

C. BERGER

A. HAURIE

G. SAVARD

R. LOULOU

G. LAFRANCE

J. P. SURPRENANT

**MÉDEQ-MARKAL : un couplage entre deux
modèles techno-économiques du système
énergétique du Québec**

RAIRO. Recherche opérationnelle, tome 21, n° 1 (1987), p. 21-50

http://www.numdam.org/item?id=RO_1987__21_1_21_0

© AFCET, 1987, tous droits réservés.

L'accès aux archives de la revue « RAIRO. Recherche opérationnelle » implique l'accord avec les conditions générales d'utilisation (<http://www.numdam.org/conditions>). Toute utilisation commerciale ou impression systématique est constitutive d'une infraction pénale. Toute copie ou impression de ce fichier doit contenir la présente mention de copyright.

NUMDAM

Article numérisé dans le cadre du programme
Numérisation de documents anciens mathématiques
<http://www.numdam.org/>

**MEDEQ-MARKAL:
UN COUPLAGE ENTRE DEUX MODÈLES
TECHNO-ÉCONOMIQUES
DU SYSTÈME ÉNERGÉTIQUE DU QUÉBEC (*)**

par C. BERGER, A. HAURIE, G. SAVARD ⁽²⁾,
R. LOULOU ⁽³⁾,
G. LAFRANCE et J. P. SURPRENANT ⁽⁴⁾

Résumé. – Cet article présente la méthodologie de recherche d'un couplage entre deux modèles techno-économiques. La notion d'équilibre partiel réglementé est présentée ainsi que son adaptation au cas du couplage entre le modèle d'offre MARKAL-Production et du modèle de demande MEDEQ. L'algorithme de recherche de cet équilibre est également présenté ainsi que les premiers résultats du couplage MEDEQ-MARKAL.

Mots clés : Modélisation énergétique; Programmation linéaire; Simulation de la demande; Calcul d'équilibre offre-demande.

Abstract. – This paper proposes a methodology for the coupling of two energy models. The first model optimizes the energy supply in Québec. The second model performs a simulation of the long range evolution of energy demand in Québec. The paper presents an algorithm for the computation of a supply-demand equilibrium. The first numerical experiments are also presented.

1. INTRODUCTION

L'énergie est un bien intermédiaire utilisé pour la production de biens et services en même temps que d'autres facteurs tels que la main d'œuvre,

(*) Reçu juin 1985.

Recherche subventionnée par le fonds FCAC (Action spontanée #83-AS-0026, Équipe #0428), le CRSH-Canada (#410-81-0722 et #410-83-1012), et la Direction de la recherche de l'École des H.E.C. de Montréal.

⁽²⁾ GERAD, École des H.E.C., 5255, avenue Decelles, Montréal, Québec H3T 1V6.

⁽³⁾ GERAD et Faculty of Management, McGill University, 1001, ouest rue Sherbrooke, Montréal, Québec H3A 1G5.

⁽⁴⁾ INRS-Energie, 1650, Montée Sainte-Julie, Varenne, Québec JOL 2P0.

l'équipement, etc. L'imbrication du secteur énergétique dans l'ensemble du panorama économique d'une région va tendre à introduire des interactions complexes entre la demande finale de biens et services dans l'économie considérée, les substitutions entre facteurs de production, les substitutions entre formes d'énergie et donc, en fin de compte, la demande d'énergie finale par forme. Plus précisément, la variation du prix d'une forme d'énergie finale, par exemple le gaz naturel, l'essence ou l'électricité, va déclencher une série d'ajustements directs et indirects impliquant les choix technologiques et les choix de consommation des agents concernés, qui se répercuteront finalement sur la demande des différentes formes d'énergie finale.

Ce système dynamique et complexe peut être représenté à l'aide de différents types de modèles.

Un modèle économétrique comme ceux développés par Cao [5] pour le Québec, Marchon et VanPeeterssen [16] pour le Canada, retient sous une forme agrégée une description de la relation globale qui existe entre les prix des formes d'énergie finale et leurs demandes respectives. Cette description est statistique plutôt que structurelle. Elle aboutit à l'estimation d'élasticité de la demande aux prix et d'élasticités de substitution entre facteurs (énergie contre capital), réalisées à partir de l'observation des comportements passés des agrégats économiques. Un tel modèle est donc une schématisation à grands traits et une vue rétrospective du système.

Une autre catégorie de modèles, appelés modèles techno-économiques, tente de prendre en compte explicitement le processus de choix des principaux agents économiques, producteurs ou consommateurs d'énergie. Des « fonctions de choix » intégrant des facteurs tant quantitatifs que qualitatifs, décrivent le comportement des agents, à un niveau très désagrégé. Une comptabilité énergétique est alors réalisée pour établir la correspondance entre l'énergie utile, qui exprime les besoins, et l'énergie finale qui sert à satisfaire ces besoins. Un tel modèle est donc une description très détaillée d'hypothèses de comportement et constitue une vue prospective du système.

L'approche MEDEE ([6 et 12], développée par l'IEJE (Institut Économique et Juridique de l'Énergie, Grenoble, France) est une modélisation techno-économique de l'évolution de la demande d'énergie finale, par forme, pour une région donnée. Les fonctions de choix y sont définies à un niveau très désagrégé (chaque type de consommateur).

L'approche MARKAL [8 et 21] développée sous les auspices de l'AIE (Agence Internationale de l'Énergie) est une modélisation techno-économique du système de production et de transformation de l'énergie, depuis les sources primaires jusqu'aux utilisations finales. Une seule « fonction de choix » est

utilisée dans cette modélisation, elle consiste en une recherche de l'organisation optimale de l'ensemble du système en fonction d'un critère de performance global, tel que, par exemple, le coût total actualisé sur la période de planification.

Ces deux types de modélisation ont été adaptés à la situation énergétique du Québec pour déboucher sur deux modèles, *a priori* indépendants dans leur conception et leurs finalités, appelés respectivement MEDEQ [17] et MARKAL-QUÉBEC [3].

La figure 1.1 schématise le champ de modélisation couvert par MARKAL-QUÉBEC et MEDEQ. On a indiqué, au bas de cette figure les parties de cet ensemble de modules incluses dans chacun des modèles. On peut ainsi voir la zone de recouvrement entre les deux modèles ainsi que la complémentarité des deux approches.

A partir de cette constatation il paraît attrayant de chercher à mettre en relation une description de la demande d'énergie telle que fournie par MEDEQ et une description de l'offre d'énergie telle que fournie par MARKAL-QUÉBEC, afin d'obtenir une plus grande cohérence du scénario énergétique bâti à l'aide de ces modèles.

Dans un couplage entre ces deux modèles on doit nécessairement réduire l'étendue de l'un ou de l'autre. Par exemple, nous pourrions envisager un couplage MARKAL-MEDEQ où MARKAL-QUÉBEC serait conservé dans son intégralité, cependant que la scénarisation hiérarchisée de MEDEQ servirait uniquement à construire un scénario d'évolution de la demande d'énergie utile par secteur. La figure 1.2 schématise cette possibilité de couplage. Une difficulté méthodologique pourrait apparaître dans cette approche, puisque les concepteurs de MEDEE insistent sur le fait que la demande d'énergie utile n'est pas indépendante des choix technologiques effectués. (Remarquons que cette réserve est de même nature que celle qui concerne le fait que la demande utile elle-même n'est pas indépendante des prix de l'énergie. On pourrait toujours envisager de procéder à une série d'ajustements successifs de type «Cobweb» pour corriger ces effets). Cependant, l'avantage de la démarche est de ne nécessiter qu'une seule scénarisation MEDEE, et de fournir une analyse marginale, au sens de la programmation linéaire, pour chaque technologie d'usage ce qui permet d'en évaluer l'importance relative. Un tel couplage s'avérerait instructif dans une démarche prospective orientée surtout vers l'analyse de la recherche et du développement (*R* et *D*) dans le domaine énergétique.

Un couplage MEDEQ-MARKAL, par contre, donne le rôle de modèle maître à MEDEQ qui envoie vers une version réduite de MARKAL, appelée

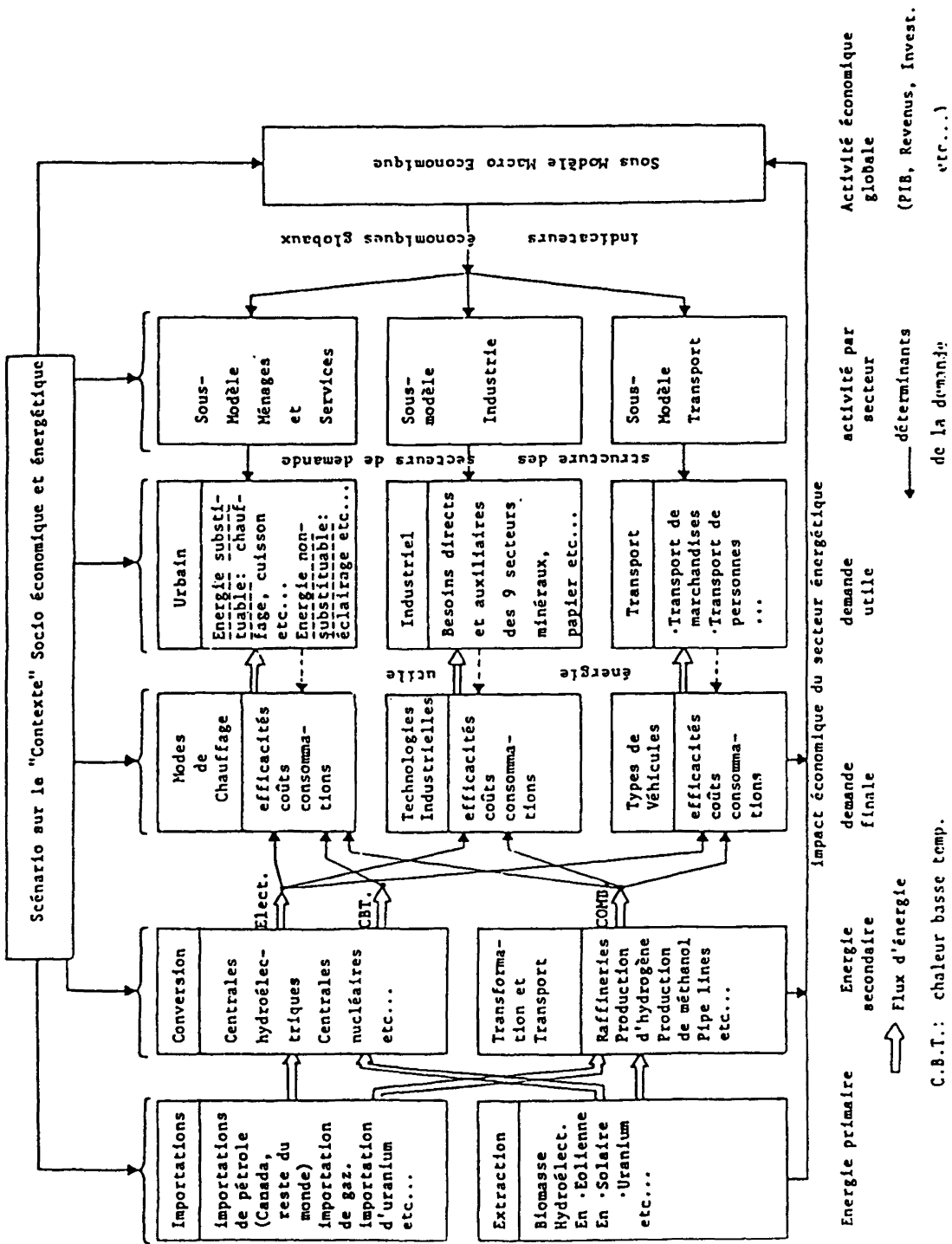


Figure 1.1

C.B.T.: chaleur basse temp.

MARKAL-Production, une information en termes de demande d'énergie finale et qui reçoit de ce modèle d'offre une information sur les disponibilités et les coûts marginaux (prix implicites) de chaque forme d'énergie. Ce couplage est schématisé sur la figure 1.3. Fondamentalement, cette démarche consiste à calculer un équilibre partiel réglementé entre l'offre et la demande d'énergie finale. L'équilibre est réglementé, du fait de l'existence de taxes et subventions qui font que la tarification de l'énergie finale ne s'effectue pas à son coût marginal.

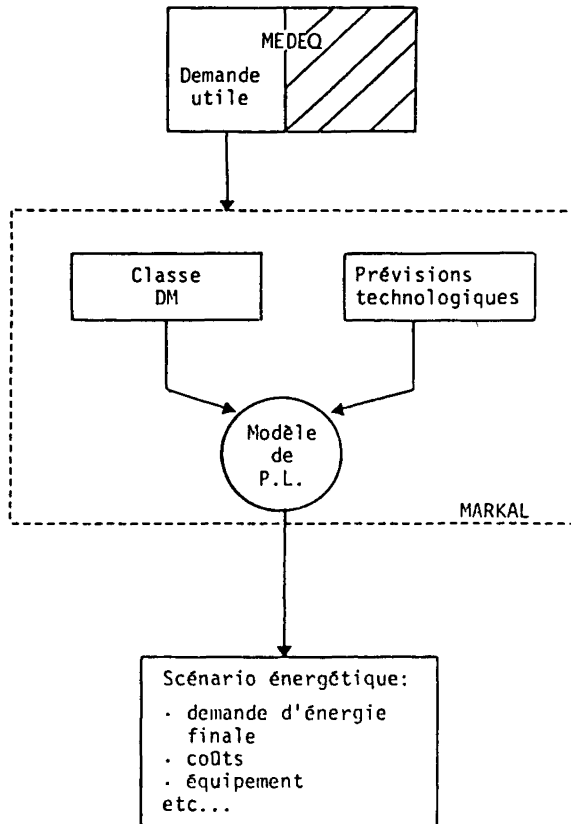


Figure 1.2. — Couplage MARKAL-MEDEC.

Donc, dans ce second type de couplage, un modèle de production représente l'ensemble des technologies disponibles pour fournir les formes d'énergie finale demandées. Ce modèle de production incluant l'ensemble des activités d'investissement et de production, permet de calculer le coût moyen et le

coût marginal à long terme de chacune des formes d'énergie finale. A partir de ces informations, on peut établir une tarification des différentes formes d'énergie finale, en tenant compte des différents coûts, de la taxation, des subventions, etc.

Cette tarification est prise en compte dans MEDEQ qui adopte le scénario de demande d'énergie finale. MEDEQ est alors un système complexe d'où émerge une information sur les fonctions de demande des différentes formes d'énergie finale. Un équilibre est atteint lorsque le scénario de demande définit des quantités demandées qui, une fois satisfaites optimalement par le modèle d'offre, engendrent un système de prix compatible avec le scénario de demande.

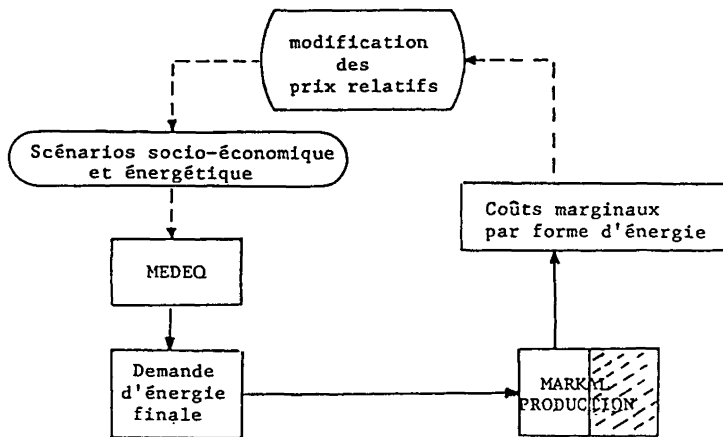


Figure 1.3. – Couplage MEDEQ-MARKAL.

Cet article présente les résultats d'une recherche d'un tel équilibre pour un scénario énergétique adapté à la situation du Québec. La section 2 donne une rapide description de MARKAL-Production. La section 3 discute de la notion d'équilibre partiel réglementé entre un modèle d'offre et un modèle de demande. La section 4 décrit un algorithme de recherche d'un tel équilibre. La section 5 présente les premiers résultats numériques relatifs à un couplage entre MEDEQ et MARKAL-Production.

2. LE MODÈLE D'OFFRE MARKAL-PRODUCTION

Le modèle MARKAL-QUÉBEC, dans sa version complète, couvre un horizon de neuf périodes de cinq ans et regroupe un nombre considérable de

technologies de production et d'utilisation de l'énergie. La base de données techno-économiques donnait lieu à la génération d'un programme linéaire impliquant 3 200 contraintes environ. Récemment une description beaucoup plus fine et fidèle du secteur du raffinage a porté le nombre total de contraintes du programme linéaire aux environs de 5 000. Comme on l'indique en [15], une version réduite de ce modèle global, appelée MARKAL-Production, a été construite en éliminant du premier modèle tous les choix énergétiques au niveau de la satisfaction de la demande utile.

Plus précisément, au lieu d'avoir plusieurs technologies possibles pour satisfaire la demande, on n'en considère qu'une seule, fictive, d'efficacité 100 %. La demande utile, fournie au modèle réduit, coïncide alors avec la demande d'énergie finale qui est, de fait, une donnée exogène.

La figure 2.1 schématise la structure de MARKAL-Production. Cette figure doit être rapprochée de la figure 2.2 pour bien saisir la différence qui existe entre MARKAL-QUÉBEC et MARKAL-Production.

Du fait que MARKAL-Production est une version réduite de MARKAL-QUÉBEC, on trouvera dans [3] la liste des principales activités retenues. La Ref [15] permettra aussi au lecteur intéressé d'avoir plus de détails sur ce modèle d'offre.

Soulignons les différences entre les variables duales associées aux contraintes de bilan énergétique dans chacun des modèles MARKAL-QUÉBEC et MARKAL-Production. Dans le modèle global, MARKAL-QUÉBEC (*voir* [3]), on a, pour chaque période et chaque forme d'énergie, les contraintes suivantes :

$$\text{Importation} + \text{Production} \geq \text{Exportation} + \text{Consommation} \quad (2.1)$$

ou, plus simplement :

$$\text{Production nette} \geq \text{Consommation nette.} \quad (2.2)$$

Dans un contexte de minimisation du coût total actualisé, la variable duale associée à la contrainte (2.2) représente le coût marginal correspondant à une augmentation de la disponibilité d'une forme d'énergie. Cette augmentation peut être obtenue soit en augmentant la production, soit en diminuant la consommation. La variable duale obtenue constitue donc une borne inférieure pour le coût marginal de production.

Dans MARKAL-Production, par contre, la consommation est fournie de façon exogène. La variable duale associée représente exactement le coût marginal de production, qui sera transmis, après quelques modifications, au

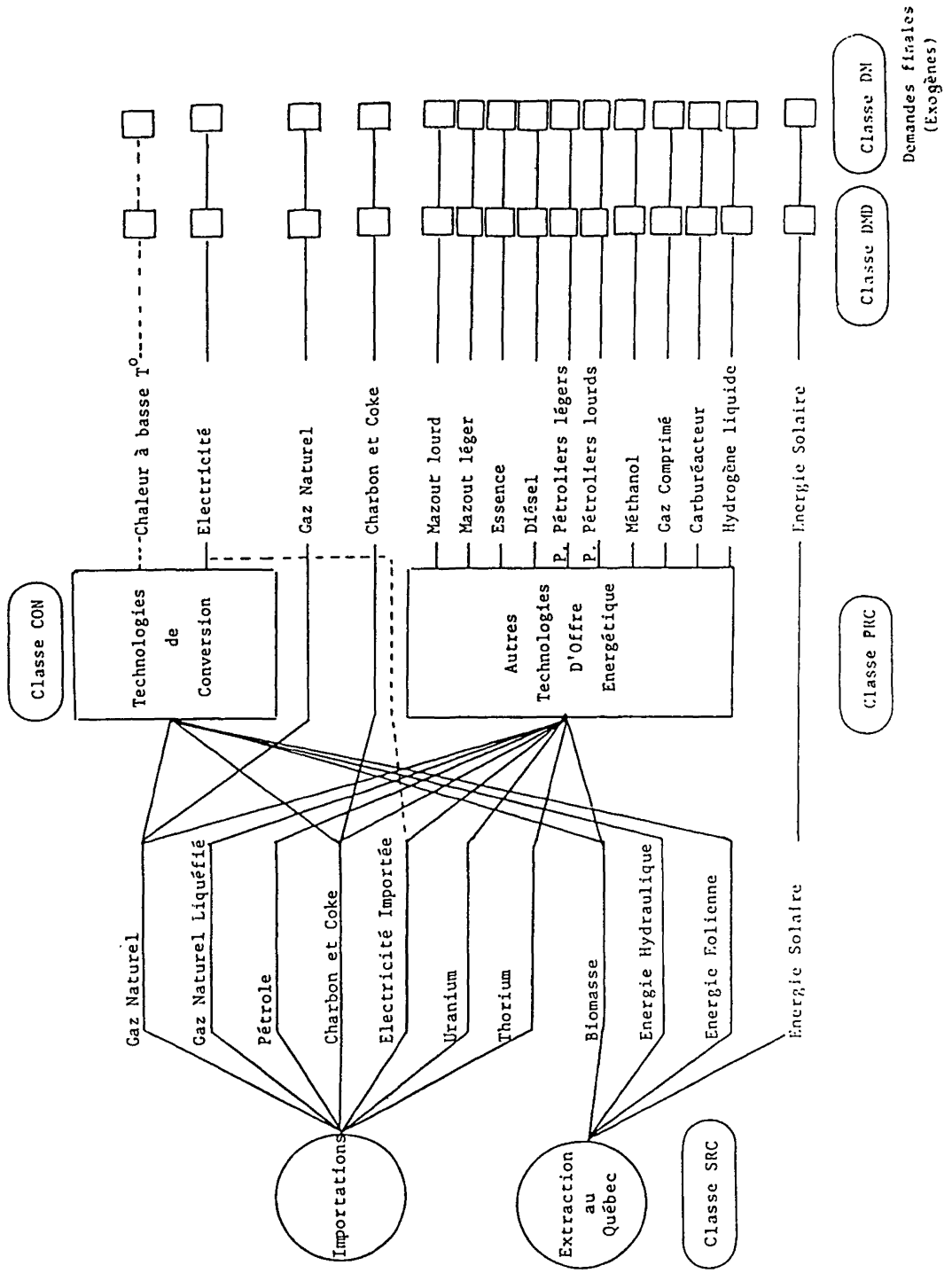


Figure 2.1. - Structure de MARKAL-Production.

modèle de demande MEDEQ. Ces coûts marginaux sont des coûts marginaux à long terme, puisqu'ils tiennent compte de programmes d'investissement à long terme (25 ans).

3. ÉQUILIBRE PARTIEL ENTRE LE MODÈLE D'OFFRE ET LE MODÈLE DE DEMANDE

Selon MEDEQ, la demande d'énergie finale provient de l'intégration d'un ensemble de facteurs techniques (efficacité, convenance, etc.), sociologiques (habitudes, attitudes, etc.) et économiques (disponibilités, prix, etc.), par une population d'usagers qui doit satisfaire un certain nombre de besoins énergétiques (production de biens, chauffage, transport, etc.). Si l'on fixe l'ensemble des facteurs à l'exception des prix des différentes formes d'énergie, MEDEQ fournit, de façon implicite, une loi réciproque de demande

$$P = g(D) \quad (3.1)$$

où D est le vecteur des quantités demandées d'énergie finale par forme et P est le vecteur des prix aux consommateurs de ces différentes formes d'énergie.

Selon MARKAL l'offre d'énergie s'organise de façon à minimiser sur un certain horizon de planification la somme des coûts des activités d'investissement et de production. Le programme linéaire optimal, fourni par MARKAL-Production, sera la solution du problème d'optimisation

$$\text{Min } cx \quad (3.2)$$

s.c.

$$A_1 x = b \quad (3.3)$$

$$A_2 x = Q, \quad x \geq 0 \quad (3.4)$$

où x est le vecteur des niveaux d'activités, les contraintes (3.3) représentent les contraintes technologiques du système de production et les contraintes (3.4) représentent les contraintes de demande à satisfaire, c'est-à-dire de niveau de production à atteindre (noté ici Q).

La théorie de la dualité en programmation linéaire indique que les valeurs du programme dual optimal π associées aux contraintes (3.4) constituent un système de prix implicites pour les différentes formes d'énergie finale fournies, correspondant à leurs coûts marginaux de production respectifs.

Ainsi, en résolvant le problème de programmation linéaire (3.2)-(3.4) pour différentes valeurs de la production à atteindre Q , on peut construire une

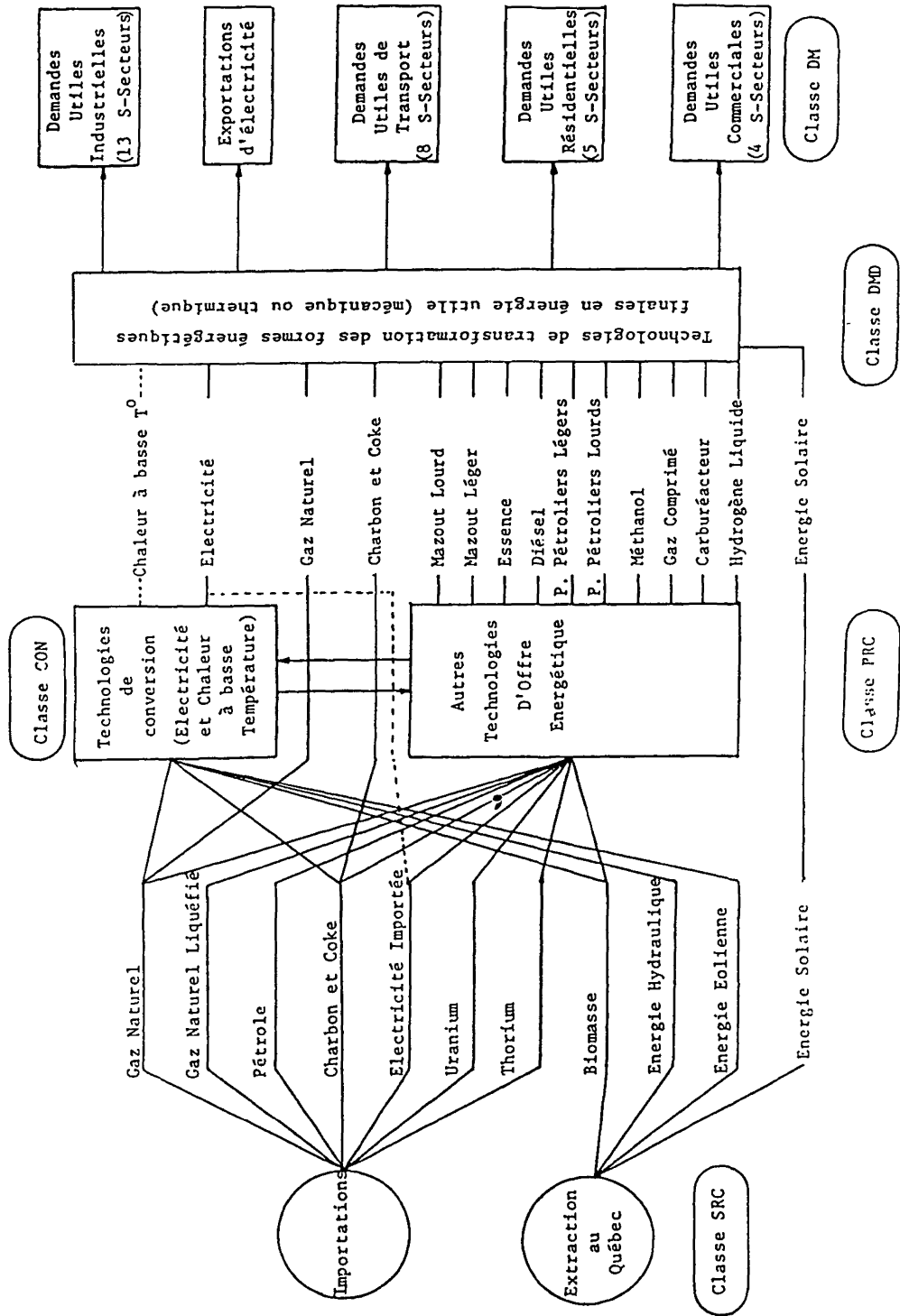


Figure 2.2. — MARKAL-QUEBEC : Le système énergétique de référence.

fonction

$$\pi = s(Q) \quad (3.5)$$

qui apparaît comme la forme réciproque d'une fonction d'offre du système de production d'énergie.

Sous les conditions de concurrence parfaite, un équilibre partiel est atteint entre les modèles MEDEQ et MARKAL-Production si la demande D prévue à partir des prix P , selon (3.1), quand elle est fournie au modèle d'offre (3.2)-(3.4) en posant

$$Q = D, \quad (3.6)$$

engendre des coûts marginaux π qui vérifient

$$\pi = P. \quad (3.7)$$

Comme le marché de l'énergie est, en fait, réglementé, le système de prix aux consommateurs est différent du système de prix aux producteurs. Comme l'indiquent Greenberg et Murphy [9], cette distorsion du marché peut être prise en compte dans un modèle d'équilibre partiel, en assimilant les taxes et subventions à des tarifs de distribution entre producteurs et consommateurs.

Pour les fins de l'exposition il est avantageux de considérer le cas d'une seule ressource (forme finale d'énergie), produite par un seul type de producteur et consommée par un seul type de consommateur. La généralisation à plusieurs ressources (formes finales d'énergie) est primordiale et sera effectuée à la section 4. La possibilité de plusieurs producteurs d'une ressource donnée est peu intéressante *a priori* dans le cas de la programmation mathématique, puisque chaque forme finale d'énergie y est homogène, et possède un prix implicite unique (il n'y a donc pas lieu de distinguer les diverses sources de production d'une forme finale d'énergie au niveau des tarifs de distribution). Cependant il pourrait s'avérer utile de distinguer plusieurs producteurs d'une même forme d'énergie finale dans le cas précis où des taxes ou subsides différenciés seraient appliqués à ces producteurs. Alors des fonctions de tarification devraient être définies pour chaque producteur, ce qui ne modifierait pas sensiblement le développement de la méthode. Quant à la possibilité d'avoir des tarifications différentes pour des consommateurs différents, elle correspondrait à la réalité dans le cas des clients industriels ou individuels, des régions éloignées, etc. Nous n'en avons pas tenu compte dans la présente étude, et avons plutôt évalué des tarifs de distribution agrégés sur tous les consommateurs d'une forme finale d'énergie.

Dans ce cadre simplifié, le producteur est caractérisé par une fonction (réciproque) d'offre

$$\pi = s(Q) \quad (3.8)$$

et le consommateur par une fonction (réciproque) de demande

$$P = g(D) \quad (3.9)$$

L'équilibre partiel du marché se traduit par les équations suivantes :

$$\pi = s(Q) \quad (3.10)$$

et la contrainte de complémentarité

$$P = \pi + t = g(Q) \quad (3.11)$$

où t représente la fonction de tarification de cette forme finale d'énergie (c'est-à-dire l'écart entre le prix au consommateur et le coût marginal de production).

Greenberg et Murphy [9] montrent en effet que les taxes ou subventions, de même que la tarification au coût moyen, peuvent se représenter comme une fonction

$$t = t(\pi, P, Q) \quad (3.12)$$

qui associe à un triplet (π, P, Q) , un vecteur $t = t(\pi, P, Q)$ de tarifs de distribution.

La méthode suggérée par ces auteurs pour trouver un équilibre réglementé consiste à fixer les tarifs t , à trouver un équilibre tel que défini en (3.10)-(3.11), à ajuster les tarifs à l'aide de (3.12) et à « boucler » ainsi, selon une approche de type « Cobweb » ou de Gauss-Seidel. Les conditions de convergence de cet algorithme sont discutées dans l'article cité.

En fait nous n'utiliserons pas la fonction de tarification de Greenberg et Murphy, mais plutôt une transformation équivalente

$$\underline{P} = T(Q, P)$$

qui associe au couple (Q, P) un prix au producteur, \underline{P} net des taxes perçues et des dividendes versés.

De cette façon on peut aussi construire une loi de demande translatée qui implique les prix au producteur

$$\underline{P} = h(Q) = T(Q, g(Q))$$

Dans le cas de l'électricité, comme la tarification est basée sur le coût moyen, on induira dans le modèle une translation du coût marginal pour le ramener au voisinage du coût moyen, grâce à l'introduction d'un sous-produit fictif de l'électricité qui est « vendu » sur un marché d'exportation. Cette technique est précisée en section 5. Dans les autres secteurs on suppose que la tarification est effectuée en majorant le coût marginal des taxes, redevances et marges de profit.

4. MÉTHODE DE RECHERCHE D'UN ÉQUILIBRE PARTIEL ENTRE LE MODÈLE D'OFFRE ET LE MODÈLE DE DEMANDE

Le calcul d'équilibre économique peut se ramener à des calculs de « points fixes » de transformations d'un espace dans lui-même à la façon de Scarf et Hansen [19], ou encore à la solution de problèmes de complémentarité.

Pour certaines classes de problèmes on peut établir une équivalence entre la recherche d'un équilibre et la solution d'un problème de programmation mathématique convexe. L'idée initiale revient à Samuelson [18], Takayama et Judge [20] ont opérationnalisé cette approche et, dans le domaine de l'énergie, Hogan [11] l'a adaptée avec succès dans le cadre du modèle PIES. Une application de l'algorithme de Hogan à un modèle énergétique dynamique pour le Canada a été réalisée par Daniel et Goldberg [7].

Nous présenterons tout d'abord les grandes lignes de la méthodologie de calcul d'un équilibre par une approche de programmation mathématique; nous indiquerons ensuite comment cet algorithme devra être implanté sur MEDEQ et MARKAL-Production.

4.1. Algorithme de Hogan pour le calcul d'un équilibre

Considérons tout d'abord le cas le plus simple d'une seule ressource et de deux fonctions,

$$P = P_o(Q), \quad Q > 0$$

$$P = P_d(Q), \quad Q > 0$$

appelées respectivement les fonctions (réciproques) d'offre et de demande. La figure 4.1 représente les graphes de ces deux fonctions et l'équilibre qui correspond au point d'intersection des graphes.

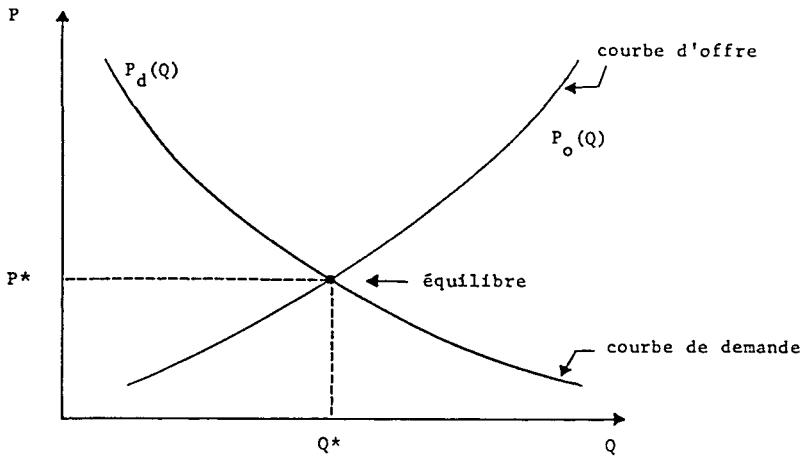


Figure 4.1. — Équilibre offre-demande.

Il suffit d'avoir les conditions naturelles suivantes

$$P'_o(Q) > 0, \quad Q > 0 \quad (4.1)$$

$$P'_d(Q) < 0, \quad Q > 0$$

pour que les fonctions

$$F(Q) = \int_0^Q P_o(q) dq, \quad Q > 0$$

et

$$G(Q) = \int_0^Q P_d(q) dq, \quad Q > 0 \quad (4.4)$$

soient respectivement convexe et concave. (Notons que, pour que l'intégrale (4.4) soit définie, il se peut qu'il faille intégrer à partir d'une borne inférieure $\delta > 0$ au lieu de 0, du fait du comportement de $P_d(Q)$ près de 0.)

On pourra aisément vérifier sur le graphique de la figure 4.1 que la quantité d'équilibre Q^* est telle que la différence

$$\{ F(Q) - G(Q) \}$$

soit minimale. Q^* est alors obtenue comme solution d'un problème d'optimisation convexe.

C'est cette propriété de base qui est étendue et exploitée dans le cas où la fonction d'offre est définie implicitement par un modèle de production et la fonction de demande est de la forme

$$P = g(D) \quad (4.5)$$

où D est le vecteur des quantités demandées de chaque ressource et P le vecteur des prix des ressources.

L'analogue de la fonction $F(Q)$, définie en (4.3), va être fourni par l'optimum de coût du problème de programmation linéaire associé au modèle de production, c'est-à-dire

$$F(Q) = \min cx \quad (4.6)$$

s.c.

$$A_1 x = b \quad (4.7)$$

$$A_2 x = Q \quad (4.8)$$

$$x \geq 0 \quad (4.9)$$

Ceci est cohérent avec l'interprétation de la fonction d'offre comme étant aussi la fonction de coût marginal. L'intégrale des coûts marginaux, jusqu'aux niveaux Q fournit alors le coût cx minimal pour satisfaire cette contrainte de production.

L'analogue de la fonction $G(Q)$, définie en (4.4) n'existera pas nécessairement, en particulier si la loi de demande (4.5) présente des élasticités croisées non symétriques.

L'idée de base de l'algorithme de Hogan consiste alors à négliger localement les effets croisés dans la demande pour chaque ressource. Plus précisément, au voisinage d'un vecteur de quantités Q^* , les fonctions réciproques

$$P_i = g_i(Q_i), \quad Q_i > 0, \quad i = 1, \dots, n \quad (4.10)$$

obtenues à partir de la loi de demande (4.5) en ne faisant varier que la quantité demandée de la ressource i peuvent être utilisées pour définir le problème de programmation convexe

$$\text{Min} \left[F(Q) - \sum_i \int_0^{Q_i} g_i(q_i) dq_i \right] \quad (4.11)$$

où $F(Q)$ est définie en (4.6)-(4.9).

La solution de (4.11) fournira une approximation de l'équilibre, appelée Q^* , à partir de laquelle de nouvelles fonctions $g_i(Q_i)$ seront définies comme en (4.10) et un nouvel équilibre approché sera obtenu en (4.11), etc.

Les conditions de convergence de l'algorithme du modèle PIES ont été données par Ahn et Hogan [1]. Le problème d'optimisation convexe (4.11) est lui-même ramené à un problème de programmation linéaire en remplaçant chaque fonction $g_i(Q_i)$ par une approximation sous la forme d'une fonction constante par morceaux, telle qu'illustrée en figure 4.2.

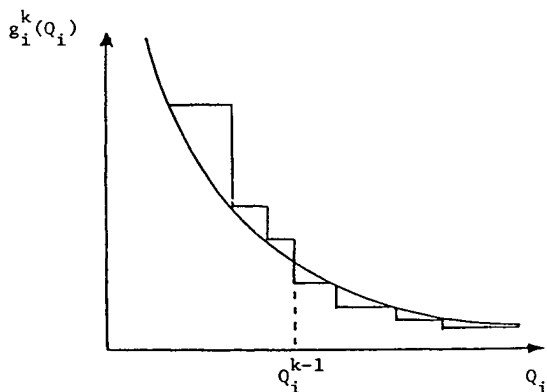


Figure 4.2. — Linéarisation locale des fonctions $g_i(Q_i)$.

4.2. Implantation d'un algorithme de calcul d'équilibre pour le couplage MEDEQ-MARKAL

Le couplage entre le modèle de demande MEDEQ et le modèle d'offre MARKAL-Production va être réalisé en implantant une version dynamique de l'algorithme présenté en section 4.1, de façon assez similaire à l'approche suivie par Daniel et Goldberg [7], et en incorporant l'effet des taxes et subsides d'une façon similaire à l'approche suggérée par Greenberg et Murphy [9].

Les étapes de cette implantation sont les suivantes, dans le cas d'un seul producteur et d'un seul type de consommateur (du point de vue de la tarification) par forme finale d'énergie :

1. A partir d'un scénario initial de prix au consommateur, P^0 , à l'aide de MEDEQ trouver les lois de demande approchées, pour chaque forme d'énergie k

$$P_k = g_k^0(D_k) \quad (4.12)$$

ainsi que la quantité demandée D_k^0 . Poser $n=0$ et $Q^0 = D_0$.

2. Si la fonction $g_k^n(D_k)$ est la loi de demande approchée fournie par MEDEQ à l'itération n , alors on utilise la fonction de tarification pour déduire la loi de demande transformée

$$\underline{P}_k = h_k^n(D_k) \quad (4.13)$$

traduite en termes de prix au producteur de la forme d'énergie k . Dans le cas de l'électricité il faudra évaluer le coût moyen de production et l'utiliser pour définir le prix au producteur. Ce coût moyen sera celui correspondant à la production de la quantité demandée D_k^n envoyée par MEDEQ à l'itération n .

3. Résoudre alors le problème de programmation linéaire suivant :

$$\text{Min } cx - \sum_k (\sum_s (\underline{P}_s^k y_s^k - \underline{P}_s^k y_{-s}^k)) \quad (4.14)$$

s.c.

$$A_1 x = b \quad (4.15)$$

$$A_2 x - \sum_s y_s + \sum_s y_{-s} = Q^n \quad (4.16)$$

$$x \geq 0, \quad \Delta \geq y_s \geq 0, \quad \Delta \geq y_{-s} \geq 0. \quad (4.17)$$

Pour chaque forme k la variable y_s^k décrit l'accroissement de production dans la s -ième tranche au-delà de Q_k , et y_{-s}^k la diminution de production dans la s -ième tranche en-deçà de Q_k (cf. fig. 4.2). Les coûts \underline{P}_s^k et \underline{P}_s^k sont obtenus en discrétisant (en tranches de largeur Δ) chaque fonction de demande translatée $h_k(D_k)$.

La solution de ce programme linéaire fournit une approximation de l'équilibre.

4. Dans le cas de l'électricité on va remettre à jour la fonction de tarification, en recalculant le coût moyen de production pour le niveau de demande obtenu comme solution du programme linéaire. On retournera en 3, et on bouclera ainsi tant que des variations sensibles sur la quantité produite d'électricité seront observées.

5. A l'aide de la fonction de tarification on déduira de la solution du programme linéaire (primale et duale) un nouveau système de prix au consommateur P^{n+1} que l'on envoie vers MEDEQ. Une nouvelle série de simulations fournit des lois de demande approchées

$$P_k = g_k^{n+1}(D_k)$$

Si les fonctions g_k^{n+1} sont peu différentes des fonctions g_k^n alors la procédure a convergé. Sinon on pose $n = n + 1$ on pose $Q^n = D^n$ et on retourne en 2.

5. PREMIÈRES EXPÉRIENCES SUR LE COUPLAGE MEDEQ-MARKAL

Dans cette section nous présentons les premiers résultats obtenus dans une expérience de couplage entre MEDEQ et MARKAL-Production. Ces résultats sont encore préliminaires et ne peuvent être considérés comme un scénario énergétique définitif pour le Québec. En effet un certain nombre de faiblesses demeurent encore dans la modélisation de la demande industrielle au niveau de MEDEQ, cependant que la modélisation des raffineries dans MARKAL-Production n'est pas encore totalement validée. Nous pensons cependant que l'image énergétique fournie par cet exercice de couplage est déjà relativement fidèle.

5.1. Évaluation des lois de demande à partir de MEDEQ-QUEBEC

5.1.1. L'influence des prix sur la demande dans MEDEQ

Dans MEDEQ, le vecteur de demande énergétique finale D est déterminé par la relation :

$$D = F(\text{PRIX}, \text{BESEC}, \text{POL}, \text{DISP}) \quad (5.1)$$

où BESEC, POL et DISP représentent, respectivement, les variables indicatrices reliées aux besoins socio-économiques, aux politiques énergétiques, et aux disponibilités des différentes formes d'énergie.

Dans le contexte du couplage, nous souhaitons obtenir, pour des vecteurs BESEC, POL et DISP fixés, la relation fonctionnelle :

$$D = g(\text{PRIX}). \quad (5.2)$$

Les prix influencent la demande finale suivant des mécanismes de substitution inter-énergétique et d'économies d'énergie. Pour des vecteurs BESEC, POL, DISP, fixés, cinq types de relations interviennent dans la détermination de la loi de demande des différentes formes d'énergie en fonction de leur prix :

1. des relations dérivées de modèles économétriques, (ce sera surtout le cas dans le secteur des transports où la demande de carburants est directement modélisée à partir de relations dérivées de modèles économétriques),

2. des fonctions de choix d'équipement dans lesquelles interviennent deux critères, l'un financier (coût d'investissement, d'entretien et d'énergie), l'autre reflétant plutôt une attitude (coût apparent, inconfort...),

3. des relations indiquant des vitesses de pénétration, généralement représentées sous la forme de courbes logistiques,

4. des relations qui traduisent des contraintes d'offre et de disponibilité de technologies ou qui imposent certaines cohérences indispensables aux scénarios,

5. des fonctions discrètes (tabulaires) qui traduisent des états décrits à l'aide de variables de scénario qualitatives.

Ces cinq types d'équation seront utilisés différemment selon qu'on traite de la substitution inter-énergétique ou des économies d'énergie, et selon les différents secteurs de consommation (résidentiel, industriel, commercial ou transport). Ainsi la substitution inter-énergétique dans les secteurs résidentiel et commercial est simulée par un modèle de choix d'équipements. Les données historiques sont prises en compte par le biais d'un modèle économétrique permettant d'établir le taux de décroissance des équipements au mazout. La vitesse de pénétration des énergies nouvelles est gérée par une courbe logistique.

Dans le secteur industriel, la substitution inter-énergétique est le résultat, d'une part, de la substitution inter-procédé et d'autre part de la substitution inter-énergétique pour un usage non captif donné. Les prix relatifs des formes d'énergie sont utilisés directement dans des courbes logistiques. Les contraintes d'offre sont déterminantes dans ce secteur.

Dans le secteur du transport, la substitution inter-énergétique se fait essentiellement entre l'essence et le diesel.

Dans tous les secteurs, les économies d'énergies sont déterminées à l'aide de fonctions discrètes où les prix des différentes formes d'énergie peuvent être considérés. Les différentes hypothèses sont calibrées par le biais de modèles économétriques simples et de fonctions de contrôle qui tiennent compte des effets de saturation.

Compte tenu du type d'équations retenu pour simuler les relations demande-prix dans chaque secteur, les élasticités résultantes ont trois caractéristiques qu'il faut souligner :

— Ces élasticités ne sont pas constantes selon les zones de prix considérés. Par exemple, dans le secteur industriel, au niveau de prix actuel de l'électricité (non subventionnée) l'élasticité de substitution de l'électricité est presque nulle puisque les prix du mazout lourd et du gaz naturel sont beaucoup plus bas. A prix égal, l'électricité devient beaucoup plus intéressante.

— Ces élasticités ne sont pas constantes dans le temps, ce qui s'explique en partie par la prise en compte de nombreuses contraintes dans MEDEQ : potentiel décroissant d'équipements au mazout pouvant être substitués, évolution non linéaire du stock d'habitation et d'édifices commerciaux, etc.

— Les effets-prix peuvent être annulés à cause de contraintes sur l'offre d'énergie (disponibilité du mazout lourd, disponibilité de gaz naturel) et sur la disponibilité des technologies (par exemple les procédés électriques dans le secteur industriel).

Dans la recherche d'un équilibre partiel offre-demande toutes les relations demande-prix ne sont pas utilisées simultanément à chaque itération. Ceci concerne principalement les élasticités-prix dans les économies d'énergie pour les secteurs industriel, résidentiel et commercial. De fait, pour ces secteurs nous ne considérons, au cours d'une itération, que les élasticités de substitution. Lorsque le modèle d'offre renvoie vers le modèle de demande les prix provenant de l'équilibre partiel, les économies d'énergie sont ajustées. Cette procédure a été choisie, d'une part, parce que selon nos estimés l'effet prix à long terme sur les économies d'énergie est plus faible que sur la substitution inter-énergétique, et, d'autre part, parce que l'estimation des élasticités-prix dans le cas des économies d'énergie est beaucoup plus grossière et ne peut être simulée à un niveau aussi fin que celui exigé par le couplage. Ces hypothèses impliquent que la demande utile est indépendante des prix à une itération donnée, sauf dans le domaine du transport où les élasticités sont le reflet d'économies d'énergie passées.

5.1.2. Ajustement local de lois de demande à élasticités constantes

L'ajustement des lois de demande locales se fait à partir de modèles à élasticité constante :

$$D_k = f_k(p_k) = A_k (p_k)^{e_k}$$

ou aussi sous forme réciproque :

$$p_k = g_k(D_k) = (D_k/A_k)^{1/e_k}$$

où e_k représente l'élasticité-prix directe de la forme d'énergie k au prix.

L'ajustement de ces lois s'effectue par une régression linéaire simple à partir de données obtenues d'une série de simulations de MEDEQ où les scénarios de prix ont été perturbés. Rappelons ici que ces élasticités-prix sont « inflatées », c'est-à-dire que les perturbations de prix ont été effectuées sur toutes les périodes à la fois.

Dans ce premier exercice de couplage nous avons ainsi ajusté trois lois de demande locales, pour les formes d'énergie suivantes : électricité, essence, carburéacteur. Pour les autres formes d'énergie (gaz naturel, mazout léger, diesel, mazout lourd) les mécanismes de formation de la demande dans MEDEQ ne permettent pas de formuler une relation directe entre le prix d'une forme énergétique et sa propre demande. Pour ces formes il n'y aura donc pas d'ajustement effectué au niveau de MARKAL-Production et le programme linéaire ne fournira pas d'approximation de la demande d'équilibre. Cependant, au niveau de MEDEQ, les élasticités croisées feront que les variations de prix relatifs se répercuteront sur les niveaux de demande des différentes formes.

La tarification des trois formes d'énergie retenues dans le couplage va se faire différemment selon qu'il s'agit de l'électricité ou des produits pétroliers. Le tableau 5.1 indique la composition des taxes et marges de profit affectant les produits pétroliers au Québec en 1984.

TABLEAU 5.1
Composition des taxes et marges de profit
des produits pétroliers (\$80)

	Essence	Carburea.	Diesel	Mazout léger
Coût de production (cents/litre)	\underline{P}_2	\underline{P}_3	\underline{P}_4	\underline{P}_5
Marketing + profit + distrib. (cents/litre)	+9,65	+4,8	+8,87	+6,2
Taxe d'accise (cents/litre)	+1,5	-	-	-
Taxe de vente fédérale	+9%	+9%	+9%	+9%
Taxe provinciale	+30% ⁽¹⁾	+8%	+30% ⁽¹⁾	-
Part du détaillant (cents/litre)	+2,8	-	+2,8	+3,5
Prix au consommateur	= P_2	= P_3	= P_4	= P_5

(¹) 40% pour la première période.

Pour l'électricité il y a une taxe de vente provinciale de 9% qui s'applique sur le coût moyen majoré de la partie « profits et dividendes ». Cette partie est évaluée à 25% du coût moyen. L'élément central de la tarification est donc le coût moyen. La technique de couplage est adaptée au cas où la tarification se fait à un coût marginal. Il est donc possible d'utiliser le même algorithme si on parvient à rendre proches le coût moyen réel et le coût marginal fourni par le modèle. Le coût moyen sera toujours inférieur au coût marginal réel; on effectuera donc une translation pour ramener ce coût marginal à un niveau égal à celui du coût moyen, en introduisant de façon artificielle une possibilité d'exportation d'un sous-produit fictif obtenu à partir de l'électricité à un coût nul et vendu à un prix qui est la différence entre le

coût marginal réel et le coût moyen. Pour évaluer cette différence on se basera sur le coût marginal réel et sur un calcul du coût moyen fourni par le passage précédent de MARKAL-Production.

Ainsi à partir du scénario de base dans MEDEQ on a pu estimer les paramètres indiqués au tableau 5.2 pour les lois de demande locales des trois formes d'énergie retenues dans le couplage. Il s'agit alors des lois translatées au niveau des prix au producteur.

TABLEAU 5.2
Paramètres des lois de demandes locales (première itération)

Période	86	91	96	01	06
Électricité					
e	-.2030	-.3008	-.3198	-.3232	-.3372
A_k	653.58	908.37	1048.17	1177.39	1324.54
Essence					
e	-.69	-.69	-.69	-.69	-.69
A_k	842.10	844.96	833.32	797.62	753.87
Carburacteur					
e	-.39	-.39	-.39	-.39	-.39
A_k	67.09	79.31	93.77	108.50	100.63

5.2. Résultats de la première expérience de couplage

On peut constater sur le tableau 5.3 que le scénario de prix des produits pétroliers, initialement retenu par les concepteurs de MEDEQ, est sensiblement transformé par le couplage avec MARKAL. En effet, vers la fin de l'horizon (2006) on voit que le prix p^0 du mazout léger est supérieur au prix p^1 renvoyé par MARKAL de 6%, le prix P^0 de l'essence est inférieur de 11% au prix P^1 .

Dans le cas de l'électricité, le prix P^1 est aussi sensiblement différent du prix P^0 initialement retenu dans MEDEQ. Cependant, du fait de la tarification au coût moyen, ce prix devra être recorrigé pour tenir compte de la modification des paramètres qui servent à définir le sous-produit fictif mentionné au paragraphe précédent. Nous reporterons cette mise à jour à la prochaine itération du couplage.

Les prix P^1 vont occasionner une modification des demandes prévues par MEDEQ. La nouvelle demande d'électricité s'établira à un niveau D^1 inférieur à celui prévu par la solution du P.L. En effet, dans MEDEQ, l'élasticité de la demande d'électricité n'est pas constante, elle devient beaucoup plus faible quand D diminue car on entre très rapidement dans une zone d'usages captifs.

La figure 5.1 schématise la séquence de points d'équilibre approximatifs D^0 , D^1 et D^2 obtenus au cours d'itérations ultérieures.

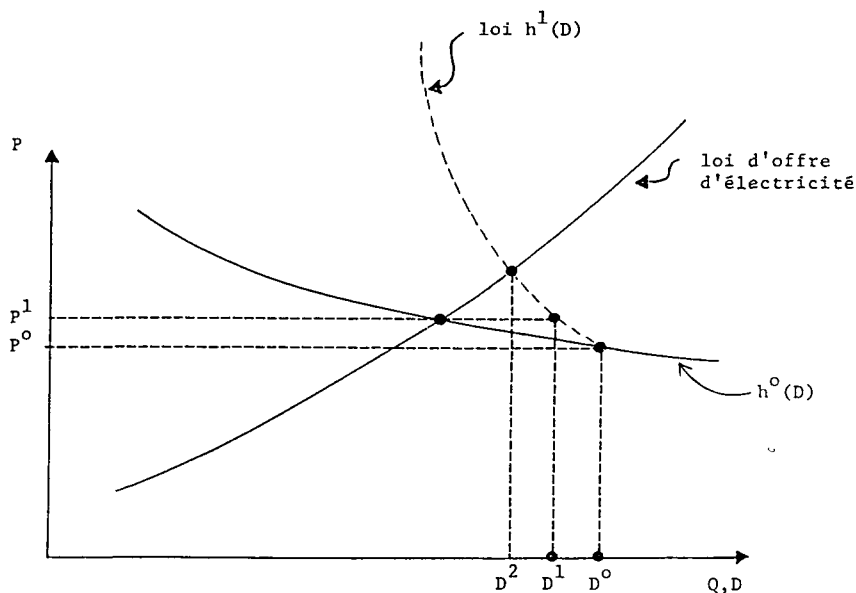


Figure 5.1. — Recherche séquentielle d'un équilibre.

En fait, la loi de demande d'électricité dans MEDEQ devenant très rapidement inélastique la demande d'équilibre D^2 sera très voisine de la demande D^1 obtenue du second exercice de simulation MEDEQ.

Dans le cas des produits pétroliers, la hausse des prix induit dans MEDEQ des ajustements à la baisse qui sont assez sensibles : 8,3 % pour l'essence et 5,4 % pour le mazout léger en 2006. Les demandes de diesel et de carburéacteur sont peu affectées. Étant donné que pour les produits pétroliers, les effets de prix sont pratiquement à élasticité constante dans MEDEQ, la prochaine itération renverra une loi de demande sensiblement similaire à la précédente.

Le cas du mazout lourd est particulier. En effet dans MEDEQ on suppose qu'il y a toujours une capacité d'approvisionnement suffisante pour satisfaire la demande industrielle et dans les transports (rappelons que, dans MEDEQ, la demande de mazout lourd est captive dans le transport maritime et dans le secteur minier cependant que les autres formes ne peuvent pratiquement pas s'y substituer dans le secteur manufacturier). Cependant MARKAL sélectionne une technologie de raffinage qui produit plus de produits légers

et moins de produits lourds. La production domestique de mazout lourd n'est ainsi que 33% de la demande. Le reste de la demande devrait donc être satisfaite par des importations. La question qui se pose au « scénariste » est alors la suivante : est ce que l'évolution technologique dans les raffineries sera partout semblable, ce qui réduira la disponibilité de mazout lourd à très bas prix ? Si cette possibilité est retenue, une modification de MEDEQ sera nécessaire pour ce qui concerne la prévision de demande de mazout lourd.

TABLEAU 5.3
Première itération de l'algorithme de couplage

Année	P^0	D^0	P^1	Q^e	P^1	P^1	D^1
1981	6,712	367,3	4,926	367,3	4,926	6,712	367,3
1986	6,307	487,9	4,629	487,9	4,629	6,307	487,9
1991	6,449	568,9	4,734	568,9	4,743	6,463	568,5
1996	6,767	627,8	4,966	627,8	5,069	6,907	626,4
2001	7,300	684,4	5,358	678,7	5,527	7,531	682,74
2006	7,695	738,8	5,648	726,3	5,996	8,170	734,5
Électricité							
Année	P^0	D^0	P^1	Q^e	P^1	P^1	D^1
1981	12,546	297,1	4,733	297,1	4,734	12,55	297,1
1986	12,837	257,4	5,572	264,5	5,415	12,62	260,4
1991	12,969	255,4	5,663	257,9	5,625	12,91	256,3
1996	13,207	246,8	5,833	235,9	6,227	13,77	237,4
2001	13,452	231,5	6,006	212,9	6,849	14,65	217,3
2006	13,701	214,5	6,182	190,0	7,343	15,35	196,8
Essence							
Année	P^0	D^0	P^0	Q^e	P^1	P^1	D^1
1981	6,383	33,5	4,234	33,5	4,233	6,382	33,5
1986	6,814	37	4,600	37	4,884	7,147	37
1991	6,987	43,2	4,748	43,2	4,951	7,226	43,2
1996	7,648	48,9	5,309	48,9	5,623	8,017	48,9
2001	8,410	54,1	5,955	54,1	6,511	9,063	54,1
2006	8,584	49,7	6,103	49,7	7,002	9,641	49,7
Carburéacteur							

TABLEAU 5.4
Paramètres des lois de demande locales (seconde itération)

Période	86	91	96	01	06
Électricité					
e	-.203	-.108	-.124	-.126	-.13
A_k	653.58	672.58	766.06	846.86	927.09

Les colonnes de ces tableaux correspondent à la séquence des calculs conduisant à une itération complète.

1. Prix initial P^0 (\$ 80/GJ).
2. Demande prévu par MEDEQ, D^0 (PJ/an).
3. Prix au producteur \underline{P}^0 .
4. Équilibre calculé par le P.L., Q^e .
5. Prix d'équilibre \underline{P}^1 .
6. Nouveau prix envoyé à MEDEQ P^1 .
7. Nouvelle demande D^1 .

Comme nous l'avons souligné plus haut seule la demande d'électricité reste encore à définir par des itérations complémentaires. Lors de la seconde itération nous avons procédé à une nouvelle estimation des paramètres de la loi de demande de l'électricité (tableau 5.4) et à l'ajustement des paramètres relatifs au sous-produit fictif permettant la translation du coût marginal vers le coût moyen. Le tableau 5.5 donne les valeurs Q^e et P^2 obtenues après cette itération et cet ajustement.

TABLEAU 5.5
Résultat seconde itération

Q^e	P^2
367,3	6,712
487,9	6,307
565,69	6,822
626,37	7,123
686,58	7,403
741,854	7,700
Électricité	

Nous pouvons constater que ces prix sont en définitive très voisins de ceux initialement retenus dans le scénario de départ de MEDEQ. Nous pouvons ainsi conclure, à partir de ces résultats de couplage, que le scénario de prix de MEDEQ doit être sensiblement modifié uniquement dans le cas des produits pétroliers.

6. CONCLUSION

Par cet exercice de couplage nous avons voulu démontrer qu'il est possible et avantageux d'établir un dialogue entre des modèles techno-économiques ayant des finalités quelque peu différentes mais complémentaires. Les simulations de l'évolution de la demande d'énergie, du type des exercices MEDEE, sont souvent très appréciés des organismes responsables de l'élaboration des

politiques énergétiques car elles permettent de représenter très finement les déterminants que ces organismes doivent prendre en compte, sur les plans politique, social ou économique. Les modèles de programmation mathématique du secteur énergétique permettent des explorations des conséquences de certaines hypothèses de prix ou de disponibilité (de ressources ou de technologies) sur la base d'un calcul économique rigoureux (*cf.* [4] pour un récent tour d'horizon de ces modèles). Comme c'est au niveau de l'évolution de la demande d'énergie que des facteurs extra-économiques sont les plus importants, alors que les systèmes de productions sont censés être gérés principalement sur la base d'une efficacité économique, le couplage entre ces deux approches appliquées respectivement à la modélisation de la demande finale et à la modélisation du système de production de ces formes d'énergie est un aboutissement naturel. Déjà en [13] on mentionne une telle tentative de couplage entre MEDEE et EFOM. Le couplage réalisé à partir des deux modèles québécois MEDEQ et MARKAL-Production est allé plus loin en implantant un algorithme de recherche de l'équilibre utilisant les progrès récents de la programmation mathématique appliquée au calcul d'équilibres économiques. Les résultats obtenus sont susceptibles de modifications dans un avenir rapproché, lorsque MEDEQ aura incorporé une description beaucoup plus fine du secteur industriel de la Province et lorsque le secteur des raffineries dans MARKAL aura été complètement validé. Ces travaux sont en cours et devraient déboucher sur une modélisation très complète du secteur énergétique du Québec pour les 25 prochaines années.

Nous remercions Patrice Marcotte pour son aide lors de l'implantation de l'algorithme de calcul d'équilibre lors d'une étape préliminaire de cette recherche.

BIBLIOGRAPHIE

1. B. Y. AHN et W. W. HOGAN, *On Convergence of the PIES Algorithm for Computing Equilibria*, Operations Research, 1982.
2. F. ALTDORFER, *Introduction of Price Elasticities on Energy Demand in MARKAL*, Memo, # 345, KFA, Jülich, 1981.
3. C. BERGER, G. COTE, A. HAURIE, R. LOULOU et M. NORMANDIN, *MARKAL-QUEBEC: Un modèle prospectif du système énergétique du Québec*, Communication présentée dans le cadre du séminaire MEDEE-MARKAL tenu le 27 octobre 1983 à Montréal.

4. J. BOUCHER et Y. SMEERS, *Programmation mathématique et modélisation énergétique*, Communication présentée dans le cadre du séminaire MEDEE-MARKAL tenu le 27 octobre 1983 à Montréal.
5. M. H. CAO, *Les potentialités de substitution interénergétique au Québec*, Ministère de l'énergie et des ressources, Gouvernement du Québec, 1981.
6. B. CHATEAU et B. LAPILLONE, *Long-Term Energy Demand Simulation*, dans *Energy Models for the European Community*, A. STRUB, éd., I.P.C. Science and Technology Press, 1979, p. 120-128.
7. T. E. DANIEL et H. M. GOLDBERG, *Dynamic Equilibrium Energy Modeling: The Canadian BALANCE Model*, *Operations Research*, vol. 29, # 5, 1981, pp. 829-852.
8. L. G. FISHBONE et H. ABILOCK, *MARKAL, A Linear-Programming Model for Energy Systems Analysis*, *Energy Research*, vol. 5, 1981, p. 353-375.
9. H. J. GREENBERG et F. H. MURPHY, *Computing Regulated Market Equilibria with Mathematical Programming*, School of Business Administration, Temple University, 1982.
10. A. HAURIE *et al.*, *MEDEE-MARKAL-QUEBEC : Couplage entre un modèle de simulation de la demande d'énergie et un modèle d'optimisation de l'offre*, GERAD, École des H.E.C., Montréal, Cahier G-83-08, 1983.
11. W. W. HOGAN, *Energy Policy Models for Project Independence*, *Computers and Operations Research*, 2, 1975, pp. 251-271.
12. B. LAPILLONE, *MEDEE 2: A Model for Long-Term Energy Demand Evaluation*, I.I.A.S.A., rapport RR-78-17, Laxenburg, Autriche, 1978.
13. B. LAPONCHE et P. VALETTE, *Le modèle énergétique des communautés européennes. Exemple d'application des modèles MEDEE et EFOM avec des données françaises*, Commissariat à l'Énergie Atomique, Rapport CEA-R-5031, 1980.
14. C. LARDINOIS, *MARKAL-QUEBEC : Implantation d'un modèle d'analyse systématique de l'avenir énergétique québécois*, GERAD, École des H.E.C., Montréal, Cahier G-81-09, 1981.
15. R. LOULOU *et al.*, *MARKAL-Production: Un modèle du secteur de production énergétique du Québec*, GERAD, École des H.E.C., Cahier G-83-10, 1983.
16. M. N. MARCHON et A. VAN PEETERSSEN, *Impact de la substituabilité entre facteurs causé par le changement de prix relatif de l'énergie*, École des H.E.C., Montréal, Rapport de recherche n° 81-22, 1981.
17. MEDEE-QUEBEC (INRS-Énergie) (1984), *L'implantation de MEDEE-3-QUEBEC : La méthodologie*, Ministère de l'Énergie et des Ressources, Québec.
18. P. A. SAMUELSON, *Foundations of Economic Analysis*, Harvard University Press, Cambridge, Massachusetts, 1966.
19. H. SCARF et T. HANSEN, *Computation of Economic Equilibria*, Yale University Press, 1973.
20. T. TAKAYAMA et G. G. JUDGE, *Spatial and Temporal Price and Allocation Models*, North-Holland, Amsterdam, 1971.
21. T. TEICHMANN, *Canadian Energy System Supply and Demand Sensitivity Studies*, 3 volumes, rapport préparé pour EMR Canada, mars 1981.
22. LAFRANCE G. *et al.*, *L'implantation de MEDEE-2*, Collection études et recherches, Ministère de l'Énergie des ressources, Québec (1982).
23. LAFRANCE G. *et al.*, *MEDEQ-V4: la méthodologie*, I.N.R.S.-ENERGIE, NrG-354, 1986.

24. I.N.R.S.-ÉNERGIE et D.G.A. *Évolution de la demande d'énergie du Québec: 5 scénarios*, Ministère de l'Énergie et des ressources, Québec, 1986.

ANNEXE

LES MODÈLES MARKAL ET MEDEQ

1. Le modèle MARKAL

MARKAL est un modèle de programmation linéaire multi-période dont la fonction est d'optimiser l'évolution des moyens de production, de transformation, et d'utilisation des diverses formes d'énergie, de façon à satisfaire un ensemble de demandes utiles exogènes. Le programme linéaire accepte plusieurs objectifs à optimiser, pouvant faire intervenir les dimensions économiques (coût total actualisé), sécuritaire (dépendance énergétique vis-à-vis des importations), technologiques (accent sur les énergies renouvelables) et enfin environnementale (rejets polluants). Il peut y avoir jusqu'à neuf périodes, habituellement de 5 années chacune, couvrant ainsi 45 ans (1978-2022).

La méthodologie MARKAL de base a été développée sous l'égide d'un consortium de 17 pays membres de l'A.I.E. (Agence internationale de l'énergie), conjointement en Allemagne Fédérale [K.F.A. (Kernforschungsanlage) de Jülich] et aux États-Unis [B.N.L. (Brookhaven National Laboratory) de Brookhaven]. Plusieurs pays ont ensuite entrepris de construire des versions nationales ou régionales adaptées du modèle général. La plupart des pays du groupe maintiennent actives des versions mises à jour de MARKAL et procèdent à des expériences et études pour différents organismes commanditaires. Des réunions internationales ont lieu à intervalle régulier pour faciliter la diffusion des innovations provenant des usagers.

De façon générale, MARKAL a été conçu comme un instrument d'exploration des avens possibles pour le système énergétique d'une région, en mettant l'accent sur la description techno-économique d'un grand nombre de technologies existantes ou nouvelles, de façon à pouvoir identifier celles qui seraient les plus « porteuses d'avenir ». Plus précisément, MARKAL est un modèle linéaire d'« analyse des activités »: pour un ensemble d'activités décrites par leurs coefficients techniques et par leurs coûts, une sélection optimale (suivant un critère bien défini) des activités est effectuée au moyen de la programmation linéaire. Les activités entrent donc en concurrence pour

satisfaire un certain nombre de besoins, et ce, au moindre « coût » pour l'ensemble du système. Cette approche de l'analyse des activités connaît depuis plusieurs années un regain de popularité auprès des organismes de recherche et de planification pour les systèmes de grandes tailles. Les raisons de cette popularité sont multiples, mais on peut en distinguer trois principales : le degré de détail pouvant être atteint par la méthode, la grande fiabilité des outils techniques sous-jacents (la programmation linéaire) même pour des systèmes de très grande dimension, et enfin la validité *a priori* de la méthode. Cette validité provient du fait que l'analyse des activités est bien souvent une description assez fidèle de la réalité, réalité parfois simplifiée bien sûr, mais toujours de façon visible et consciente.

Les objectifs de production fournis à MARKAL sont les demandes utiles exogènes par l'ensemble du système économique de la région modélisée. Compte tenu de cette évolution présumée des demandes, ainsi que de la disponibilité et du coût des ressources énergétiques et de la description du système MARKAL détermine un agencement cohérent de l'évolution du système. C'est cette cohérence qui est un des attraits de ce type de modèle : sur un horizon de 30 ans et plus, les techniques d'extrapolation de tendances ont moins d'attrait et plus de rigidité; des mutations profondes du système sont envisageables, et MARKAL permet d'en faire une exploration.

Dans sa version MARKAL-Production le modèle est réduit à la description des technologies d'offre des différentes formes finales d'énergie. Les objectifs de production proviennent des prévisions de demande finale obtenue par un modèle de simulation de l'évolution de la demande énergétique.

2. Le modèle MEDEQ

Au Québec, la conception de MEDEQ (modèle d'évaluation de la demande d'énergie du Québec) constitue la deuxième étape d'un effort entrepris conjointement par la D.G.A. (Direction générale de l'analyse économique et financière du Ministère de l'Énergie et des Ressources du Québec) et l'I.N.R.S.-Énergie. La première étape avait été franchie en 1982 lors de l'implantation de MEDEE-2 [22] avec la collaboration de l'I.E.J.E. (Institut économique et juridique de Grenoble).

Le but de l'exercice était de doter le gouvernement d'un outil d'une grande flexibilité pouvant établir des prévisions de demande d'énergie à moyen et à long terme, aider à l'élaboration de politiques énergétiques (prix, offre, subventions, etc.), évaluer les impacts de la pénétration de nouvelles technologies etc. Le modèle a été adopté par la D.G.A. comme outil de planification

et a donné lieu à plusieurs scénarios d'évaluation de la demande d'énergie du Québec [17, 24]. Le modèle est également en voie d'être utilisé pour la simulation de la demande d'énergie dans le Nord-Est américain.

MEDEQ se distingue des autres modèles d'analyse énergétique à plusieurs niveaux. La prise en compte des prix des différentes formes d'énergie, la régionalisation de la demande, la prise en compte de contraintes d'offre y sont originales. Le concept informatique est aussi particulièrement bien adapté à l'usage du modèle comme instrument de prévision à long terme par les organismes gouvernementaux (facilité de consultation de la banque de données, facilité de simulation, rapidité d'exécution).

La désagrégation très grande (par exemple 60 procédés industriels peuvent être analysés) traduit la volonté de constituer une banque de données techniques sur les usages énergétiques. Cette approche permet de tenir compte des changements technologiques et, en particulier, d'analyser l'impact des énergies nouvelles. Par ailleurs, afin de mieux cerner les mécanismes de substitution ou de choix d'énergie finale, le modèle inclut certaines contraintes du secteur de production d'énergie (disponibilité régionale, progrès technologique du système de production, politique d'importation et exportation). Le modèle tient également compte de façon explicite des prix de l'énergie par type de marché (par exemple cinq marchés sont distingués dans le secteur industriel).

Ce modèle de simulation fait intervenir des relations économiques, des égalités comptables, des fonctions décrivant les vitesses de pénétration des technologies nouvelles (courbes logistiques), des fonctions de choix optimisés (qui font intervenir des critères financiers, structurels et de comportement), des équations techniques (par exemple elles décrivent les transferts de chaleur), des relations de contrôle de cohérence, etc.

Les intrants et paramètres du modèle sont les données technologiques concernant les différents équipements de consommation, les données économiques agrégées (PIB, prix, coûts, revenus), les données démographiques, les données sur les modes de vie, les contraintes d'offre, etc.