

## PROJET DE RECHERCHE : EPEE

ENJEUX ENVIRONNEMENTAUX ET PLANIFICATION ÉNERGETIQUE EUROPÉENNE **EPEE** :

### RAPPORT FINAL

RAPPORT POUR L'INSTITUT FRANÇAIS DE L'ÉNERGIE / CONSEIL FRANÇAIS DE L'ÉNERGIE, AOÛT 2005.

Dans ce rapport final du projet EPEE du CMA (Centre de Mathématiques Appliquées de l'École des Mines de Paris) sont consignés les documents suivants :

**Partie 1 : Synthèse finale du projet EPEE et de l'expertise acquise au CMA**

**Partie 2 : Thèse d'Edi Assoumou soutenue le 22 Juin 2006 à l'École des Mines de Paris :  
MODELISATION MARKAL POUR LA PLANIFICATION ÉNERGETIQUE LONG TERME DANS LE  
CONTEXTE FRANÇAIS**

## **Partie I : Synthèse finale sur le projet EPEE**

**N. Maizi, E. Assoumou, M. Bordier, G. Guerassimoff**

**Centre de Mathématiques Appliquées, Ecole des Mines de Paris, Novembre 2006**

L'approche que le Centre de Mathématiques Appliquées de l'Ecole des Mines de Paris a développée dans le cadre du projet EPEE est de type bottom-up. Elle repose sur une modélisation technico-économique du système énergétique au moyen de MARKAL/TIMES. Elle permet d'évaluer et de valider tout scénario énergétique une fois les bases de données et les bases d'hypothèses renseignées.

### **1. La méthodologie MARKAL/TIMES**

Le Centre de Mathématiques Appliquées, soutenu par le Conseil Français de l'Energie, s'est investi depuis 2003, dans le développement d'un modèle MARKAL/TIMES (MARKAL pour Market Allocation) pour la France. MARKAL/TIMES est un outil prospectif qui permet d'obtenir des informations normatives à partir d'analyses de scénarios reflétant les différentes politiques, mesures ou incitations concernant le système énergétique français.

MARKAL/TIMES optimise sur un horizon de plusieurs décennies, un coût actualisé (technique, économique ou environnemental) d'une représentation technico-économique du système énergétique français sous contrainte de satisfaction de la demande.

Cette représentation consiste en une description détaillée de la chaîne énergétique, de l'amont (production et offre énergétique) à l'aval (secteurs économiques utilisant l'énergie finale) en passant par tous les secteurs intermédiaires consommateurs ou producteurs d'énergie. Cette représentation détaillée constitue l'atout principal de notre approche [1].

A partir de données technico-économiques et d'hypothèses exogènes sur les tendances (demande, prix des ressources, taux d'actualisation, etc.) MARKAL/TIMES fournit les évolutions (typiquement tous les 5 ans jusqu'en 2050) des principaux déterminants du système énergétique à savoir :

- l'impact des prix des énergies à court et moyen terme
- l'estimation des émissions de polluants
- la simulation des différentes compétitions technologiques et économiques
- la prise en compte de certaines mesures incitatives de réduction des émissions de gaz à effet de serre
- l'effet de ruptures technologiques
- le rôle des mesures liées à la maîtrise de la demande d'énergie
- l'impact du secteur des transports
- l'impact de différents projets de recherche et développement (performances énergétiques, projets d'énergies renouvelables, maîtrise de la demande d'électricité...)
- les conséquences des politiques énergétiques (par exemple les objectifs du protocole de Kyoto ont été envisagés via MARKAL/TIMES pour la planification nationale de l'Inde, du Canada, de la Suisse, ...).

et permet l'analyse de leurs variantes.

Les données sur lesquelles repose la représentation du système énergétique français - décrite de façon détaillée dans la thèse de Edi Assoumou [10, annexe I] - sont issues de bases statistiques largement validées :

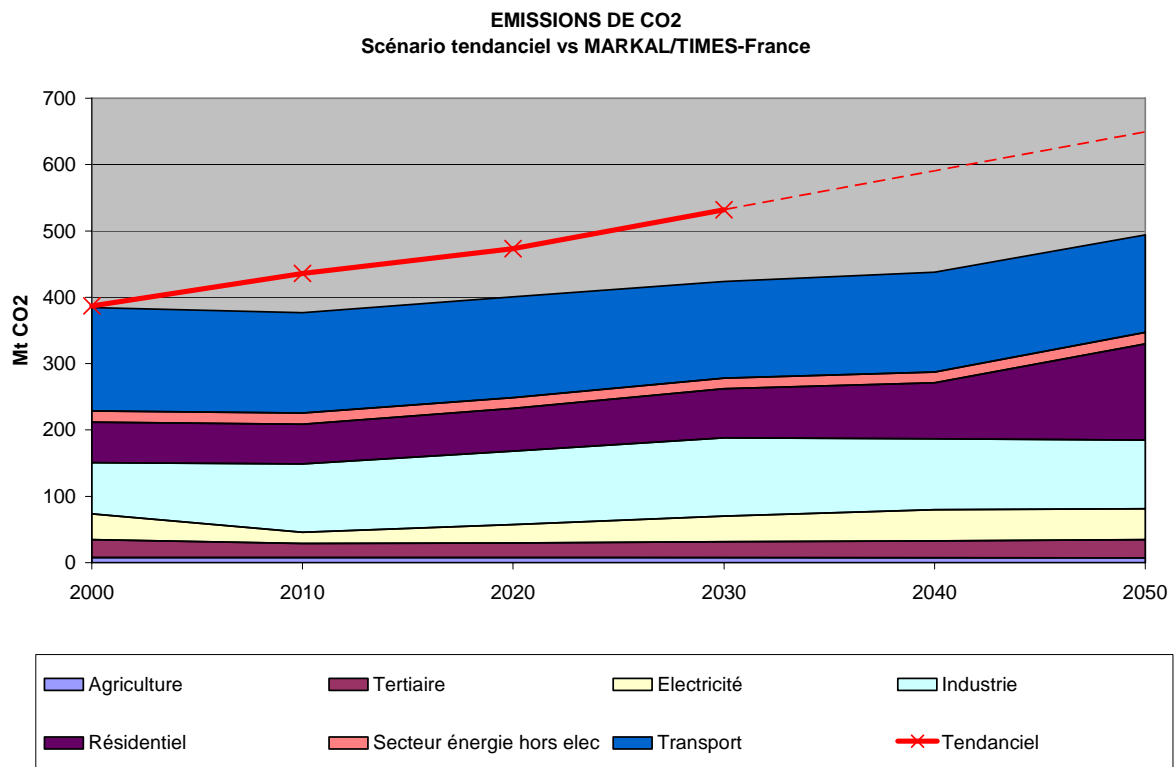
- la représentation des technologies provient de la base de données du projet européen NEEDS (construction d'un modèle MARKAL/TIMES pour les 25 pays européens) et les confrontations au sein de cette communauté garantissent la robustesse des descriptions adoptées.
- les données statistiques pour la France sont extraites des publications officielles : RTE, DGEMP, etc...

Enfin, MARKAL/TIMES est un outil ouvert, utilisé par une large communauté internationale, développé dans le cadre d'un consortium impliquant des équipes de modélisation dans plus de 35 pays ce qui permet les échanges au sein d'un très large panel d'utilisateurs. Cette approche a déjà permis à la Chine [11], au Royaume-Uni [12] et à la Norvège [13] entre autres de développer des scénarios facteur 4 à l'horizon 2050.

Nous disposons donc à travers l'utilisation de notre modèle MARKAL/TIMES d'une approche prospective qui repose sur une méthodologie transparente et ouverte. D'hors et déjà, cette approche nous a permis d'évaluer un certain nombre de scénarios et de fournir des analyses prospectives pour la France, comme en témoignent les publications et communications [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10].

## 2. L'approche MARKAL/TIMES pour la validation, l'évaluation et la projection

L'approche MARKAL/TIMES pour la validation de scénarios prospectifs a été utilisée [5] pour l'analyse du scénario facteur 4 français. Cette analyse a permis d'évaluer les émissions de CO<sub>2</sub> et de proposer des cheminements cohérents menant à l'objectif de réduction par 4 de ces émissions à l'horizon 2050, sous des hypothèses qui doivent encore être confrontées avec les experts de la Commission Energie. Dans cette étude [5], on a pu, par exemple, positionner le scénario tendanciel DGEMP par rapport aux résultats de MARKAL/TIMES et évaluer les poids relatifs des secteurs émissifs sur l'horizon envisagé comme l'illustre la figure suivante (Figure 1) :



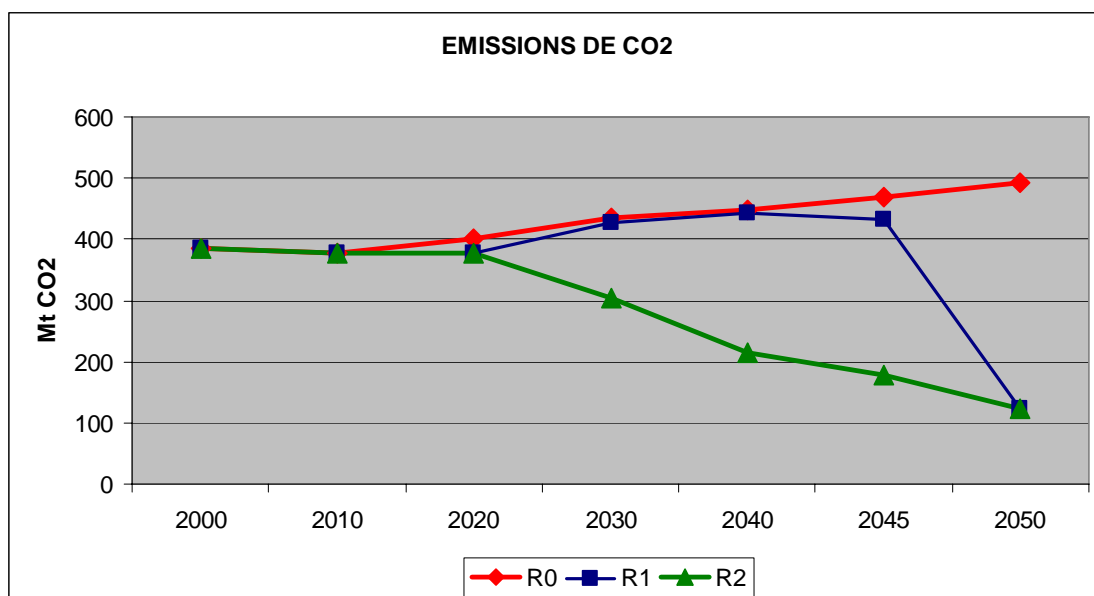
**Figure 1 : Scénario tendanciel vs MARKAL/TIMES-France**

Compte tenu de l'écart en tendance constaté, il est bien évidemment nécessaire de confronter les hypothèses retenues pour les deux scénarios envisagés. Par exemple, un facteur explicatif pourrait

être que le scénario tendanciel ne prend pas en compte les meilleures technologies disponibles contrairement à MARKAL/TIMES.

D'autre part, MARKAL/TIMES permet d'envisager la validation d'un ensemble de recommandations, telles que celles proposées par le scénario Facteur 4 (groupe Boissieu) réalisé en 2006. En effet, le modèle fournit les chemins qui conduisent à l'objectif de réduction souhaité rendant ainsi possible l'analyse de leur pertinence et de leur faisabilité.

Par exemple, l'étude [5] propose des chemins alternatifs établis MARKAL/TIMES-France pour atteindre l'objectif de réduction par 4 des émissions de CO<sub>2</sub> par rapport à leur niveau de 1990 à l'horizon 2050 comme le montre la Figure 2 :



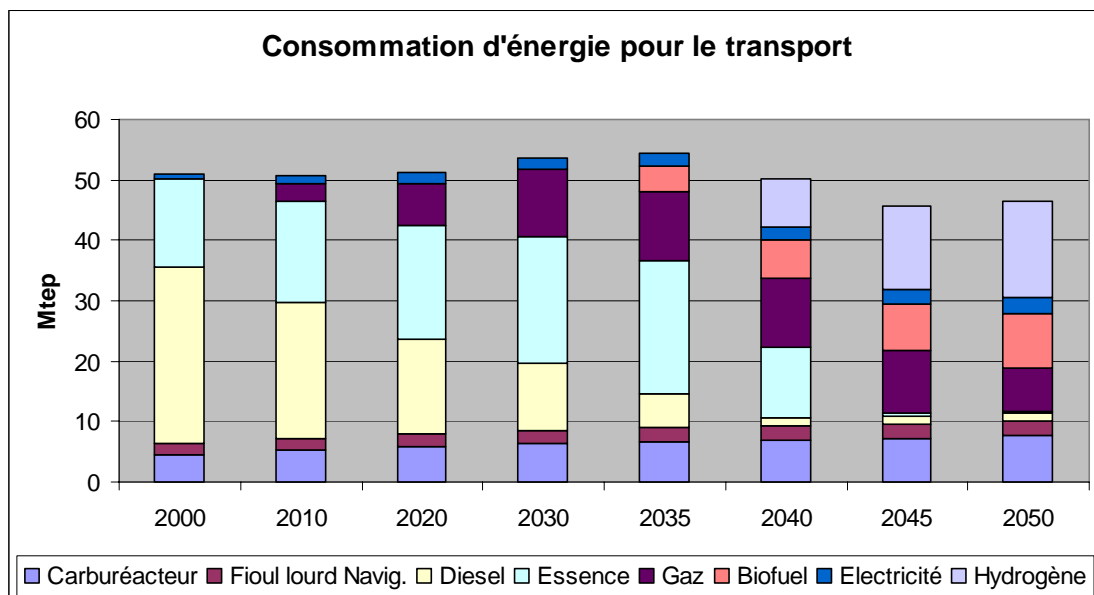
**Figure 2 : Evolution des émissions de CO<sub>2</sub>**

- R0 : le chemin (rouge) correspond au scénario de base (« laisser faire ») tel qu'évalué Figure 1

- R1 : le chemin (bleu) est celui obtenu en imposant une contrainte d'émission sur la dernière période de l'horizon ; il ne tient donc pas compte des recommandations d'étalement des mesures pour atteindre l'objectif facteur 4 ;
- R2 : le chemin (vert) respecte les recommandations imposant des niveaux intermédiaires sur l'horizon (à partir de 2020).

En parallèle des profils d'émission, MARKAL/TIMES-France permet d'accéder à l'évolution du mix énergétique : pour chaque secteur d'activité, on a les niveaux de capacités (MW), niveaux d'activité (PJ) et niveaux d'investissement.

Par exemple, la Figure 3 représente l'évolution de la répartition par type (en tonne équivalent pétrole), des carburants dans le secteur des transports, dans l'hypothèse du chemin R2. Ce mix de carburants permet ainsi d'analyser la pertinence de l'évolution des substitutions, et donc la faisabilité du chemin proposé.



**Figure 3 : Evolution de la répartition par type de carburant**

- De la même façon, l'approche MARKAL/TIMES est couramment utilisée pour évaluer l'impact économique de politiques, de mesures incitatives, de scénarios de rupture sur l'offre et la demande.

A titre d'illustration, les études [7, 8, 9] comparaient deux variantes de politique de déploiement du nucléaire en France à l'horizon 2050 pour le secteur électrique : l'une sans limite d'introduction de nouvelles capacités, l'autre avec une limitation de la capacité nucléaire installée définie par un ratio sur la demande globale d'électricité. Ceci nous a permis la comparaison des émissions de CO<sub>2</sub> et l'évolution du bouquet énergétique pour ces deux variantes. Les Figure 4 et Figure 5 qui montrent l'évolution du mix énergétique dans les deux cas permettent de voir entre autres que les technologies de substitution mises en place pour pallier la contrainte de déploiement sur le nucléaire s'appuient sur une ressource charbon [9] (cycle combiné charbon à gazéification intégré).

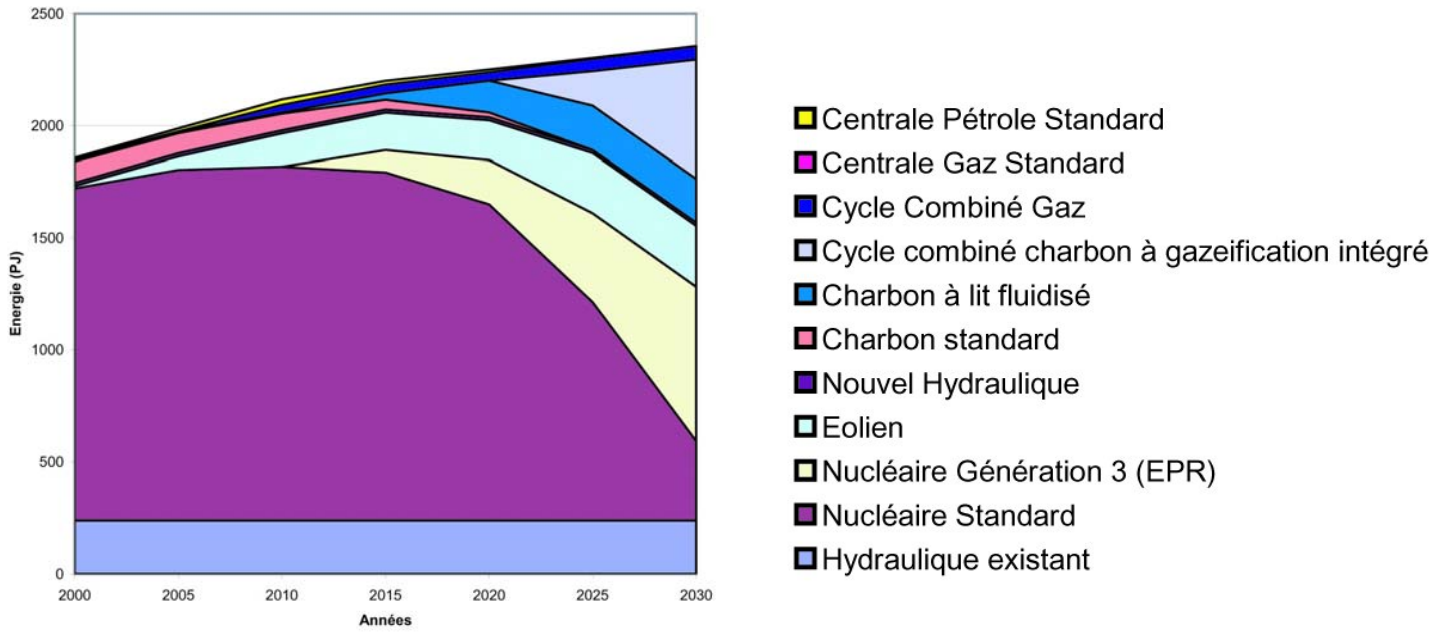


Figure 4 : Politique nucléaire modérée

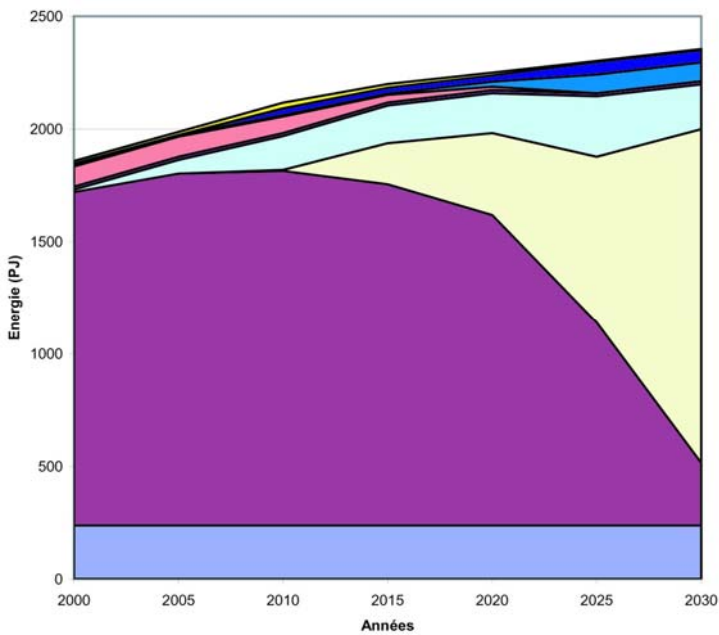


Figure 5 : Politique nucléaire volontariste



### 3. Bibliographie

- [1] Edi Assoumou, Marc Bordier, Gilles Guerassimoff, Cédric Grange, Nadia Maïzi, « La famille MARKAL de modèles de planification énergétique : un complément aux exercices de modélisation dans le contexte français », Revue de l'énergie 558, Juillet - Août 2004.
- [2] Nadia Maïzi, Edi Assoumou, Marc Bordier, Gilles Guerassimoff, « Prospective énergétique : Le modèle MARKAL », présentation à la Direction Générale de l'Energie et des Matières Premières, DGEMP 16 Mai 2005.
- [3] Edi Assoumou, Gilles Guerassimoff, Nadia Maïzi, Marc Bordier, « Etudes de sensibilité pour la prospective électrique française à l'aide du Modèle MARKAL », 4ème colloque MONDER, Martigny (Suisse), 8-11 Janvier 2006.
- [4] Edi Assoumou, Marc Bordier, Gilles Guerassimoff, Nadia Maïzi, « Exercices de prospective technologique pour l'énergie à l'horizon 2050 », Ecole Energies et Recherche, Fréjus 2006.
- [5] Edi Assoumou, Marc Bordier, Gilles Guerassimoff, Nadia Maïzi, « Reducing greenhouse gas emissions by a factor of 4 by 2050: a bottom-up analysis of post Kyoto emissions targets for France », International Energy Workshop, Cape-Town 27-29 June 2006.
- [6] Nadia Maïzi, « Impact on future investments in the electricity production sector: The French paradigm », Seventh International Symposium on Electric and Magnetic Fields, Aussois(France), 19-22 June 2006.
- [7] Nadia Maïzi, Edi Assoumou, Marc Bordier, Gilles Guerassimoff, Vincent Mazauric « Energy mix planning for the French electricity production sector », European Conference on Operational Research Euro2006, Reykjavik 2-5 July 2006.
- [8] Nadia Maïzi, Edi Assoumou, Marc Bordier, Gilles Guerassimoff, Vincent Mazauric « Key features of the electricity production sector through long-term planning : the French case », Power Systems Conference & Exposition, Atlanta 29 Oct - 01 Nov 2006.
- [9] Nadia Maïzi, Edi Assoumou, Marc Bordier, Gilles Guerassimoff, Vincent Mazauric, « The electrical generating sector's impact on industrial energy consumption in France and future world energy investments » submitted to Energy Economics.
- [10] Edi Assoumou, « Modélisation MARKAL pour la planification énergétique long terme dans le contexte français » Thèse de l'Ecole des Mines de Paris, spécialité Economie et Finance, 22 Juin 2006.
- [11] E.D. Larson, P. DeLaquil, Z. Wu, W. Chen, and P. Gao, « Exploring implications to 2050 of energy-technology options for China », Sixth Greenhouse Gas Control Technologies Conference, Kyoto, Japan, Sept-30 – Oct-04, 2002.
- [12] Matthew Leach and Dennis Anderson, « Options for a low carbon future : Review of modelling activities and an update », DTI Economics Paper, September 2005
- [13] Kari Aamodt Espegren, Audun Fidje, Eva Rosenberg, « Reducing Norwegian Greenhouse Gas Emissions with 75% by 2050 », International Energy Workshop, Cape-Town 27-29 June 2006.

## Partie II :

Thèse d'Edi Assoumou soutenue le 22 Juin 2006 à l'Ecole des Mines de Paris :

### **MODELISATION MARKAL POUR LA PLANIFICATION ENERGETIQUE LONG TERME DANS LE CONTEXTE FRANCAIS**

#### **Résumé :**

Dans une problématique énergétique marquée par des contraintes environnementales et de disponibilité des ressources primaires croissantes, le potentiel d'ajustement offert par les technologies fait partie des leviers les plus prometteurs sur le long terme. Les modèles de prospective énergétique constituent alors des supports précieux à l'analyse chiffrée de scénarios énergétiques alternatifs. Pour l'évaluation des choix technologiques futurs, la modélisation de type MARKAL s'avère particulièrement adaptée. Elle détermine une structure technologique optimale sous diverses contraintes, à partir d'une représentation explicite d'un ensemble d'options techniques actuelles et futures pour l'offre et la demande d'énergie.

Dans cette thèse nous réalisons une série de modèles de prospective énergétique pour le système énergétique français et nous proposons une nouvelle approche pour améliorer la représentation classique des systèmes électriques dans MARKAL. Les améliorations proposées portent sur le besoin de flexibilité pour le suivi de la courbe de charge, et sur l'impact de la production éolienne sur les choix de moyens de production.

Le travail de modélisation effectué comporte un modèle électrique flexible, un modèle électrique ouest européen multirégional, un modèle global du système énergétique français.

#### **Mots clés :**

Prospective énergétique, MARKAL, flexibilité des systèmes électriques, échanges électriques européens.