Extension d'un théorème de dualité en programmation linéaire Application à la décomposition de coûts marginaux de long terme

Axel Pierru

ÉCOLE DU PÉTROLE ET DES MOTEURS
INSTITUT FRANÇAIS DU PÉTROLE
228-232, avenue Napoléon Bonaparte
92852 RUEIL-MALMAISON CEDEX
téléphone : 01 47 52 62 80 - télécopieur : 01 47 52 70 36

Extension d'un théorème de dualité en programmation linéaire Application à la décomposition de coûts marginaux de long terme

Axel PIERRU

Avril 2002

Les cahiers de l'économie - n° 49

Série Recherche

La collection "Les cahiers de l'économie" a pour objectif de présenter des travaux réalisés à l'IFP et en particulier à l'École du Pétrole et des Moteurs, travaux de recherche ou notes de synthèse en économie, finance et gestion. La forme peut être encore provisoire, afin de susciter des échanges de points de vue sur les sujets abordés. Elle fait suite à la collection " Cahiers du CEG".

Pour toute information complémentaire, prière de contacter :

Denis **Babusiaux** - *Tél.* 01 47 52 62 80

Résumé

La fonction objectif d'un problème de programmation linéaire peut parfois résulter de l'addition de fonctions élémentaires distinctes, donnant chacune lieu à une interprétation particulière. Le théorème que nous allons présenter a été initialement dérivé par Babusiaux (2000) dans un tel contexte. Il s'agissait alors de d'associer un coût marginal en émission de CO_2 à chacun des produits finis d'une raffinerie pétrolière. La fonction objectif comprenait un premier terme représentant le coût d'exploitation et un second représentant le coût lié aux émissions de CO_2. L'auteur a montré qu'à l'optimum, sous certaines hypothèses, ce coût marginal présentait une structure de coût moyen. Autrement dit, la propriété de dualité est étendue à chacune des fonctions élémentaires auxquelles il est possible d'associer des variables duales élémentaires. Nous reformulons et généralisons ce théorème. Nous montrons qu'il est valide en n'importe quel sommet non dégénéré. Nous fournissons en outre une interprétation simple de ce résultat. Nous montrons de plus, à l'aide d'un exemple, comment décomposer un coût marginal de long terme en un coût marginal d'exploitation et un amortissement économique marginal. Cette décomposition rend possible une meilleure compréhension de la formation des coûts marginaux de long terme. Cet exemple ouvre la voie à d'autres applications du théorème en calcul économique.

1. Introduction

La fonction objectif d'un programme linéaire peut être constituée de différentes fonctions élémentaires, chacune de ces fonctions élémentaires pouvant donner lieu à une interprétation particulière. Le théorème que nous allons formuler a été initialement dérivé par Babusiaux (2000) dans le cadre d'un problème de ce type. Il s'agissait alors d'associer à chaque produit fini pétrolier un coût marginal lié aux émissions de CO_2 d'une raffinerie pouvant traiter différents pétroles bruts. De façon schématique, l'objectif était de minimiser un coût total de traitement, tout en satisfaisant, pour chaque produit fini, une contrainte de demande. La fonction de coût total à minimiser était composée d'une première fonction représentant les coûts classiques liés à l'achat et au traitement des différents bruts et d'une deuxième fonction correspondant au coût lié à l'émission de CO_2. L'auteur a montré qu'à l'optimum, sous certaines hypothèses, les coûts marginaux associés à l'émission de CO_2 ont une structure de coût moyen. De même, les contenus marginaux en CO_2 des différents produits ont une structure de contenu moyen, autrement dit fournissent une clef de répartition par produit des émissions de la raffinerie. Ce résultat revient à généraliser la propriété classique de dualité aux différentes fonctions élémentaires composant la fonction objectif. Nous allons proposer une extension de ce théorème et montrer qu'il demeure valide en toute solution de base réalisable du problème étudié (et non seulement à l'optimum). Nous en donnerons en outre une interprétation originale, en montrant qu'il revient à décomposer le problème étudié en un ensemble de sous-problèmes distincts. Nous montrerons ensuite, à l'aide d'un exemple issu du calcul économique, comment ce théorème permet de décomposer un coût marginal de long terme en un coût marginal d'exploitation et un amortissement économique marginal. Chaque coût marginal ainsi calculé a une structure de coût moyen. Cette décomposition permet d'analyser la formation de coûts marginaux de long terme et fournit des éléments utiles pour une première approche de la sensibilité (sans avoir à réaliser une analyse complète de sensibilité).

2. Théorème de dualité en programmation linéaire avec une fonction objectif à plusieurs composantes

2.1 Enoncé du théorème

Considérons un programme linéaire dont la fonction objectif, que nous appellerons fonction objectif globale, est la somme de plusieurs fonctions, que nous appellerons fonctions objectif élémentaires. Considérons une solution de base réalisable quelconque du programme. À chaque fonction objectif élémentaire il est possible d'associer un vecteur de variables duales, que nous appellerons variables duales élémentaires. Chaque vecteur de variables duales élémentaires vérifie une propriété de dualité : le produit de ce vecteur par celui formé des seconds membres du programme est égal à la valeur de la fonction objectif élémentaire correspondante. Le vecteur des variables duales globales (associées à la fonction objectif globale) est égal à la somme des vecteurs des variables duales élémentaires.

Ce théorème constitue une généralisation au cas d'une solution de base quelconque (non dégénérée) du théorème de Babusiaux (initialement dérivé dans le cas particulier d'une solution optimale).

2.2 Formalisation du théorème

Considérons un programme linéaire, écrit sous sa forme canonique simpliciale, du type :

$$\begin{array}{l} Min\, F = CX \\ AX = b \\ X \geq 0 \end{array}$$

Où $X \in R^n$ (vecteur dont les composantes sont les n variables du modèle)
A de format *(m,n)* et de rang m

Décomposons la fonction globale F en k fonctions élémentaires : $F = \sum_{i=1}^{k} F_i = \sum_{i=1}^{k} C_i X$

À chaque fonction élémentaire F_i peut être associé un vecteur Π_i dont les composantes sont les m variables duales élémentaires correspondantes. La formule de la dualité est respectée : $\Pi_i b = F_i$.

En notant Π le vecteur des variables duales globales associé à F, on a : $\Pi = \sum_{i=1}^{k} \Pi_i$

2.3 Notations et démonstration

Considérons une solution en base réalisable, non nécessairement optimale, du programme de départ. Notons Y le vecteur formé des m variables en base et $\overline{Y}$ le vecteur formé des n-m variables hors base .

$$X = \begin{bmatrix} Y \\ \overline{Y} \end{bmatrix}$$

Notons B et $\overline{B}$ les matrices composant A associées respectivement à l'ensemble des indices des variables en base et hors base :

$$A = \begin{bmatrix} B\ \overline{B} \end{bmatrix}$$

En adoptant, pour le vecteur C et les vecteurs C_i la même approche, avec :

$$C = \begin{bmatrix} D\ \overline{D} \end{bmatrix},\ C_i = \begin{bmatrix} D_i\ \overline{D}_i \end{bmatrix}$$

Avec $D = \sum_{i=1}^{k} D_i$

Pour la solution réalisable considérée, la valeur de la fonction objectif est :

$$F = \begin{bmatrix} D\ \overline{D} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Y \\ \overline{Y} \end{bmatrix} = DY + \overline{D}\overline{Y} = DY$$

En outre : $\begin{bmatrix} B & \bar{B} \end{bmatrix}\begin{bmatrix} Y \\ \bar{Y} \end{bmatrix} = b \Rightarrow Y = B^{-1}b$

Donc : $F = DB^{-1}b$

Le vecteur Π formé des *m* variables duales globales est donné par: $\Pi = DB^{-1}$. La formule de la dualité s'écrit: $F = \Pi b$. En remplaçant *F* et *D*, l'équation précédente s'écrit :

$$\sum_{i=1}^{k} F_i = \left(\sum_{i=1}^{k} D_i\right) B^{-1}b$$

Ou encore : $\sum_{i=1}^{k}\left(F_i - D_i B^{-1}b\right) = 0$

En posant $\Pi_i = D_i B^{-1}$, nous définissons pour chaque fonction élémentaire un vecteur formé des valeurs duales correspondantes (avec de façon évidente: $\sum_{i=1}^{k}\Pi_i = \Pi$). La formule de la dualité est respectée pour chaque fonction élémentaire : $F_i = D_i Y = D_i B^{-1}b = \Pi_i b$.

2.4 Interprétation

On peut remarquer que Π_i représente le vecteur formé des valeurs duales (correspondant à la solution réalisable considérée) pour le programme suivant :

$$\begin{aligned} &Min \qquad F_i = C_i X \\ &AX = b \\ &X \geq 0 \end{aligned}$$

En fait, pour toute démonstration, il aurait suffit de dire que la solution réalisable considérée pour le programme initialement décrit (avec *F* pour fonction objectif) est aussi une solution réalisable des *k* programmes distincts obtenus en remplaçant *F* par F_i. Il est alors possible de déterminer pour chacun de ces programmes un vecteur Π_i formé des valeurs duales correspondantes et satisfaisant la formule de la dualité[1]. Le vecteur Π formé des valeurs duales correspondant au programme initial est alors égal à la somme des vecteurs Π_i (puisque par définition $\sum_{i=1}^{k}\Pi_i b = \sum_{i=1}^{k} F_i = F = \Pi b$).

Du point de vue du modélisateur, ceci revient à déterminer la solution optimale du programme de départ, puis à calculer les *k* vecteurs Π_i en considérant cette solution comme une solution réalisable de chacun des *k* sous-programmes ayant F_i comme fonction objectif. Cette

[1] Rappelons que la formule de la dualité est relative à un sommet quelconque (pas forcément optimal) du fait même de la définition donnée, en section 2.3, du vecteur de variables duales. Nous reviendrons sur ce point en fin de section.

procédure a l'avantage de rendre possible l'interprétation de chaque vecteur de valeurs duales et de préserver l'additivité des valeurs duales.

Soulignons le fait que nous ne nous référons pas ici aux résultats relatifs à la dualité faible, c'est-à-dire à l'existence d'une différence non nulle (sauf à l'optimum) entre les valeurs des fonctions objectifs d'un programme et de son dual pour des solutions réalisables quelconques de chacun des deux programmes. Pour une solution de base réalisable quelconque, nous définissons ainsi des vecteurs Π_i vérifiant la formule de la dualité $\Pi_i b = C_i X$. Pour chacun des *k* problèmes évoqués, le vecteur Π_i ne constitue pas, en général, une solution réalisable du programme dual correspondant. Il en constituera une solution réalisable si *X* est la solution optimale du programme primal considéré.

3. Séparation d'un coût marginal de long terme en un coût marginal d'exploitation et un amortissement économique marginal

En calcul économique, l'utilisation d'un modèle de programmation linéaire peut conduire à déterminer des coûts marginaux de long terme incluant des frais d'exploitation et des coûts d'investissement. La fonction objectif reflète alors ces deux types de coût. Nous proposons d'utiliser le théorème présenté afin de séparer un coût marginal de long terme en un coût marginal d'exploitation et un amortissement économique marginal. Chacun de ces deux termes aura une structure de coût moyen. Cette décomposition mène à une meilleure interprétation des coûts marginaux de long terme et de la formation de ces derniers.

Afin d'en donner une illustration, nous allons prendre l'exemple, simplifié à l'extrême, d'une raffinerie pétrolière peu sophistiquée, qualifiée de *Topping Reforming*. Schématiquement, une telle raffinerie produit à partir d'un pétrole brut donné trois grands types de produits finis : essence, gasoil et fuel lourd. Les rendements obtenus pour chacun des produits sont supposés connus. La production de la raffinerie doit satisfaire durant une année type la demande prévue pour chacun des produits finis. Supposons qu'afin d'accroître le rendement en essence de la raffinerie, il soit possible d'investir dans une unité de craquage catalytique appelée FCC. Une telle unité permet en effet de transformer une partie du fuel lourd en essence. Investir dans cette unité conduit ainsi à modifier les rendements en produits finis d'une partie du brut traité par la raffinerie. L'objectif est de satisfaire les contraintes de demande tout en minimisant le coût total annuel (frais d'exploitation et amortissement économique).

Pour ce faire, nous allons considérer que la quantité totale de brut traitée par la raffinerie en une année résulte de l'addition de deux variables : la quantité (notée *x*) traitée suivant le schéma "topping/reforming" et la quantité (notée *y*) traitée suivant le schéma "topping/reforming/craquage". Il peut être en effet optimal de ne faire transiter par l'unité de craquage que le fuel lourd provenant d'une partie seulement de la quantité totale de brut traitée. On admettra que la capacité de l'unité de craquage doit représenter 25 % de la quantité de brut empruntant le schéma "topping/reforming/craquage". En outre, le coût d'investissement est supposé dépendre linéairement de la capacité de l'unité FCC. En tenant compte du taux d'actualisation de l'entreprise et de la durée de vie de l'unité, on considère que cet investissement correspond à un amortissement économique annuel (montant d'investissement divisé par une somme de facteurs d'actualisation) égal à 28 $ par tonne de capacité installée.

Les rendements obtenus sont donnés par le tableau 1 qui fournit également la demande associée à chacun des produits ainsi que les frais d'exploitation.

Tableau 1

	Schéma "topping reforming"	**Schéma "topping reforming craquage"**	**Demande à satisfaire (millions de tonnes)**
Essence	25 %	40 %	2
Gasoil	35 %	35 %	2
Fuel lourd	35 %	20 %	1
Coût d'achat et de traitement ($/tonne)	100	110	

La fonction objectif (coût total) à minimiser peut être formulée de la manière suivante :

- Coût d'exploitation lié à l'achat et au traitement du pétrole brut : $F_1 = 100x + 110y$
- Amortissement économique annuel représentant le coût d'investissement : $F_2 = 28 \times 0,25y = 7y$

La fonction objectif est ainsi décomposée en deux fonctions élémentaires.

Afin d'écrire le programme sous sa forme simpliciale, nous allons introduire des variables d'écart, en notant *e*, *g* et *f* les excédents (éventuels) de produits finis. En reprenant les notations introduites :

$$X = \begin{bmatrix} x \\ y \\ e \\ g \\ f \end{bmatrix} \qquad A = \begin{bmatrix} 0,25 & 0,4 & -1 & 0 & 0 \\ 0,35 & 0,35 & 0 & -1 & 0 \\ 0,35 & 0,2 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \qquad b = \begin{bmatrix} 2 \\ 2 \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$F = F_1 + F_2 = (100x + 110y) + 7y$$

Notons Π_1, et Π_2 les vecteurs, formés de valeurs duales élémentaires, respectivement associés aux fonctions F_1, et F_2. Comme nous l'avons vu, il est possible de déterminer ces deux vecteurs en n'importe quelle solution réalisable du programme. Nous allons ici directement choisir la solution optimale afin que le concept de coût marginal de long terme ait un sens. À l'optimum, les variables en base sont *x*, *y* et *f*, les variables hors base *e* et *g*. On peut écrire :

$$B = \begin{bmatrix} 0,25 & 0,4 & 0 \\ 0,35 & 0,35 & 0 \\ 0,35 & 0,2 & -1 \end{bmatrix} \text{ Ce qui donne : } B^{-1} = \begin{bmatrix} -6,67 & 7,62 & 0 \\ 6,67 & -4,76 & 0 \\ -1 & 1,71 & -1 \end{bmatrix} \text{ et } \overline{B} = \begin{bmatrix} -1 & 0 \\ 0 & -1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Les variables en base ont pour valeur : $Y = B^{-1}b = \begin{bmatrix} 1,9 \\ 3,81 \\ 0,43 \end{bmatrix}$

Les vecteurs formés des valeurs duales élémentaires sont les suivants :

$$\Pi_1 = D_1 B^{-1} = [100 \;\; 110 \;\; 0] B^{-1} = [66,7 \;\; 238,4 \;\; 0]$$
$$\Pi_2 = D_2 B^{-1} = [0 \;\; 7 \;\; 0] B^{-1} = [46,7 \;\; \text{-}33,3 \;\; 0]$$

Le vecteur Π (formé des valeurs duales globales) donne les coûts marginaux de long terme pour chacun des trois produits finis :

$$\Pi = \Pi_1 + \Pi_2 = [113,4 \;\; 205,1 \;\; 0]$$

L'expression des variables en base en fonction des variables hors base s'écrit en outre (en calculant $B^{-1}\overline{B}$) :

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1,90 \\ 3,81 \\ 0,43 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \text{-}6,67 & 7,62 \\ 6,67 & \text{-}4,76 \\ -1 & 1,71 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e \\ g \end{bmatrix}$$

Nous allons maintenant interpréter les valeurs duales obtenues. Tout d'abord, la valeur duale associée à la contrainte de demande en fuel lourd est nulle. Ceci s'explique par le fait que la variable d'écart associée à cette contrainte est en base à l'optimum et ne figure pas dans la fonction objectif. Il s'agit d'un résultat bien connu : une variable d'écart non nulle représente une contrainte non saturée et pour laquelle la valeur duale associée est nulle. Le coût marginal de long terme associé à la contrainte de demande en essence (donné par la première composante du vecteur Π) s'élève à 113,4 $ par tonne. Intéressons-nous aux deux termes qui le composent (donnés par la première composante des vecteurs Π_1, et Π_2). Accroître la demande en essence conduit à substituer du brut *y* à du brut *x*, sans que la quantité totale de brut traité ne change. Le coût marginal d'exploitation s'élève à 66,7 $ par tonne. Ce résultat est directement lié au traitement par le schéma "topping reforming craquage" d'une plus grande quantité de brut. Pour la même raison, si une tonne supplémentaire d'essence était produite, il faudrait lui affecter un amortissement économique marginal s'élevant à 46,7 $ (première composante du vecteur Π_2). La formation du coût marginal de long terme associé à l'essence est ainsi analysée. Une décomposition similaire peut être opérée pour le coût marginal de long terme du gasoil. Celui-ci s'élève à 205,1 $. Un accroissement de la demande en gasoil, tout en conduisant à traiter une quantité globale de brut plus importante, aboutit aussi à substituer du brut *x* au brut *y*. Comme la quantité globale de brut traité augmente, le coût marginal d'exploitation est positif (238,4 $/t). Inversement, comme la quantité traitée de brut *y* diminue, l'amortissement économique marginal est négatif (-33,3 $/t).

L'amortissement économique marginal ainsi défini a bien une structure de coût moyen :

$$\Pi_2 b = (46,7 \times 2) - (33,3 \times 2) + (0 \times 1,43) = 7 \times 3,81 = D_2 Y = F_2$$

Cette structure de coût moyen est aussi vérifiée par le coût marginal d'exploitation :

$$\Pi_1 b = (66,7 \times 2) + (238,4 \times 2) + (0 \times 1,43) = F_1$$

4. Conclusion

En calcul économique, l'interprétation de coûts marginaux de long terme peut parfois s'avérer délicate. L'utilisation du théorème présenté permet leur décomposition en coûts marginaux d'exploitation et en amortissement économique marginal. L'introduction de la fiscalité dans le modèle ne pose aucun problème et conduit seulement à modifier la fonction objectif. Ce théorème, ainsi que le concept associé de variable duale élémentaire, permettra d'enrichir les résultats fournis par de nombreux modèles de calcul économique, par exemple en rationnement de capital.

Bibliographie

Babusiaux, D., "Les émissions de CO_2 en raffinerie et leur affectation aux différents produits finis", *Cahiers de l'économie* n° 41, 2000.

Déjà parus

CEG-1. D. PERRUCHET, J.-P. CUEILLE,
Compagnies pétrolières internationales : intégration verticale et niveau de risque.
Novembre 1990

CEG-2. C. BARRET, P. CHOLLET,
Canadian gas exports: modeling a market in disequilibrium.
Juin 1990

CEG-3. J.-P. FAVENNEC, V. PREVOT,
Raffinage et environnement.
Janvier 1991

CEG-4. D. BABUSIAUX,
Note sur le choix des investissements en présence de rationnement du capital.
Janvier 1990

CEG-5. J.-L. KARNIK,
Les résultats financiers des sociétés de raffinage distribution en France 1978-89.
Mars 1991

CEG-6. I. CADORET, P. RENOU,
Élasticités et substitutions énergétiques : difficultés méthodologiques.
Avril 1991

CEG-7. I. CADORET, J.-L. KARNIK,
Modélisation de la demande de gaz naturel dans le secteur domestique : France, Italie, Royaume-Uni 1978-1989.
Juillet 1991

CEG-8. J.-M. BREUIL,
Émissions de SO2 dans l'industrie française : une approche technico-économique.
Septembre 1991

CEG-9. A. FAUVEAU, P. CHOLLET, F. LANTZ,
Changements structurels dans un modèle économétrique de demande de carburant.
Octobre 1991

CEG-10. P. RENOU,
Modélisation des substitutions énergétiques dans les pays de l'OCDE.
Décembre 1991

CEG-11. E. DELAFOSSE,
Marchés gaziers du Sud-Est asiatique : évolutions et enseignements.
Juin 1992

CEG-12. F. LANTZ, C. IOANNIDIS,
Analysis of the French gasoline market since the deregulation of prices.
Juillet 1992

CEG-13. K. FAID,
Analysis of the American oil futures market.
Décembre 1992

CEG-14. S. NACHET,
La réglementation internationale pour la prévention et l'indemnisation des pollutions maritimes par les hydrocarbures.
Mars 1993

CEG-15. J.-L. KARNIK, R. BAKER, D. PERRUCHET,
Les compagnies pétrolières : 1973-1993, vingt ans après.
Juillet 1993

CEG-16. N. ALBA-SAUNAL,
Environnement et élasticités de substitution dans l'industrie ; méthodes et interrogations pour l'avenir.
Septembre 1993

CEG-17. E. DELAFOSSE,
Pays en développement et enjeux gaziers : prendre en compte les contraintes d'accès aux ressources locales.
Octobre 1993

CEG-18. J.P. FAVENNEC, D. BABUSIAUX*,
L'industrie du raffinage dans le Golfe arabe, en Asie et en Europe : comparaison et interdépendance.
Octobre 1993

CEG-19. S. FURLAN,
L'apport de la théorie économique à la définition d'externalité.
Juin 1994

CEG-20. M. CADREN,
Analyse économétrique de l'intégration européenne des produits pétroliers : le marché du diesel en Allemagne et en France.
Novembre 1994

CEG-21. J.L. KARNIK, J. MASSERON*,
L'impact du progrès technique sur l'industrie du pétrole.
Janvier 1995

CEG-22. J.P. FAVENNEC, D. BABUSIAUX,
L'avenir de l'industrie du raffinage.
Janvier 1995

CEG- 23. D. BABUSIAUX, S. YAFIL*,
Relations entre taux de rentabilité interne et taux de rendement comptable.
Mai 1995

CEG-24. D. BABUSIAUX, J. JAYLET*,
Calculs de rentabilité et mode de financement des investissements, vers une nouvelle méthode ?
Juin 1996

CEG-25. J.P. CUEILLE, J. MASSERON*,
Coûts de production des énergies fossiles : situation actuelle et perspectives.
Juillet 1996

CEG-26. J.P. CUEILLE, E. JOURDAIN,
Réductions des externalités : impacts du progrès technique et de l'amélioration de l'efficacité énergétique.
Janvier 1997

CEG-27. J.P. CUEILLE, E. DOS SANTOS,
Approche évolutionniste de la compétitivité des activités amont de la filière pétrolière dans une perspective de long terme.
Février 1997

CEG-28. C. BAUDOUIN, J.P. FAVENNEC,
Marges et perspectives du raffinage.
Avril 1997

CEG-29. P. COUSSY, S. FURLAN, E. JOURDAIN, G. LANDRIEU, J.V. SPADARO, A. RABL,
Tentative d'évaluation monétaire des coûts externes liés à la pollution automobile : difficultés méthodologiques et étude de cas.
Février 1998

CEG-30. J.P. INDJEHAGOPIAN, F. LANTZ, V. SIMON,
Dynamique des prix sur le marché des fiouls domestiques en Europe.
Octobre 1998

CEG-31. A. PIERRU, A. MAURO,
Actions et obligations : des options qui s'ignorent.
Janvier 1999

CEG-32. V. LEPEZ, G. MANDONNET,
Problèmes de robustesse dans l'estimation des réserves ultimes de pétrole conventionnel.
Mars 1999

CEG-33. J. P. FAVENNEC, P. COPINSCHI,
L'amont pétrolier en Afrique de l'Ouest, état des lieux
Octobre 1999

CEG-34. D. BABUSIAUX,
Mondialisation et formes de concurrence sur les grands marchés de matières premières énergétiques : le pétrole.
Novembre 1999

CEG-35. D. RILEY,
The Euro
Février 2000

CEG-36. et 36bis. D. BABUSIAUX, A. PIERRU*,
Calculs de rentabilité et mode de financement des projets d'investissements : propositions méthodologiques.
Avril 2000 et septembre 2000

CEG-37. P. ALBA, O. RECH,
Peut-on améliorer les prévisions énergétiques ?
Mai 2000

CEG-38. J.P. FAVENNEC, D. BABUSIAUX,
Quel futur pour le prix du brut ?
Septembre 2000

ECO-39. S. JUAN, F. LANTZ,
La mise en œuvre des techniques de Bootstrap pour la prévision économétrique : application à l'industrie automobile
Novembre 2000

ECO-40. A. PIERRU, D. BABUSIAUX,
Coût du capital et étude de rentabilité d'investissement : une formulation unique de l'ensemble des méthodes.
Novembre 2000

ECO-41. D. BABUSIAUX,
Les émissions de CO2 en raffinerie et leur affectation aux différents produits finis
Décembre 2000

ECO-42. D. BABUSIAUX,
Éléments pour l'analyse des évolutions des prix du brut.
Décembre 2000

ECO-43. P. COPINSCHI,
Stratégie des acteurs sur la scène pétrolière africaine (golfe de Guinée).
Janvier 2001

ECO-44. V. LEPEZ,
Modélisation de la distribution de la taille des champs d'un système pétrolier, LogNormale ou Fractale ? Une approche unificatrice.
Janvier 2001

ECO-45. S. BARREAU,
Innovations et stratégie de croissance externe : Le cas des entreprises parapétrolières
Juin 2001

ECO-46. J.P. CUEILLE,
Les groupes pétroliers en 2000 : analyse de leur situation financière*
Septembre 2001

ECO-47. T. CAVATORTA,
La libéralisation du secteur électrique de l'Union européenne et son impact sur la nouvelle organisation électrique française
Décembre 2001

ECO-48. P. ALBA, O. RECH,
Contribution à l'élaboration des scénarios énergétiques
Décembre 2001

* une version anglaise de cet article est disponible sur demande