitée de la partie accessible	Catégorie
12, 13, 6	0 %	(a)
5, 6, 8, 11, 14, 15	50 %	(b)
1, 2, 3, 4, 7	100 %	(c)

Pour chacune des trois catégories de zones définies, la figure suivante donne la fonction de répartition simplifiée (inversée) de la densité que l'on peut leur attribuer :



Dès lors, les densités moyennes des parties exploitées deviennent :

Catégorie	Zones	Densité, partie exploitée
(a)	10, 12, 13, 16	d^{eq}
(b)	5, 6, 8, 11, 14, 15	$(1/2)d^{UT} + (3/8)d^{eq}$
(c)	1, 2, 3, 4, 7, 9	$(1/2)d^{eq}$

² Dans les autres statuts qui bénéficient d'une protection légale interdisant la coupe de bois, on peut admettre que le taux d'exploitation était nul et que la densité moyenne était égale à celle d'équilibre.

Densités d'équilibre

Avec ces formules, on peut estimer les densités moyennes par genre de formation ligneuse et par climat (tous statuts et tous niveaux d'exploitation confondus) en fonction de d^{eq} , et imposer que ces densités soient égales aux valeurs données (tableau 3.1), ce qui peut permettre d'évaluer les densités d'équilibre :

Genre de formation ligneuse	Domaine climatique			
	sahélien	soudano-sahélien	soudano-guinéen	guinéen
Steppe arbustive	0,1	0,8	0,8	
Steppe arborée	1,1	3,0	3,0	
Prairie arborée	1,5			
Steppe boisée	11,0			
Savane arbustive	0,6	1,2	1,2	
Savane arborée	3,0	6,0	6,0	
Savane boisée		16,0	30,0	30,0
Forêt claire				75,0
Forêt dense + galerie			100,0	120,0
Mangroves		30,0	40,0	50,0

Densités d'équilibre

Ces densités d'équilibre permettent de calculer les densités des parties exploitées et inexploitées de toutes les unités forestières (elles sont soit égales à d^{eq} , soit définies par les formules ci-dessus).

ANNEXE 3.3

Evolution des surfaces cultivées

Les superficies et les taux d'expansion des surfaces cultivées données ci-dessous sont basées sur les estimations du Schéma national d'aménagement du territoire (DAT et Nations Unies, 1984)³.

SURFACES CULTIVEES EN 1980 [10³ ha]

Zone	Arachide	Mil	Riz	Maïs	Manioc	Niébé	Coton	Autres	Total
1	3,8	3,8	0	0	0,3	0,4	0	0	8,3
2	25,2	13,0	0	0	2,2	3,1	0	0	50,5
3	415,1	438,2	1,8	5,3	16,7	23,2	2	0	902,3
4	93,1	73,0	0	0	9,9	14,2	0	0	190,2
5	127,6	69,1	0	11,8	1,2	0	3,3	0	213,0
6	129,4	94,9	0,2	10,9	1,3	0,2	2,8	0	240,4
7	34,8	51,1	9,7	0,5	1,5	7,5	0	9,5	114,6
8	0,4	35,9	4,1	7,5	0	1,8	0,2	0,2	50,2
9	35,9	47,3	0	0	0,4	6,8	0	0	90,5
10	0	28,8	0	0	0	4,6	0	0	33,4
11	17,9	18,7	0,4	2,1	0,5	0,6	4,4	0	44,5
12	7,0	18,4	0,2	8,3	0,4	0,4	3,8	0	39,1
13	16,2	34,0	2,1	5,3	0,6	0,5	3,4	0	62,1
14	25,3	23,1	32,2	3,1	2,2	1,8	0	0	91,8
15	39,9	33,4	19,8	1,1	1,1	0,2	0,2	0	101,6
16	45,6	69,1	14,9	10,0	1,1	0,1	14	0	134,8
Total Sénégal	1021,3	1044,7	86,9	65,2	39,4	65,4	34,1	9,7	2367,6

³ Quelques hypothèses supplémentaires ont dû être faites. Elles sont décrites dans le document [2]

TAUX DE CROISSANCE DES SURFACES CULTIVEES [%]

Zone	Arachide	Mil	Riz	Mais	Manioc	Niébé	Colin	Autres	Total
1	0	0	-	-	2	0	-		
2	0	0	-	-	2	0	-		
3	0	0	5,2	6	2	0	2,5		
4	0	0	-	-	2	0	-		
5	0,7	1,9	-	3,8	2	-	2,5		
6	0,7	1,9	5,2	3,8	2	0	2,5		
7	0,7	1,9	2,8	0	2	0	-	0,9	
8	1,4	2,8	2,2	0	-	0	2,5	0	
9	1,4	2,8	-	-	2	0	-		
10	-	0	-	-	-	0	-		
11	1,4	2,8	1,4	3,8	2	0	2,5		
12	1,4	2,2	1,4	3,8	2	0	2,5		
13	1,4	2,8	1,4	3,8	2	0	2,5		
14	0,7	1,9	1,4	3,8	2	0	-		
15	1,4	2,8	1,4	3,8	2	0	2,5		
16	1,4	2,8	1,4	3,8	2	0	2,5		
Total Sénégal									

Hypothèses sur les taux de jachères :

- Zones 1 à 6 : 25 %
- Zones 7 à 16 : décroissance linéaire de 33 à 25 % en 40 ans.

ANNEXE 3.4

Les sols et leurs niveaux de risque de dégradation

Légende :

Zne : zone Nfr : numéro de formation ligneuse

Frm : genre de formation ligneuse (dans l'ordre où elles sont données à l'annexe 3.1)

Niveaux de risque : e : érosion éolienne a : acidification des sols de mangrove
h : érosion hydrique l : lessivage et concrétionnement

La nomenclature est donnée à la fin de l'annexe

Zne	Nfr	Frm	Sols principaux (Nomenclat. USAID, 1986)	e	h	l	a
1	1	1	P2a1 (70%); P2c2 (20%)	2	2	1	1
	2	2	Le (50 %); P2c1 (30 %)	2	3	1	1
	3	5	P2a1 (70 %); P2c2 (20 %)	2	2	1	1
2	1	2	E2cx2 (70 %)	3	1	1	1
	2	3	E2cx2 (70 %)	3	1	1	1
	3	4	E2cx2 (70 %)	3	1	1	1
3	1	1	E2ay3 (35 %); E2ay2 (35 %); P2b (15 %)	3	1	1	1
	2	2	P1c (20 %); E2ax2 (20 %); P2b (20 %)	2	2	1	1
	3	5	E2ay3 (35 %); E2ay2 (35 %); P2b (15 %)	3	1	1	1
	4	6	P2b (40 %); E2ay3 (15 %); E2ay2 (10 %)	3	2	1	1
	5	10	Lcz2; Lcy1	1	1	1	2
4	1	1	E2ay2 (50 %); E2ay3 (30 %)	3	1	1	1
	2	2	E2ay2 (40 %); E2ay1 (30 %)	3	1	1	1
	3	3	E2ay2 (40 %); E2ay1 (30 %)	3	1	1	1
	4	4	E2ay2 (40%); E2ay1 (30 %)	3	1	1	1
5	1	1	E2ay3 (60 %); E2ay2 (20 %)	3	1	1	1
	2	2	Oa11 (30 %); E2ay2 (20 %); Oa10 (20 %)	3	2	1	1
	3	5	E2ay3 (60 %); E2ay2 (20 %)	3	1	1	1
	4	6	Oa3 (20 %); Oa12 (30 %); Od9 (15 %); Oa2 (15 %)	2	2	1	1
	5	7	Oa12 (80 %)	2	2	1	1
6	1	1	Oe2 (80 %)	1	1	1	1
	2	5	Oe2 (80 %)	1	1	1	1
	3	6	Oa3 (40 %); E2ay3 (15 %); Od7 (15 %)	2	2	1	1
	4	7	Oe1 (35 %); Oe2 (35 %)	2	2	1	1
	5	10	Lcy1; Lcz1; Lcz2	1	1	1	2

Zne	Frm	GFr	Sols principaux (Nomenclat. USAID, 1986)	e	h	l	a
7	1	1	E2cx1 (30 %); E1a5 (20 %); E1a6 (20 %); Eldx1 (20 %)	3	1	1	1
	2	2	E2cx1 (20 %); E1a4 (30 %); E2ay1 (20 %)	3	1	1	1
	3	3	E2cx1 (20 %); E1a4 (30 %); E2ay1 (20 %)	3	1	1	1
	4	4	E2cx1 (20 %); E1a4 (30 %); E2ay1 (20 %)	3	1	1	1
8	1	1	E1a2 (30 %); E2b (10 %); Of1 (30 %)	3	1	1	1
	2	2	Ady3 (40 %); Ady1 (20 %)	1	1	1	1
	3	4	Ady3 (40 %); Ady1 (20 %)	1	1	1	1
	4	5	E1a2 (30 %); E2b (10 %); Of1 (30%)	3	1	1	1
	5	6	S4a1 (30 %); S4b1 (30 %); 55a (10 %)	1	2	1	1
9	1	1	E1a3 (20 %); E2cx1 (20 %);	3	1	1	1
	2	2	E2ay2 (20 %); E2ay1 (20 %); Oa11 (20 %); Oa7 (15 %)	3	2	1	1
	3	3	E2ay2 (20 %); E2ay1 (20 %); Oa11 (20 %); Oa7 (15 %)	3	2	1	1
	4	4	E2ay2 (20 %); E2ay1 (20 %); Oa11 (20 %); Oa7 (15 %)	3	2	1	1
	5	6	Oa10 (100 %)	1	2	1	1
10	1	1	Oa13 (15 %); Oa10 (15 %); Od4 (20 %); Oa1 (20 %)	2	2	1	1
	2	2	Oa1 (30 %); Od4 (30 %); Oa10 (10 %)	2	2	1	1
	3	4	Oa1 (30 %); Od4 (30 %); Oa10 (10 %)	2	2	1	1
	4	5	Oa13 (15 %); Oa10 (15 %); Od4 (20 %); Oa1 (20 %)	2	2	1	1
	5	6	Oa5 (25 %); Oa2 (25 %); Oa13 (25 %)	1	2	1	1
11	1	2	Oa13 (40 %); Oa12 (30 %); Oa10 (20 %)	2	2	1	1
	2	5	Oa10 (30 %); Oa12 (25 %); Oa4 (10 %); Oa3 (15 %)	2	2	1	1
	3	6	Oa4 (30 %); Oa12 (20 %); Oa3 (15 %); Oa10 (15 %)	1	2	1	1
	4	7	Oa4 (50 %); Oa12 (15 %); Oa6 (10 %); Od4 (10 %)	1	2	1	1
12	1	5	S3c (20 %); S3a4 (15 %); Oa2; M1e; Aa4	1	2	1	1
	2	6	Oa1-6 (40 %); Od1-4 (20 %); S3 (15 %); M1-2 (15 %)	1	2	1	1
	3	7	Oa3 (20%); Oa1(10%); Oa2 (10%); Oa4 (10%); Od2 (10%)	1	1	2	1
13		5	S3a2,4 (30 %); M3a2 (20 %); Gc2 (15 %)	1	3	1	1
		6	M3a1-2 (30 %); Ga,Gb,Gc (20 %); M3b (15 %)	1	3	1	1
		7	S3a1-5 (40 %); M3a1-2 (20 %); Oa1-4 (20 %)	1	3	1	1
		9	Aa3 (40 %); Adx (30 %)	1	1	1	1

Zne	Frm	GFr	Sols principaux (Nomenclat. USAID, 1986)	e	h	l	a
14	1	6	Oa15 (80 %)	1	1	2	1
	2	7	Oa15 (90 %)	1	1	2	1
	3	8	Oa15 (90 %)	1	1	2	1
	4	9	Oa15 (60 %); Aa1 (40 %)	1	1	2	1
	5	10	Lcz1 (60 %); Lcz2 (20 %); Lcy1 (15 %)	1	1	1	2
15	1	6	Oa14 (40 %); Oa15 (40 %)	1	2	2	1
	2	7	Oa15 (70 %); Oa14 (20 %)	1	3	2	1
	3	8	Oa15 (70 %); Oa14 (20 %)	1	3	2	1
	4	9	Aa3 (50 %); Aa1 (30 %)	1	1	1	1
	5	10	Adz (70 %); Lcz2 (20 %)	1	1	1	2
16	1	5	Oa14 (90 %)	1	3	1	1
	2	6	Oa14 (50 %); S3a,S3b (20 %); Ob2-3	1	3	1	1
	3	7	Oa14 (40 %); Oa 15 (40 %)	1	3	2	1
	4	9	Aa1 (60 %); Adx (20 %)	1	1	1	1

Légende des formations

(extrait de la nomenclature USAID, 1986)

FORMATIONS SUR TERRAINS QUATERNAIRES OU A VOLCANISME RECENT

1. Formations littorales et deltaïques

Vasières

Lcy1 *Vasières récentes, fonctionnelles*; sols peu évolués d'apport hydromorphes, avec sols halomorphes

Lcz1 *Vasières anciennes, fonctionnelles*; sols hydromorphes organiques plus ou moins tourbeux, avec sols halomorphes

Lcz2 *Vasières anciennes, partiellement dénudées*; sols halomorphes salins acidifiés et sols hydromorphes organiques

Complexe côtier

Le Sols halomorphes sur matériaux plutôt argileux; sols hydromorphes sur matériau argileux; sols peu évolués d'apport sur sables exondés

2. Formations sur dépôts alluviaux et colluviaux

Terrasses colluvio-alluviales, vallons fonctionnels

Aa1 Sols peu évolués d'apport et sols hydromorphes, sur matériau colluvial

Aa3 Sols hydromorphes, sur matériau alluvial

Aa4 Sols ferrugineux tropicaux lessivés, à concrétions et à taches

Vallées (semi) permanentes complexe alluvial indifférencié

Adx Complexe alluvial indifférencié sols peu évolués d'apport, sols hydromorphes

Ady1 Formations du fleuve : faisceaux de levées sub-actuelles; sols peu évolués d'apport hydromorphes, sols hydromorphes et vertiques

Ady3 Cuvettes de décantation; sols vertiques, avec sols hydromorphes

Adz Contact alluvial-fluvio marin; sols hydromorphes à gley salé

3. Formations éoliennes

Surfaces pénéplanées et sables de couverture

E1a2 Sols brun rouge subarides dégradés et sols ferrugineux tropicaux peu lessivés, sur sable limoneux

E1a3 Sols ferrugineux tropicaux peu lessivés et sols brun rouge subarides

E1a4 Sols ferrugineux tropicaux peu lessivés et sols bruns intergrades

E1a5 Sols brun rouge subarides peu évolués dégradés

E1a6 Sols ferrugineux tropicaux peu lessivés et sols intergrades, sur matériau gravillonnaire

E1dx1 *Basses terres; Bas glacis sableux gravillonnaire; sols peu évolués d'apport hydromorphes*

Dunes de l'intérieur

E2ax2 Modelé ondulé, dépressions; sols ferrugineux tropicaux non ou peu lessivés moins bien drainés

E2ay1 Modelé atténué, peu différencié; sols ferrugineux tropicaux non ou peu lessivés plus ou moins bien drainés

E2ay2 Modelé atténué, avec alignements de mares; sols ferrugineux tropicaux non ou peu lessivés

E2ay3 Modelé atténué, avec mares non alignées; sols ferrugineux tropicaux non ou peu lessivés

E2b *Dunes de la région du fleuve; Sables vifs; sols peu évolués ferrugineux tropicaux sur matériau sableux éolien*

Dunes de la côte

E2cx1 Très fortement marquées; sols brun rouge subarides intergrades ferrugineux

E2cx2 Très fortement marquées; sols ferrugineux tropicaux faiblement lessivés

FORMATIONS SUR TERRAINS SECONDAIRES ET TERTIAIRES

5. Formations sur grès plus ou moins argileux du "Continental Terminal" (Oligo - Mio - Pliocène)

Plateaux et buttes résiduels

- Oa1 Lithosols sur cuirasse
- Oa2 Lithosols sur cuirasse, régosols ou sols peu évolués d'apport hydromorphes, sur matériaux gravillonnaire
- Oa3 Lithosols sur cuirasse, régosols ou sols peu évolués d'apport hydromorphes, sur matériau gravillonnaire, sols ferrugineux tropicaux peu profonds, tronqués
- Oa4 Sols peu évolués d'apport hydromorphes ou régosols, sur matériau gravillonnaire; sols ferrugineux tropicaux lessivés sur matériau de colmatage, lithosols sur cuirasse
- Oa5 Lithosols sur cuirasse, sols peu évolués d'apport hydromorphes sur matériau gravillonnaire
- Oa6 Sols peu évolués d'apport hydromorphes, sur matériau gravillonnaire
- Oa7 Régosols sur matériau gravillonnaire; sols brun rouge subarides tronqués; lithosols sur cuirasse
- Oa10 Sols ferrugineux tropicaux faiblement lessivés, bien drainés
- Oa11 Sols ferrugineux tropicaux faiblement lessivés, moins bien drainés
- Oa12 Sols ferrugineux tropicaux lessivés
- Oa13 Sols ferrugineux tropicaux faiblement lessivés sur cuirasse
- Oa14 Sols ferrugineux tropicaux divers, peu ou non lessivés, lessivés, hydromorphes et lithosols sur cuirasse ou régosols sur matériau gravillonnaire
- Oa15 Sols faiblement ferralitiques; sols ferrugineux tropicaux lessivés; sols peu évolués

Dépressions de plateaux

- Ob2 Sols hydromorphes
- Ob3 Sols vertiques

Versants, pentes et glacis d'épandage

- Od1 Lithosols sur cuirasse et régosols sur matériau gravillonnaire
- Od2 Lithosols sur cuirasse et sols peu évolués d'apport hydromorphes sur matériau gravillonnaire, sols ferrugineux tropicaux lessivés sur matériau colluvio-alluvial
- Od3 Lithosols sur cuirasse, régosols ou sols peu évolués d'apport hydromorphe, sur matériau gravillonnaire, sols ferrugineux tropicaux lessivés sur matériau colluvio-alluvial

- Od4 Lithosols sur cuirasse, régosols sur matériau gravillonnaire, sols ferrugineux tropicaux lessivés sur matériau colluvio-alluvial
- Od7 Sols rubifiés polyphasés ou sols ferrugineux tropicaux, tronqués, remaniés
- Od9 Sols ferrugineux tropicaux lessivés sur matériau colluvio-alluvial remanié

Basses plaines et cuvettes

- Oe1 Sols ferrugineux tropicaux lessivés plus ou moins remaniés sur matériau dunaire, tronqués, indurés, sols peu évolués
- Oe2 Sols ferrugineux tropicaux lessivés parfois hydromorphes
- Of1 *Bordure de plateau, pente de raccordement*; Régosols sur matériau gravillonnaire, sols ferrugineux tropicaux, sols bruns [s : phase d'ensablement actuel; ss : phase d'ensablement intense]

6. Formations sur roches marno-calcaires (Paléocène, Eocène)

Bas plateaux, élévation inférieure à 50 m (Région de Bargny)

- P2a1 *Plateau*; Sols hydromorphes, vertiques, sur matériau argileux, marno-calcaire, plus ou moins tirsifiés
- P2b *Dépression ensablée*; Sols calcimorphes ou sols bruns hydromorphes, sur matériau à lit gravillonnaire

Bords de plateau et pentes

- P2c1 Rendzines d'érosion sur roches marno-calcaires
- P2c2 Sols hydromorphes sur colluvions calcaires

FORMATIONS SUR ROCHES PRIMAIRES OU ROCHES VOLCANO-SEDIMENTAIRES ANCIENNES

8. Formations sur roches d'origine essentiellement sédimentaire

Roches plissées

- S3 Glacis étagé et plaines sur grès argileux et pélites
- S3a Interfluves, glacis étagés
- S3a2 Lithosols sur cuirasse et régosols sur matériau gravillonnaire [c : phase cuirassée; g : phase gravillonnaire]
- S3a4 Lithosols sur cuirasse et sols peu évolués d'apport hydromorphes sur matériau gravillonnaire [c : phase cuirassée; g : phase gravillonnaire]
- S3b *Vallons, basses pentes*
- S3c *Basses plaines*; sols halomorphes à alcalis non lessivés ou sols hydromorphes

Basses plaines et vallées sur pélites, faciès paléovolcanique

- S4a1 *Basses plaines*; régosols sur matériau gravillonnaire, sols ferrugineux tropicaux peu profonds, sols bruns eutrophes tropicaux hydromorphes et intergrades

S4d1 Vallées; sols bruns eutrophes tropicaux hydromorphes, sols peu évolués d'apport hydromorphes

Basses plaines et vallées sur schistes métamorphisés

S5a *Plaines*; régosols plus ou moins hydromorphes sur matériau gravillonnaire; sols ferrugineux tropicaux peu profonds sur matériaux divers; sols bruns subarides

9. Formations sur roches essentiellement métamorphiques (Birrimien)

M1 *Roches basiques diverses et matériau argileux gonflant d'altération*

M1e *Plaines*; sols vertiques sur matériau argileux gonflant et sols halomorphes à alcalis non lessivés

M2 *Roches acides, migmatitiques*

Matériau résiduel gravillonnaire, cuirasse

Glacis étagé

M3a1 Sols peu évolués d'apport hydromorphes ou régosols sur matériau gravillonnaire; lithosols sur cuirasse

M3a2 Lithosols sur cuirasse et régosols sur matériau gravillonnaire (c : phase cuirassée; g : phase gravillonnaire)

M3b *Basses plaines ondulées*; régosols sur matériau graveleux de recouvrement et sols peu évolués d'apport hydromorphes

10. Formations sur roches de type granitique (granites d'anatexie)

Ga *Buttes et interfluves*

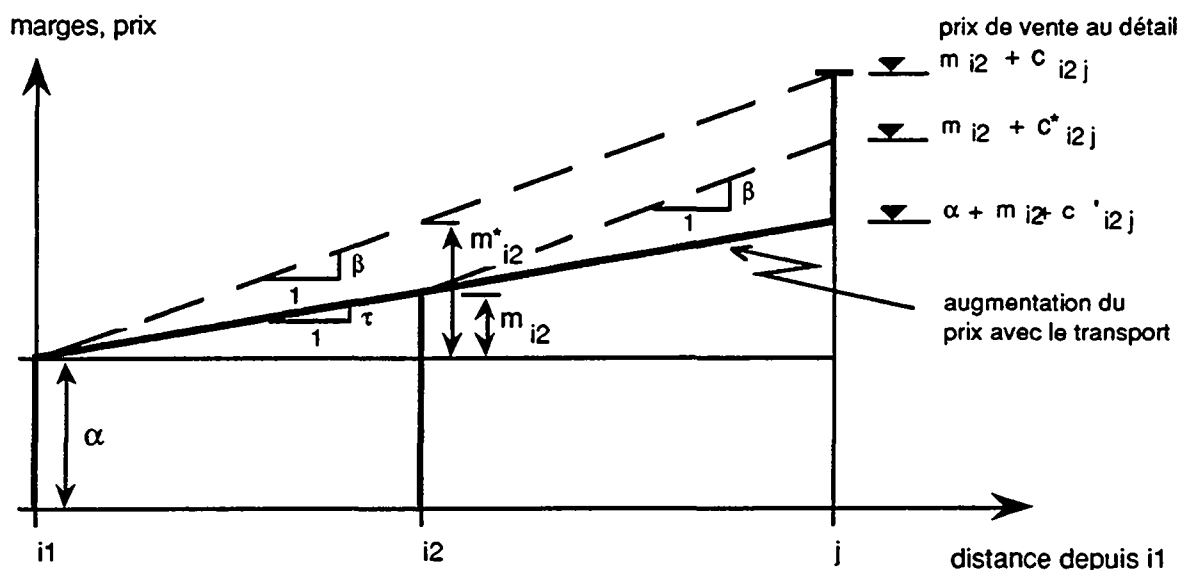
Gb *Plaine collinaire*; lithosols sur cuirasse et sols peu évolués d'apport hydromorphes sur arène granitique graveleuse

Gc *Vallons et bas de pentes*

Gc2 Lithosols sur cuirasse et sols peu évolués d'apport hydromorphes sur granites

ANNEXE 4.1

Justification de l'utilisation des coûts modifiés c^*_{ij} à la place des coûts c_{ij} dans les conditions d'équilibre des prix et des flux.



Soient une localité de production i_2 et une localité de consommation j . Soit en outre i_1 la localité de production la plus éloignée approvisionnant j . Supposons que le coût effectif du transport $c'_{i_2 j}$ est inférieur à l'augmentation de prix $c^*_{i_2 j}$ donnée par la relation prix - éloignement, donc que les marges des revendeurs augmentent avec l'éloignement des ressources. La figure ci-dessus explique pourquoi la formule $c^*_{i_2 j} = \alpha + \beta \cdot d_{i_2 j}$ sous-estime $c_{i_2 j}$. L'écart est dû au fait que l'économie sur les coûts du transport réels, réalisée par les producteurs de i_2 par rapport à ceux de i_1 , est plus faible que β fois la différence de distance:

$$\begin{aligned} c_{i_2 j} - c^*_{i_2 j} &= m^*_{i_2} - m_{i_2} \\ &= (\beta - \tau) \cdot (d_{i_1 j} - d_{i_2 j}) \\ &= \beta (d_{i_1 j} - d_{i_2 j}) - (c'_{i_1 j} - c'_{i_2 j}) \end{aligned}$$

où $c'_{i_1 j}$ et $c'_{i_2 j}$ sont les coûts effectifs du transport.

D'où:

$$m_{i_2} = m^*_{i_2} - \beta (d_{i_1 j} - d_{i_2 j}) + (c'_{i_1 j} - c'_{i_2 j})$$

Montrons maintenant pourquoi l'équilibre spatial des prix reste inchangé lorsque c_{ij} est remplacé par c^*_{ij} dans les conditions d'équilibre spatial des prix et des flux.

Supposons qu'il y ait équilibre spatial des prix et des flux, c'est-à-dire que les quantités q_{ij} sont telles que

$$f = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{2n} c_{ij} \cdot q_{ij}$$

est minimum sous les contraintes qui lui sont associées. Soit:

$$f^* = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{2n} c^*_{ij} \cdot q_{ij}$$

Montrons que f^* est aussi minimum sous les mêmes contraintes, ce qui voudra dire que la solution du problème modifié (avec les coûts c^*) est la même que celle du problème initial.

Supposons qu'il existe un nombre m_1 de localités de production dans lesquelles les ressources disponibles sont épuisées, et supposons, sans perdre de généralité, que ce sont les m_1 premières. f^* peut alors subir une décomposition en deux parties, f_1^* et f_2^* , avec:

$$f_1^* = \sum_{i=1}^{m_1} \sum_{j=1}^{2n} c^*_{ij} \cdot q_{ij}$$

$$f_2^* = \sum_{i=m_1+1}^m \sum_{j=1}^{2n} c^*_{ij} \cdot q_{ij}$$

Lorsque les ressources sont épuisées en i , il existe un écart entre c^*_{ij} et c_{ij} pour toutes les localités j approvisionnées à partir de i (voir la figure ci-dessus). Posons $e_i = c^*_{ij} - c_{ij}$.

Alors:

$$\begin{aligned} f_1^* &= \sum_{i=1}^{m_1} \sum_{j=1}^{2n} (c_{ij} + e_i) \cdot q_{ij} \\ &= \sum_{i=1}^{m_1} \sum_{j=1}^{2n} c_{ij} \cdot q_{ij} + \sum_{i=1}^{m_1} \sum_{j=1}^{2n} e_i \cdot q_{ij} \\ &= \sum_{i=1}^{m_1} \sum_{j=1}^{2n} c_{ij} \cdot q_{ij} + \sum_{i=1}^{m_1} e_i \cdot \sum_{j=1}^{2n} q_{ij} \end{aligned}$$

Les ressources étant épuisées pour i allant de 1 à m_1 , on peut écrire:

$$f_1^* = \sum_{i=1}^{m_1} \sum_{j=1}^{2n} c_{ij} \cdot q_{ij} + \sum_{i=1}^{m_1} e_i \cdot R_i$$

lorsque les ressources ne sont pas épuisées en i , $c^*_{ij} = c_{ij}$, d'où:

$$f_2^* = \sum_{i=m_1+1}^m \sum_{j=1}^{2n} c_{ij} \cdot q_{ij}$$

En additionnant les deux dernières équations écrites, on obtient:

$$\begin{aligned} f_1^* &= \sum_{i=1}^{m_1} \sum_{j=1}^{2n} c_{ij} \cdot q_{ij} + \sum_{i=m_1+1}^m \sum_{j=1}^{2n} c_{ij} \cdot q_{ij} + \sum_{i=1}^{m_1} e_i \cdot R_i \\ &= f + \sum_{i=1}^{m_1} e_i \cdot R_i \end{aligned}$$

Le terme $\sum_{i=1}^{m_1} e_i \cdot R_i$ ne dépend pas des variables du problème modifié que sont les flux q_{ij} .

L'optimum de f^* est donc celui de f , ce qui était à démontrer. Ce résultat n'est pas surprenant: il affirme simplement que, dans un problème du transport, lorsque l'on abaisse les coûts à partir des origines où les quantités disponibles sont épuisées, les flux ne varient pas.

ANNEXE 4.2

Distances moyennes entre localités de production et localités de consommation (combustibles ligneux)

Distances moyennes des localités de production aux grandes villes:

de	vers grandes villes de zone															
zone	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1	20	100	160	180	300	260	260	500	350	500	410	580	600	440	400	600
2	100	50	140	80	280	240	150	400	250	400	390	560	580	420	380	580
3	160	140	70	100	160	100	220	400	170	320	280	450	470	280	240	470
4	180	80	100	50	260	200	100	380	150	300	420	590	610	380	340	610
5	300	280	160	260	70	90	360	450	350	350	160	330	350	270	230	330
6	260	240	100	200	90	80	360	500	400	400	240	410	430	180	140	430
7	260	150	220	100	360	360	80	300	230	400	500	640	660	540	500	660
8	500	400	400	380	450	500	300	150	220	100	400	300	500	680	640	500
9	350	250	170	150	350	400	230	220	80	100	290	490	500	580	540	500
10	500	400	320	300	350	400	400	100	100	80	290	300	350	580	540	350
11	410	390	280	420	160	240	500	400	290	290	50	170	210	380	270	150
12	580	560	450	590	330	410	640	300	490	300	170	80	320	580	470	250
13	600	580	470	610	350	430	660	500	500	350	210	320	50	640	530	430
14	440	420	280	380	270	180	540	680	580	580	380	580	640	40	110	220
15	400	380	240	340	230	140	500	640	540	540	270	470	530	110	40	100
16	600	580	470	610	330	430	660	500	500	350	150	250	430	220	100	40

Distances moyennes des grandes villes aux petites villes, par zone:
20 1 50 40 1 1 50 50 1 1 40 1 1 30 1 50

ANNEXE 5.1

Méthode suivie pour l'évaluation du coefficient de régression linéaire de l'énergie utile avec simulations d'enquêtes (paragraphe 5.2.3)

La méthode suivante a été suivie, en effectuant 20 simulations¹ (portant sur 688 ménages chacune) pour chaque ensemble de valeurs des paramètres :

- 1) Génération des valeurs des variables explicatives TMen et R pour 688 ménages. Les valeurs ont été choisies proches de celles relevées² pour 688 ménages réels lors des enquêtes MASENS.
- 2) Simulation du relevé des variables explicatives par enquêtes. Génération de TMen* et de R* :
TMen* = TMen
R* = R + $\epsilon_{N(0,\sigma_1)}$
 $\epsilon_{N(0,\sigma_1)}$: loi normale centrée de variance σ_1 . σ_1 a été choisie pour toutes les simulations de telle sorte que le coefficient de détermination de R* = R + $\epsilon_{N(0,\sigma_1)}$ soit égal à 70 %, cela afin de simuler l'écart entre le revenu et la facture d'électricité, qui fait office de R*.
- 3) Calcul de l'énergie utile "réellement" consommée d'après la loi
EnUtMen = a + b · TMen + C · R + ϵ . Le coefficient de détermination, r^2 , est un paramètre qui donne la variance de ϵ , supposée normale.
- 4) Simulation du choix des équipements. Les parts des équipements ont été choisies proches de celles de l'échantillon réel dont les valeurs ont déjà été utilisées au point 1. Génération des consommations "réelles" d'énergie distribuée.
- 5) Simulation de l'évaluation par la ménagère de ses propres consommations. Les consommations "réelles" sont multipliées par (1 + e'), e' étant uniformément distribuée entre -e et e. e est un paramètre ("l'erreur d'appréciation").
- 6) Simulation de l'arrondi. Les consommations sont arrondies aux valeurs rondes les plus proches³.
- 7) Calcul des valeurs "observées" de l'énergie utile.
- 8) Calcul du coefficient de régression linéaire "observé".

¹ La variance du coefficient de détermination obtenu a été utilisée pour contrôler que ce nombre soit suffisant

² Estimées à partir de la facture d'électricité dans le cas du revenu

³ Des simulations avec et sans arrondi ont montré que l'arrondi n'a pas de grande influence sur la valeur finale du coefficient de régression

ANNEXE 5.2

Prévisions ex-post de la consommation d'énergie utile des ménages utilisant un foyer Nopalé

La problématique à laquelle se réfère cette annexe est exposée au paragraphe 5.2.4. Les chiffres utilisés sont ceux des tableaux 5.8 et 5.9.

Sachant que la consommation d'énergie utile a été multipliée par un certain facteur entre 1987 et 1989 (formalisation du phénomène qui est à l'origine de la baisse générale des consommations), quelle prévision ex-post peut-on faire de la consommation d'énergie utile des ménages "à Nopalé" en admettant successivement les hypothèses I et II ?

La moyenne pondérée des rapports entre les consommations d'énergie utile des différentes catégories sera utilisée comme facteur de transformation des données de 1987 en données 1989:

$$0,5 \cdot (0,203 + 0,141) \cdot (7149/8503) + 0,5 \cdot (0,171 + 0,330) \cdot (6590/9294) + \dots = 0,787$$

Dans le cas de l'hypothèse I

On s'attend à une consommation inchangée des ménages de la catégorie "à Nopalé", au facteur de transformation près :

$$0,787 \cdot 9294 = 7315$$

Dans le cas de l'hypothèse II

On suppose que les ménages constituant la nouvelle catégorie "à Nopalé" (celle de 1989), ont conservé leur ancienne consommation d'énergie utile, au facteur de transformation près.

Supposons, pour lever l'indétermination dans le tableau des changements de catégorie, que les pertes de la première catégorie de consommateurs ("avec bouteilles de 12 kg") se sont distribuées sur les deux autres catégories à gaz au pro-rata des gains (+ 0,159 et + 0,051 respectivement) de ces deux catégories. Le tableau des changements de catégorie se présente alors comme suit :

		à "12 kg"	"6 kg"	"3 kg"	" - "
de "12 kg"		0,141	0,047	0,015	0,000
"6 kg"		0,000	0,171	0,000	0,000
"3 kg"		0,000	0,000	0,292	0,000
" - "		0,000	0,112	0,036	0,186

Les chiffres représentent des parts relatives. Ceux de la colonne "à 6 kg", qui indiquent comment les ménages de la catégorie "à Nopalé" se répartissent en 1989 dans leurs catégories d'origine, permettent d'estimer la nouvelle consommation d'énergie utile de cette catégorie :

$$(0,047 \cdot 8503 + 0,171 \cdot 9294 + 0,112 \cdot 6492) \cdot 0,787 / (0,047 + 0,171 + 0,112) = 6477$$

ANNEXE 5.3

Estimation des paramètres d'un modèle logistique linéaire

Notations :

n : numéro d'une observation

N^n : nombre d'observations

k : numéro d'une variante

N^k : nombre de variantes

$\vec{\theta}$: vecteur des paramètres à estimer

\vec{x}_{kn} : vecteur des attributs de la technologie k pour le décideur n

w_{kn} : part observée des besoins satisfaits à partir de la variante k , observation n

Estimation des paramètres par la méthode du maximum de vraisemblance

La méthode du maximum de vraisemblance est utilisée parce qu'elle est relativement facile d'emploi et présente un certain nombre de propriétés désirables :

Soit y_{kn} une variable qui indique si l'alternative k a été choisie par le décideur n ou non, dans le cas d'un choix au tout-ou-rien

$y_{kn} = 1$ si l'alternative k a été choisie

$y_{kn} = 0$ si une autre alternative que k a été choisie

La vraisemblance d'un vecteur de coefficient $\vec{\theta}$ est donné par :

$$L^* = \prod_{n=1}^{N^n} \prod_{k=1}^{N^k} P_n(k)^{y_{kn}}$$

L'estimateur du maximum de vraisemblance est le vecteur $\vec{\theta}$ qui maximise L^* , ou encore le logarithme de L^* , L , qui vaut :

$$L = \sum_{n=1}^{N^n} \sum_{k=1}^{N^k} y_{kn} (\vec{\theta} \cdot \vec{x}_{kn} - \ln \sum_{l=1}^{N^k} e^{\vec{\theta} \cdot \vec{x}_{ln}})$$

Lorsque chaque décideur ne choisit pas une seule alternative mais satisfait une part w_{kn} de ses besoins à partir de l'alternative k , de telle sorte que $\sum_{k=1}^{N^k} w_{kn} = 1$, alors y_{kn} doit être remplacé par w_{kn} dans l'équation ci-dessus⁴, d'où :

$$L = \sum_{n=1}^{N^n} \sum_{k=1}^{N^k} w_{kn} (\vec{\theta} \cdot \vec{x}_{kn} - \ln \sum_{l=1}^{N^k} e^{\vec{\theta} \cdot \vec{x}_{ln}})$$

McFADDEN (1974) a montré que L était concave sous certaines hypothèses généralement remplies lors de l'estimation des coefficients d'un modèle logistique linéaire. Le maximum de L peut donc être trouvé par résolution du système de N^r équations :

$$\frac{\partial L}{\partial \theta_r} = 0 \quad \text{pour } r = 1, \dots, N^r$$

L'estimateur du maximum de vraisemblance est consistant, asymptotiquement efficace et sa distribution asymptotique est normale. Sa variance asymptotique est donc donnée par la borne de Cramer-Rao.

$$\text{Var}(\hat{\theta}) = [-E(\nabla^2 L)]^{-1}$$

$\text{Var}(\hat{\theta})$ désigne la matrice de variance-covariance asymptotique;

$\nabla^2 L$ est le hessien de L ;

$E(\nabla^2 L)$ est la valeur espérée du hessien de L .

La vraie valeur de $E(\nabla^2 L)$ étant inconnue, elle sera approchée par la valeur de $\nabla^2 L$ à la valeur estimée de $\vec{\theta}$.

Les dérivées secondes de L sont données par :

⁴ Il y a en fait ici passage des choix discrets à des choix continus. Pour rester dans le cadre conceptuel de la théorie des choix discrets, nous pouvons cependant admettre que W_{kn} est le résultat de m choix au tout-ou rien faits par le décideur n pour m usages "unitaires". Une telle hypothèse permet de démontrer immédiatement pourquoi y_{kn} doit être remplacé par W_{kn} .

$$\frac{\partial L}{\partial \theta_r \partial \theta_r} = - \sum_n \sum_k (x_{knr} - \vec{x}_{kn}) \cdot P_n(k) \cdot (x_{kns} - \vec{x}_{sn})$$

avec $\vec{x}_m = \sum_{l=1}^{N^k} x_{lnr} \cdot P_n(l)$

et $P_n(k) = \frac{e^{V_n(k)}}{\sum_{l=1}^{N^k} e^{V_n(l)}}$

et $V_n(k) = \vec{\theta} \cdot \vec{x}_{sn}$

ANNEXE 5.4

Principales données utilisées pour l'estimation des paramètres des modèles de la dynamique des parts

Ventes nationales de gaz, population de Dakar et prix des combustibles:

Année	Ventes (t)			Populat. Dakar	Prix (F/kg)			Indice des prix
	Blip	Nopale	Trad		Pop	Trad	Char	
1974	178	0	2575	724787	60	109		154.3
1975	498	0	2914	767777	60	109		201.6
1976	981	0	2981	813317	60	109		203.8
1977	1863	0	3152	846327	60	109		226.8
1978	3090	0	3468	880678	56	96		234.6
1979	5162	0	3959	916422	56	96		257.3
1980	5934	0	3946	953617	56	118		279.7
1981	5967	0	3907	992322	85	132	24.5	296.3
1982	7024	0	3995	1032598	91	171	31.2	347.8
1983	7990	402	3982	1074508	91	171	37.5	388.2
1984	7982	1314	3925	1118120	98	190	50	433.9
1985	7858	2930	3847	1163502	111	230	57.4	490.6
1986	7659	3283	3450	1210725	193	252	59	520.6
1987	8910	4013	3510	1259865	157	234	59	499.0
1988	13163	7145	3500	1311000	121	216	70	490.0
1989	13818	10380	3470	1364210	121	216	70	492.2
1990	15218	12589	3751	1419580	121	216	67	493.8

Ventes de gaz: chiffres communiqués à la Direction de l'Energie par les sociétés distributrices.

Population de Dakar d'après les chiffres des recensements de 1976 et 1987.

Prix des combustibles d'après JAMBES et LAURIBE, 1983; THIAM, 1984; SARR et SOW, 1987; Le Soleil du 2.6.87 et pesées CERER 1984 d'après MADON et MATLY, 1987; pesées du charbon effectuées par ENDA; DIEME, KONE et LAURA, 1991.

Indice des prix à la consommation de type traditionnel à Dakar: base 100 en 1967, publié par la Direction de la Statistique.

Effectifs relatifs et moyenne de Depenses par standing:

Standing	1	2	3	4
Effectif	0.354	0.236	0.262	0.148
Dep87Moy	13114	36083	74035	143842

Taille moyenne des ménages: 10.6;

Energie utile par ménage par standing:

EnUtMenCl [1] := 5188;
EnUtMenCl [2] := 6181;
EnUtMenCl [3] := 6838;
EnUtMenCl [4] := 7498;

Part des ventes de gaz consommées à Dakar:
(D'après les ventes des distributeurs et les enquêtes MASENS)

PartBlipDkr = 0.525;
PartNopDkr = 0.883;
PartTradDkr = 0.909;

Rendements des équipements:

RChar = 0.20;
RPop = 0.35;
RTrad = 0.40;

Prix des équipements, incidences sur le prix de revient de l'én.:

PrixEquipGPop = 0.00042;
PrixEquipTrad = 0.00169;

Prix des équipements, montant de l'investissement initial:

InvestGPop = 10000;
InvestTrad = 80000;

Parts observées du gaz pop. et du gaz trad. par standing, 1987, 1989:
(d'après enquêtes Banque Mondiale et MASENS)

POGPop87 [1] := 0.130;	POTrad87 [1] := 0.027;
POGPop87 [2] := 0.174;	POTrad87 [2] := 0.047;
POGPop87 [3] := 0.164;	POTrad87 [3] := 0.115;
POGPop87 [4] := 0.265;	POTrad87 [4] := 0.164;
POGPop89 [1] := 0.283;	POTrad89 [1] := 0.037;
POGPop89 [2] := 0.303;	POTrad89 [2] := 0.021;
POGPop89 [3] := 0.370;	POTrad89 [3] := 0.093;
POGPop89 [4] := 0.321;	POTrad89 [4] := 0.200;

Parts initiales (1974) du gaz traditionnel par standing:

PartAct [1, t, GI] := 0.03;
PartAct [2, t, GI] := 0.05;
PartAct [3, t, GI] := 0.15;
PartAct [4, t, GI] := 0.26;

ANNEXE 5.5

Interprétation de la "Perte"

Les interprétations des constituants de la "Perte" (§ 5.3.4) données ci-dessous permettent de comprendre pourquoi $Perte = \tilde{V}Max - VMaxAnc$ peut être interprété comme un manque à gagner d'utilité.

VMaxFic : Si les $V_{t-1 k'}$ étaient les utilités des variantes l'année t-1, les consommateurs auraient une espérance de l'utilité maximale (celle qui correspond aux choix qu'ils ont fait) égale à VMaxFic.

En effet, si $U_k' = V_k' + \varepsilon_k'$ avec $\varepsilon_k' \approx \text{Gumbel}(\eta, \mu=1)$

$$\begin{aligned} \text{alors} \quad VMax &= E(\text{Max}_{k'}(U_k)) \\ &= E(\text{Max}_{k'}(V_k' + \varepsilon_k')) \\ &= \ln \sum_{k'} e^{V_k' + \gamma} \end{aligned}$$

γ est une constante qui s'annule avec celle apparaissant lors du calcul de $\tilde{V}Max$.

VMaxAnc : Si on considère \tilde{V}_k' comme étant la vraie utilité de la technologie k' , alors les consommateurs ayant choisi k' , dont la part est $p_{t-1 k'}$, voient l'utilité moyenne qu'ils réalisent corrigée du terme $\tilde{V}_k' - V_{t-1 k'}$.

D'où, en moyenne :

$$VMaxAnc = VMaxFic + \sum_{k'} p_{t-1 k'} (\tilde{V}_k' - V_{t-1 k'})$$

est l'utilité moyenne réalisée l'année t-1 ($VMaxAnc \leq VMaxFic!$).

$\tilde{V}Max$: C'est l'espérance de l'utilité maximale lorsque les consommateurs choisissent les technologies en leur attribuant les "vraies" utilités \tilde{V}_k' dans un modèle logistique (cf. VMaxFic).

CURRICULUM VITAE

NEUMANN Ali Robert Roland

Ingénieur civil (Ecole polytechnique fédérale de Lausanne)

né le 4 novembre 1964 à Sanaa (Yemen)

nationalité: allemande

adresse permanente: Karpathenweg, D-16866 BÄRENSPRUNG, Allemagne

Langues: français, allemand, anglais, espagnol, portugais.

Ecoles secondaires :

1975-1976	Ouagadougou (Haute-Volta) *
1976-1978	Herkenrath (Allemagne)
1978-1979	Cotonou (Bénin) *
1979-1982	Niamey (Niger)*
	*: Etablissements français d'enseignement
Juin 1982	Baccalauréat français, série C, mention bien, Niamey (Niger).

Etudes universitaires :

1983-1988	Ecole polytechnique fédérale de Lausanne (EPFL), Suisse. Section génie civil; orientation planification et grands travaux.
Janvier 1988	Diplôme d'ingénieur civil, EPFL.

Recherche et postformation :

Depuis février 1988	Assistant au Laboratoire de systèmes énergétiques (LASEN), EPFL. Analyse et modélisation de systèmes énergétiques du Sénégal avec approfondissement dans le domaine des combustibles ligneux (Préparation de la thèse de doctorat). Plusieurs missions au Sénégal (préparations d'enquêtes, recherches documentaires, contacts avec des experts sénégalais). <i>Publication:</i> "Analyse du problème du bois combustible et modélisation de la dynamique des ressources ligneuses au Sénégal", Colloque international de l'Association d'économétrie appliquée, Janv. 1992.
Avril 1988	Cours de 3ème cycle sur les méthodes multicritères, Fribourg, Suisse.
Juin 1990	Cours de 3ème cycle sur les pays en voie de développement (NADEL), Ecole polytechnique fédérale de Zürich: "Aspekte der Forstwirtschaft in Entwicklungsländern".
Janv. - juin 1991	Cours postgrade en statistique appliquée, EPFL.

Autres activités :

1982-1983	Voyages à titre privé en Afrique Centrale et de l'Est.
Oct.1985 - juin 86	Assistant-étudiant, statique, Professeur F. Frey, EPFL.
Juil. - août 1986	Stage à l'Office Nigérien de l'Energie Solaire (ONERSOL), Niamey.

