

► RESUME

**MAQUETTE ECHEANCES :
EPUISEMENT DES COMBUSTIBLES SELON HOTELLING ET
APPLICATION NATURELLE AU CONTINGENTEMENT DE
L'EFFET DE SERRE**

HELENE OLLIVIER

L'épuisement des combustibles fossiles ainsi que le caractère fini de leur stocks (en dépit des découvertes ou des nouvelles technologies) sont un véritable défi pour le futur de notre économie. L'échéance de leur disparition et donc d'une transformation économique, voire sociale, se rapproche de nous pour être envisageable dans une centaine d'années. Le modèle de Hotelling est un outil performant pour simuler l'évolution des consommations de ces énergies et l'horizon temporel de fin de leur exploitation. Si on considère deux secteurs : les transports d'une part et l'industrie, le tertiaire et le résidentiel d'autre part, on peut décrire l'évolution des consommations respectives des carburants et celles de gaz naturel (incluant le pétrole lourd), charbon et lignite – tous trois supposés substituables. On se situe à l'échelle mondiale. La maquette sous Excel permet de créer un scénario de référence, en partant des données actuelles et des hypothèses du modèle, et de conclure sur des durées prévisibles d'exploitation de l'ensemble des énergies fossiles.

Le phénomène de l'effet de serre renouvelle l'étude de l'épuisement des ressources fossiles, en intégrant une dimension souvent oubliée : l'impact de leur combustion sur l'atmosphère. En utilisant les émissions de carbone (CO₂) comme indicateur des émissions de gaz à effet de serre causées par l'homme, on peut mesurer la responsabilité de cette source d'énergie : sur les 7,5 GtC (milliards de tonnes de carbone) rejetées annuellement, 6 GtC proviennent de la combustion des énergies fossiles. Si l'on exploite et consume la totalité des stocks connus de pétrole, gaz naturel, charbon et lignite, environ 750 GtC seront rejetées dans l'atmosphère. Pour tenter de réduire la consommation excessive et trop rapide des agents économiques, il convient de recourir à un instrument politique tel qu'une taxe mondiale uniforme. On peut comparer les différents taux de taxation et leurs impacts sur la demande, pour ensuite définir un taux intéressant, c'est-à-dire à même de préserver l'environnement.

Ce document n'engage que ses auteurs et non les institutions auxquelles ils appartiennent. L'objet de cette diffusion est de stimuler le débat et d'appeler des commentaires et des critiques.

<u>Introduction</u>	3
<u>I. Illustration du fonctionnement de la maquette</u>	5
<u>1.1. Le modèle</u>	5
<u>1.2. Modélisation de la demande : secteur des transports et autres</u>	6
<u>1.2.1. Secteur des transports : les carburants comme ressource unique</u>	6
<u>1.2.2. Secteur de l'industrie-résidentiel : succession des énergies</u>	7
<u>1.3. Présentation des équations principales</u>	8
<u>1.3.1. Les transports</u>	8
<u>1.3.2. Les autres secteurs : modèle à trois combustibles fossiles</u>	8
<u>1.4. Commentaire des hypothèses</u>	9
<u>II. Quel est l'impact d'une écotaxe uniforme sur l'exploitation des énergies fossiles ?</u>	10
<u>2.1. Scénario de référence : vers la fin des énergies fossiles</u>	10
<u>2.1.1. Partir des chiffres actuels</u>	10
<u>2.1.2. ...pour prédire la fin prochaine des énergies fossiles</u>	11
<u>2.2. Impact d'une politique de lutte contre l'effet de serre</u>	16
<u>2.2.1. Introduction d'une taxe uniforme sur le carbone</u>	17
<u>2.2.2. Résultats donnés par la maquette pour une taxe de 40 \$/tC</u>	18
<u>2.2.3. Résultats pour une taxe sur le carbone dont le taux varie</u>	22
<u>III. Prolongements possibles</u>	26
<u>3.1. Une taxation différenciée par secteur économique</u>	26
<u>3.2. Une taxe croissante $z \rightarrow z.e^{rt}$</u>	26
<u>3.3. Une politique différenciée : pays industrialisés et le reste du monde</u>	27
<u>3.4. Une demande reflétant la réalité du « mix énergétique »</u>	27
<u>Conclusion</u>	28
<u>BIBLIOGRAPHIE</u>	29
<u>Annexe 1. Description des données utilisées</u>	31
<u>Calcul des paramètres de la demande autre:</u>	33
<u>Annexe 2 : Système de notations</u>	36
<u>Annexe 3 : Résolution des systèmes de Hotelling</u>	37
<u>Annexe 4. Calcul des variations de surplus</u>	40
<u>Représentation graphique de la variation du surplus du consommateur</u>	40
<u>Annexe 5 : Facteurs de conversion énergétique</u>	42
<u>Annexe 6 : Étude de sensibilité sur le scénario de référence</u>	43

Introduction

L'énergie constitue une ressource indispensable aux activités humaines, domestiques comme industrielles. Elle permet de satisfaire des besoins de chaleur, de force motrice, d'éclairage... Son utilisation n'a fait que croître, surtout au cours du XX^{ème} siècle : les consommations mondiales d'énergie primaire commercialisables s'élevaient à 9,4 Gtep (milliards de tonnes équivalent pétrole) en 2002, contre 4,4 en 1970 et de l'ordre de 3 en 1960. Nécessaire au développement économique, l'énergie ne peut être consommée sans impact sur l'environnement notamment par le réchauffement du climat de la planète.

La société actuelle base la grande majorité de son économie sur les ressources fossiles : le « mix énergétique » se compose en 2002 de 40 % de pétrole¹, 23 % de gaz, et 26 % de charbon, le reste étant soit de l'énergie nucléaire (7 %) soit des énergies renouvelables (solaire et hydroélectrique). Elle est dépendante vis-à-vis d'une ressource rare et finie. Il est donc nécessaire de s'interroger sur son rythme efficace d'exploitation et d'anticiper sur la date d'extinction de la ressource, impliquant le recours à d'autres énergies.

Energie fossile	Consommation mondiale (Gtep)	Stocks connus (Gtep)	Durée de consommation en l'absence de nouvelles découvertes (ans)
Pétrole	3,55	142,7	40
Gaz	2,28	143,2	60
Charbon	2,39	508	200

La prospective des producteurs de ces énergies, comme Total, accepte ces faits tout en les modulant en fonction du progrès technique, de découvertes futures de nouveaux stocks ou d'une spécialisation de la demande. Les hypothèses permettent de repousser l'échéance de fin d'exploitation des énergies fossiles. D'un autre côté, s'il devait y avoir de fortes tensions sur le marché, à savoir une augmentation importante des prix, les consommateurs pourraient choisir de réduire leur consommation. La finitude des ressources implique de réfléchir à l'économie sans la ressource.

En l'état actuel des connaissances, il existe deux énergies pouvant servir de substitut aux énergies fossiles : le nucléaire et le solaire. Ces technologies ne sont aujourd'hui pas suffisamment compétitives pour s'imposer mais pourraient le devenir face à l'augmentation du coût des énergies fossiles. Il n'y a pas encore de substitut pour les carburants : la voiture à hydrogène n'en est qu'au stade du prototype, même si l'industrie automobile (surtout américaine) investit largement dans ce projet.

Les énergies fossiles ont pour particularité de concourir massivement aux émissions de gaz à effet de serre (essentiellement le CO₂ responsables du changement climatique à l'échelle de la planète. La prise en compte de ces risques a débouché sur la signature du protocole de Kyoto en 1997. Ce dernier impose des limitations quantitatives d'émissions de gaz à effet de serre à certains pays² : les réductions devront atteindre 5 % du niveau des émissions de 1990 en 2010. L'équilibre de négociation internationale a exclu le choix d'une écotaxe mondiale et a privilégié l'option visant à créer un marché de Permis d'Emission Négociables entre les pays ayant pris des engagements.

¹ Source : revue Energie de Total, 2003

² Il s'agit des pays de l'OCDE et des pays à économie en transition.

Si l'approche fiscale a été rejetée à l'échelle mondiale, elle peut être pertinente à l'échelle nationale. Une écotaxe bénéficie également des avantages d'un système de permis négociables en ce qu'elle offre un signal-prix lisible et pérenne à l'ensemble des acteurs de l'économie et permet de réduire les émissions à moindre coût, même en information incomplète.

D'un point de vue optimal, l'écotaxe devrait s'appliquer de manière identique à tous les agents économiques dont l'activité engendre des émissions de gaz à effet de serre (GES) : au secteur des transports, aux consommations résidentielles d'énergie des ménages (chauffage), ainsi qu'aux consommations intermédiaires d'énergie des entreprises. Or pour ces dernières, on observe des mécanismes dérogatoires tels que des atténuations ou des exemptions de taxe.

Pour analyser plus finement l'épuisement des combustibles fossiles, et mesurer l'impact des politiques liées au changement climatique sur ce phénomène, un outil de simulation a été développé. Il s'agit d'isoler les deux secteurs économiques que sont les transports d'une part et l'industrie-résidentiel d'autre part, sachant qu'ils n'ont pas les mêmes besoins en énergie et surtout que la substituabilité des énergies est faible dans le premier cas et forte dans le second. La perspective temporelle ne se situe ni aux alentours de 15-30 ans (prospective ultra détaillée et rigoureuse en terme de chiffres présentés) ni autour de 400 ans (comme a pu le faire M. Moreaux [2002], en donnant une grande importance au progrès technique), mais plutôt autour de 100 ans. Partant d'un scénario de référence où aucune politique de réduction des GES n'est réalisée, on cherche à comparer quels peuvent être les impacts et les interactions d'une telle politique sur le rythme d'exploitation des ressources fossiles et sur les émissions de carbone, en fonction des demandes des deux secteurs.

I . Illustration du fonctionnement de la maquette

Le problème de l'extraction de ressources naturelles non renouvelables, que sont les énergies fossiles, implique de se situer à 100-150 ans en envisageant la disparition de ces ressources. La règle d'Hotelling est la plus connue pour aborder ce type de questions : elle suppose que le prix de la ressource stockée croît à un taux égal au taux d'actualisation. Joël Maurice [2001] ou Pierre-Noël Giraud [2003] ont montré que l'évolution historique du prix du pétrole ne suit pas une règle de Hotelling, essentiellement à cause de l'évolution des réserves de pétrole. Malgré ses limites, nous recourons à un modèle de type Hotelling, dont l'avantage est qu'il repose sur des données initiales observables et sur une évolution déterminée par sa fin située au moment de passage à une technologie de substitution.

1.1. Le modèle

On considère une ressource fossile i qui peut être extraite à un coût unitaire constant c_i .

On raisonne en temps continu : à l'instant $t = 0$, la ressource i est disponible en quantité S_i .

Soient, à l'instant $t \geq 0$, $\pi_i(t)$ le prix de la ressource stockée et $p(t)$ le prix de la ressource vendue sur le marché.

L'exploitation de la ressource est organisée de manière parfaitement concurrentielle, d'où :

$$p(t) = c_i + \pi_i(t)$$

Notons $[0, T_i]$ l'intervalle de temps durant lequel la ressource est effectivement exploitée. Pour obtenir un optimum, il faut que, à la fin de l'exploitation, le stock de la ressource soit nul. De plus, si l'on suppose que la ressource une fois extraite n'est pas stockable (sauf à des coûts prohibitifs), l'équilibre sur le marché de la ressource est réalisé lorsqu'à chaque instant t la quantité extraite correspond à la quantité demandée. Le modèle de Hotelling est basé sur un arbitrage suivant lequel les producteurs peuvent choisir soit de placer leur capital au taux d'intérêt r , soit d'exploiter la ressource dont le prix va croître selon ce même taux r , dit taux d'actualisation. Finalement, cette règle de Hotelling remplit le même rôle qu'une équation d'offre, et détermine le prix de la ressource à chaque instant t :

$$p(t) = c_i + \pi_i e^{rt}$$

où π_i est la rente unitaire initiale.

Prenons maintenant en compte trois ressources épuisables : le pétrole, le gaz naturel et le charbon (dont la lignite). Ces combustibles sont supposés substituables, c'est-à-dire pouvant satisfaire la demande de manière identique. Et on admet que par souci d'efficacité ils sont exploités en ordre de coût marginal croissant. Dès que le stock d'une ressource est épuisé, une ressource un peu plus chère prend le relais :

$$0 < c_1 < c_2 \dots < c_n$$

Les durées d'exploitation sont $[0, T_1]$ et $[T_{i-1}, T_i]$ avec $i \in [2, n]$. Chaque T_i est fini car les fonctions de demande s'annulent au-delà d'un prix seuil, qui correspond au prix de la ressource suivante. Le prix de la ressource i à sa date de fin d'exploitation est égal au prix de la ressource $i+1$ à cette même date, ce qui donne une courbe de demande continue.

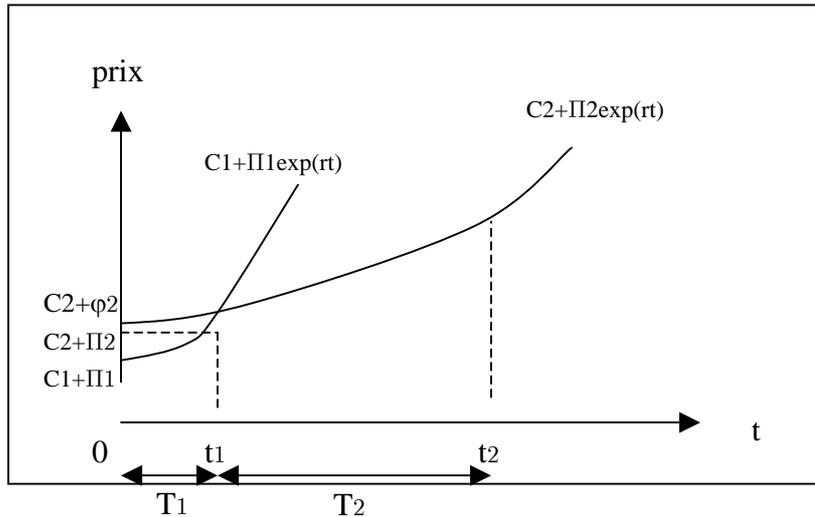


Figure 1 : Schéma représentant le passage du premier combustible au second

La résolution se fait par morceaux pour trouver la date de fin d'exploitation et la rente unitaire de chacune des énergies fossiles considérées. On part de la dernière période pour revenir progressivement vers le passé lorsque la résolution récursive est possible. Il devient nécessaire de distinguer la rente initiale du prix d'une certaine ressource au début de l'exploitation de celle-ci. Il n'y a égalité entre les deux que pour la ressource utilisée en premier.

On définit ainsi la rente au début de l'exploitation :

$$\varphi_i = \pi_i e^{rt_{i-1}}$$

avec $t_{i-1} = t_i - T_i$ et $t_0 = 0$.

On remarquera que, bien qu'on soit dans une situation de rendements constants (le coût unitaire d'extraction est fixé), le prix de la ressource $p(t)$ est supérieur au coût marginal c_i , la différence $\pi_i \cdot e^{rt}$ représentant la rente des propriétaires du combustible par unité de ressource exploitée.

1.2. Modélisation de la demande : secteur des transports et autres

Nous voulons étudier l'impact d'une taxe sur l'économie de l'énergie. Or celui-ci dépend de l'élasticité de la demande et de la possibilité de substitution par d'autres énergies. Nous distinguons d'une part le secteur des transports où les carburants sont l'unique ressource énergétique possible et d'autre part l'industrie et le résidentiel-tertiaire où toutes les énergies fossiles sont alors potentiellement utilisables.

1.2.1. Secteur des transports : les carburants comme ressource unique

Pour les transports, on considère que la demande et l'offre s'équilibrent de manière totalement indépendante des autres secteurs. Cette demande est servie par un seul combustible : 67,8 % des réserves de pétrole ne produiront que des carburants. A moins d'un progrès technique considérable (moteur à hydrogène), il n'y a pas de substitut de grande ampleur aux carburants. La forme de la demande est la suivante :

$$D_{car}(t) = a_{car}(t) - b_{car} \cdot p(t)$$

avec $a_{car}(t) = k_{car} \cdot e^{\alpha_{car} t}$

On considère que l'élasticité prix du carburant (donc b_{car}) est assez faible ; et on estimera a_{car} comme le solde entre l'élasticité revenu et le gain d'efficacité lié au progrès technique.

1.2.2. Secteur de l'industrie-résidentiel : succession des énergies

Le reste de l'économie est capable d'utiliser toutes les énergies fossiles disponibles par ordre de coût croissant, du fait de leur parfaite substituabilité.

La demande des secteurs de l'industrie, du tertiaire et des ménages (chauffage) est unique. Le consommateur privilégie systématiquement le combustible le moins cher (taxe comprise, si taxe il y a), ce qui explique qu'ils soient utilisés les uns après les autres. La fonction de demande ne dépend que du contenu énergétique procuré, sachant que l'on a homogénéisé les volumes en n'utilisant que des tonnes d'équivalent pétrole (tep) pour les calculs :

$$D(t) = a(t) - b \cdot p(t) \text{ avec } a(t) = k \cdot e^{\alpha t}$$

où α est le taux de croissance de l'économie.

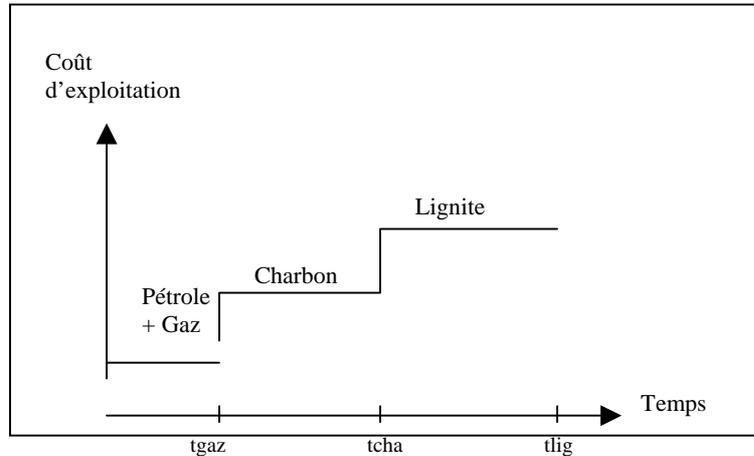


Figure 2. Schéma représentant la succession des exploitation des énergies fossiles

L'interaction avec le secteur des transports est ignorée du fait de la séparation stricte de deux offres considérées comme différentes par nature : celle du pétrole destiné aux carburants, et celle du pétrole lourd, utilisé comme fioul. On adopte donc une hypothèse forte selon laquelle le processus de raffinage ne pèse pas et qu'au lieu d'un arbitrage entre deux utilisations de la ressource pétrole, on admet deux offres distinctes. Cela permet de capturer l'usage particulier des carburants en le traitant à part, sans complexifier le modèle outre mesure. On utilise le pourcentage complémentaire (32,2 %) pour déterminer le stock de pétrole dévolu à l'industrie-résidentiel.

Une technologie alternative existe éventuellement au coût \bar{c} ; ce coût plafonne le prix que le consommateur accepte de payer, ce qui peut éventuellement amener à laisser des ressources en stock au cas où \bar{c} est faible ou la future taxe sur le carbone est élevée. Lorsque le prix d'un combustible atteint celui de l'énergie de substitution, survient un bouleversement de l'économie, qui abandonne les énergies fossiles pour des solutions plus propres. Dans un scénario de référence sans taxe, le rythme d'exploitation est déterminé de façon à avoir un stock de combustible nul lors du passage à l'énergie alternative non fossile.

1.3. Présentation des équations principales³

1.3.1. Les transports

Pour le secteur des transports, le système d'équation applique un modèle de Hotelling simple. L'absence de possibilité de substitution implique que la date de fin d'exploitation n'est pas déterminée par un prix seuil externe mais par une augmentation du prix du carburant telle que la demande finit par s'annuler.

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{k_{car} \cdot e^{\alpha_{car} T_{car}}}{b_{car}} = c_{car} + \varphi_{car} \cdot e^{r T_{car}} \\ \int_0^{T_{car}} (k_{car} \cdot e^{\alpha_{car} t} - b_{car} \cdot c_{car} - b_{car} \cdot \varphi_{car} \cdot e^{r t}) dt = S_{car} \end{array} \right. \quad (0.1)$$

On peut en déduire l'équation implicite vérifiée par T_{car} et la valeur de la rente unitaire :

$$k_{car} \cdot \frac{e^{\alpha_{car} T_{car}} - 1}{\alpha_{car}} - b_{car} \cdot c_{car} \cdot T_{car} - b_{car} \cdot \left[\frac{k_{car} \cdot e^{\alpha_{car} T_{car}}}{b_{car}} - c_{car} \right] \cdot \left[\frac{1 - e^{-r T_{car}}}{r} \right] = S_{car}$$

et $\varphi_{car} = \left(\frac{k_{car} \cdot e^{\alpha_{car} T_{car}}}{b_{car}} - c_{car} \right) \cdot e^{-r T_{car}}$

1.3.2. Les autres secteurs : modèle à trois combustibles fossiles

On associe le pétrole lourd et le gaz naturel (en utilisant l'indice 'gaz'), utilisés dans la première période, suivis du charbon (bitumineux) et ensuite de la lignite (de moindre qualité). Les conditions de prix de fin de période d'exploitation et d'épuisement de chaque ressource s'écrivent successivement :

Pour le pétrole lourd et le gaz naturel :

$$\left\{ \begin{array}{l} c_{cha} + \varphi_{cha} = c_{gaz} + \varphi_{gaz} \cdot e^{r T_{gaz}} \\ \int_0^{T_{gaz}} (k \cdot e^{\alpha t} - b \cdot c_{gaz} - b \cdot \varphi_{gaz} \cdot e^{r t}) dt = S_{gaz} \end{array} \right. \quad (0.2)$$

³ Le détail de la résolution des équations figure en Annexe 3.

Pour le charbon :

$$\left\{ \begin{array}{l} c_{lig} + \varphi_{lig} = c_{cha} + \varphi_{cha} \cdot e^{rT_{cha}} \\ \int_0^{T_{cha}} \left(k \cdot e^{\alpha t_{gaz}} \cdot e^{\alpha t} - b \cdot c_{cha} - b \cdot \varphi_{cha} \cdot e^{rt} \right) dt = S_{cha} \end{array} \right. \quad (0.3)$$

Pour la lignite :

$$\left\{ \begin{array}{l} Inf \left(\bar{c}, \frac{k \cdot e^{\alpha T_{lig}}}{b} \right) = c_{lig} + \varphi_{lig} \cdot e^{rT_{lig}} \\ \int_0^{T_{lig}} \left(k \cdot e^{\alpha t_{cha}} \cdot e^{\alpha t} - b \cdot c_{lig} - b \cdot \varphi_{lig} \cdot e^{rt} \right) dt = S_{lig} \end{array} \right. \quad (0.4)$$

Nous obtenons donc deux modèles indépendants : pour les carburants, un système de deux équations à deux inconnues ; et pour le reste, un système de six équations à six inconnues. Ces trajectoires donnent pour chaque type d'énergie les valeurs d'équilibre de T_i et φ_i (d'où on en déduit π_i).

1.4. Commentaire des hypothèses

Le fait d'utiliser un modèle de Hotelling signifie que l'on se place dans une situation de concurrence pure et parfaite, un marché financier parfait, et des réserves connues avec certitude.

Soulignons les hypothèses du modèle :

- ❖ les combustibles fossiles sont considérés comme parfaitement substituables pour les consommations provenant de l'industrie, du tertiaire et des ménages ;
- ❖ les combustibles fossiles ne sont pas utilisés en même temps mais suivant un ordre de coût marginal croissant⁴ ;
- ❖ il existe deux types de gisement de pétrole et deux offres pétrolières indépendantes⁵.

Malgré les limites inhérentes aux hypothèses du modèle, il est à même d'offrir des ordres de grandeur des consommations énergétiques mondiales, sachant qu'aujourd'hui l'utilisation majoritaire est effectivement du pétrole et du gaz, et qu'il faudra bientôt recourir au charbon. Après avoir présenté la maquette, il convient d'examiner les résultats qu'elle est capable de fournir, en commençant par un scénario de référence sans politique environnementale (2.1), pour ensuite introduire une taxe uniforme sur le carbone (2.2).

⁴ Stephen P. Holland (2003), aboutit à la conclusion selon laquelle les contraintes d'extraction peuvent modifier l'ordre d'extraction : si la ressource la moins chère existe en quantité limitée, il peut être optimal d'exploiter d'abord toute la ressource plus chère mais abondante. De plus, dans la réalité, l'économie n'a pas recours à une seule énergie à la fois, mais utilise un « mix énergétique » différent selon les pays.

⁵ En réalité le processus de raffinage résulte d'un arbitrage, selon les prix des deux produits, par les producteurs de pétrole. Il existe des contraintes inhérentes à la transformation du pétrole brut : on ne peut physiquement pas tout transformer en carburant, il y a toujours un résidu qui sert alors de pétrole lourd (fioul).

II. Quel est l'impact d'une écotaxe uniforme sur l'exploitation des énergies fossiles ?

Nous analysons les impacts de l'introduction d'une taxe uniforme sur le carbone en partant d'un scénario de référence correctement détaillé et en lui comparant un scénario avec taxation.

2.1. Scénario de référence : vers la fin des énergies fossiles

2.1.1. Partir des chiffres actuels...

Les données spécifiques à l'énergie ne manquent pas, en raison de son importance pour les pays producteurs (par exemple, OPEP), pour les pays consommateurs et pour les échanges internationaux (dépendance énergétique, conflits au Moyen-Orient). Afin d'avoir une source homogène nous utilisons le fichier très détaillé de BP (2003) (cf. l'Annexe 1).

Soit $t = 0$ l'année 2002

Soit le taux d'actualisation $r = 5\%$

BP ne publie pas ses coûts d'exploitation de chaque énergie. Pour cela, on retiendra les valeurs sélectionnées par M. Moreaux et B. Magné (2002) dans leur étude sur les stratégies de long terme. Afin d'obtenir des coûts proches de la réalité⁶, on affecte les coûts d'exploitation d'un coefficient multiplicatif unique : 6,74 pour obtenir les coûts de production.

Combustible fossile	Coût d'exploitation (\$/tep)	Coût de production (\$/tep)
Carburant	13,643	91,95427
Pétrole	9,25	66,32
Gaz naturel	10,03	
Charbon	13,029	87,81546
Lignite	18,845	127,0153

Les conditions initiales sont obtenues après des transformations détaillées en Annexe 1. Pour la demande de carburants, on admet qu'elle représente 67,8 % de la demande actuelle de pétrole brut. Pour le taux de croissance α_{car} , on prolonge une évolution historique de long terme de 2% (1800-2000). On en déduit les paramètres suivants (exprimés en tep) :

$$k_{car} = 4,152^E+9$$

$$\alpha_{car} = 2\%$$

$$b_{car} = 9,2576E+6$$

L'hypothèse de parfaite substituabilité des combustibles dans le secteur industrie / résidentiel est une hypothèse forte qui conduit à additionner les prix en fonction du rendement énergétique (volume en

⁶ D. Babusiaux estime que les coûts de production du pétrole peuvent varier entre 2 \$/baril (Arabie saoudite) et 8 à 10 \$/baril (Mer du Nord), c'est-à-dire entre 14,66 \$/tep et 73,31 \$/tep. A cela s'ajoutent les coûts de transport qui sont faibles pour le pétrole : 1 à 2 \$/baril (22 à 29,32 \$/tep), mais élevés pour le gaz naturel par exemple : environ 10 \$/baril (73,31 \$/tep). Les variations de coût sont encore plus grandes dans le cas du charbon : allant de 10 à 100 \$/t selon qu'il est produit soit en Afrique du Sud ou Australie soit en Europe (de 16 à 161,5 \$/tep si charbon, de 24,7 à 246,9 \$/tep si lignite).

⁷ Pour simplifier, on associe le pétrole lourd (en faible quantité) et le gaz, et on transforme leurs coûts en les additionnant suivant leurs volumes (en tep) respectifs.

tep) respectif de leur combustible⁸. Pour le taux de croissance, on prolonge également une évolution historique de long terme de 2 %, mais on inclut une amélioration du rendement énergétique, que l'on suppose de 0,5 % (hypothèse optimiste mais tenant compte du progrès technique) : $\alpha = 1,5\%$. On utilisera les paramètres suivants (exprimés en tep) :

$$k = 1,46029E+10$$

$$\alpha = 1,5\%$$

$$b = 9,71057E+7$$

L'analyse de sensibilité des résultats de la maquette à la valeur initiale des paramètres figure en Annexe 6.

2.1.2. ...pour prédire la fin prochaine des énergies fossiles

Le scénario de référence décrit l'exploitation des énergies fossiles en l'absence de politique environnementale. Il permet de visualiser les échéances de disparition des énergies fossiles utilisées l'une après l'autre. Il représente donc un scénario « neutre », auquel on pourra ensuite comparer d'autres scénarios avec taxe sur le contenu en carbone des combustibles fossiles.

Pour le réaliser, on a traduit sur Excel les équations détaillées en Annexe 3. La maquette obtenue donne la durée d'exploitation et la rente unitaire de chaque ressource. Grâce à ces résultats, on peut déduire les évolutions concernant les prix (Hors Taxe et ensuite Toutes Taxes Comprises), les consommations, les stocks, les émissions de carbone et les variations de profit des propriétaires des combustibles, des recettes de l'État et de surplus des consommateurs (cf. Annexe 4).

a) Les prix

Tout d'abord, on observe que le changement d'un combustible à l'autre est aisément repérable grâce à la courbe des prix. Dans un tableau d'évolution temporelle, on applique à chaque ressource la formule suivante pour décrire le prix HT à chaque instant t :

$$p_i(t) = c_i + \varphi_i \cdot e^{r(t-t_i)}$$

avec t_i indiquant la date de début de l'exploitation de ce combustible⁹. Dans le scénario de référence, les prix HT et TTC sont confondus. Le graphique ci-dessous montre la croissance exponentielle des prix en fonction du taux d'actualisation r , respectant la règle de Hotelling. On visualise également la règle du moindre coût marginal où le pétrole lourd et le gaz naturel sont exploités en premier lieu, avant le charbon, qui lui-même est exploité avant la lignite. La contrainte de continuité du prix du combustible (en s'intéressant au contenu énergétique et non pas au type de combustible) est respectée.

⁸ Le détail des calculs est en Annexe I : la correction s'effectue en modifiant les coûts d'exploitation (seule donnée externe modifiable, sachant qu'il est impossible d'influer sur la rente car c'est un résultat du modèle, cf. supra) : on tente d'approcher au maximum la valeur réelle de la consommation globale d'énergie fossile en 2002 (5,8 Gtep en 2002) et les émissions de carbone (7 GtC).

⁹ C'est-à-dire que l'on soustrait les durées d'exploitation des combustibles utilisés précédemment

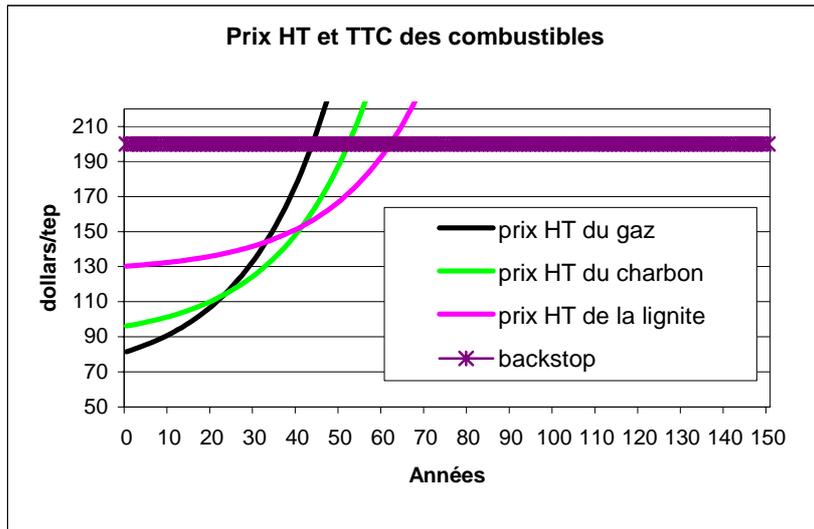


Figure 3 : Evolution des prix des combustibles dans le scénario de référence sans taxation

La présence d'une énergie de substitution non fossile dans le modèle est une hypothèse particulièrement importante. Elle signifie que l'on adopte un point de vue optimiste sur l'avenir : il n'est pas si grave de consommer entièrement les réserves de combustibles fossiles, car il existera une solution de rechange que l'on acceptera de payer en dépit de son coût plus élevé. Par conséquent, plus le prix de cette énergie alternative est faible, plus les durées d'exploitation des combustibles fossiles sont réduites. Après simulation sur quelques valeurs, on peut comparer la durée totale d'exploitation des combustibles fossiles pour la demande industrie / résidentiel, en fonction de la valeur de l'énergie alternative :

Date d'occurrence de l'énergie de substitution	Jamais	400 ans	200 ans
Fin d'exploitation de la lignite (ans)	80,58	74,79	61,72

D'après ces résultats, lorsqu'il n'y a pas d'énergie de substitution, la durée maximale atteint 80,58 ans, tandis que dans le cas de référence choisi ($\bar{c} = 200$) elle est de 61,72 ans. Il est nécessaire de garder à l'esprit la portée de cette hypothèse pour pouvoir interpréter les résultats qui suivent. En effet, si les durées d'exploitation de chaque combustible peuvent sembler trop faibles par rapport à ce qui est généralement admis (40 pour le pétrole, 60 ans pour le gaz, et 200 ans pour le charbon), la cause provient de l'hypothèse d'un substitut non fossile. Lorsqu'on lève cette hypothèse, le modèle donne d'ailleurs un résultat sur la durée d'exploitation des carburants (c'est-à-dire de la majorité du pétrole) de l'ordre de 40 ans.

b) Les volumes

Les évolutions respectives des consommations et des stocks sont liées. Dans le cas des consommations, on applique les formules qui suivent :

- pour les carburants : $D_{car} = k_{car} \cdot e^{\alpha_{car} t} - b_{car} \cdot p_{car}(t)$
- pour les autres énergies : $D_i = k \cdot e^{\alpha t} - b \cdot p_i(t)$

On observe que les deux secteurs sont totalement indépendants, ainsi la consommation de carburants n'a aucun impact sur la consommation de pétrole lourd et gaz naturel en première période. Cette disjonction est sans doute une lacune du modèle, et sera abordée dans les prolongements possibles. Par contre, la continuité de la demande est assurée pour le secteur de l'industrie-résidentiel : la

demande croît assez rapidement, mais sans rupture lors du changement d'énergie. La fin d'exploitation de ce secteur a lieu plus soudainement que dans le cas des carburants où la demande décroît progressivement ; cela provient de l'existence d'une énergie alternative dans le secteur industrie-résidentiel.

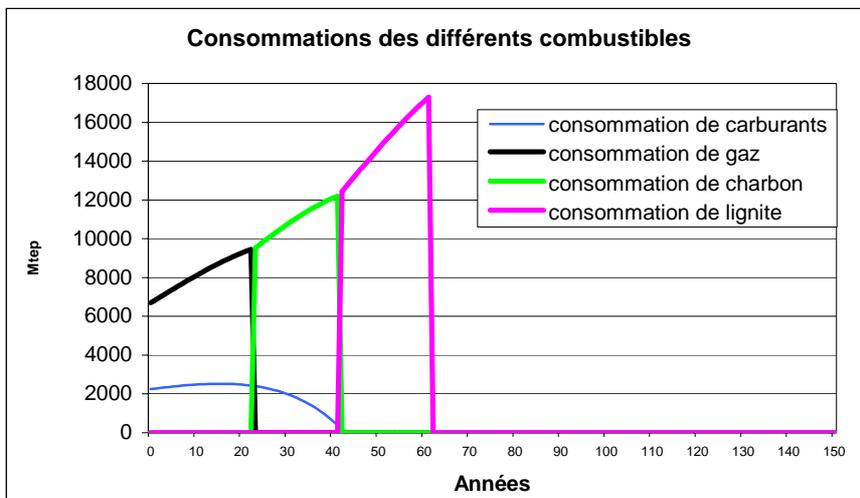


Figure 4 : Evolution de la demande industrie-résidentiel et de celle de carburant dans le scénario de référence

La demande suit une croissance exponentielle en fonction des besoins, plus rapide que celle de la population, en raison du développement. Or on a choisi un paramètre α relativement faible (1,5 % en général et 2 % pour les carburants) par rapport à ce que pourrait être le taux de croissance des besoins énergétiques si les pays actuellement en développement atteignaient un mode de vie plus proche de celui des pays développés. De plus la population mondiale est effectivement en croissance ; donc le trend choisi dans le modèle ne reflète que partiellement l'ampleur de la hausse de consommation des énergies.

D'après le tableau de sensibilité (Annexe 6), les paramètres de la demande industrie-résidentiel influent fortement sur les résultats, c'est-à-dire que le choix de la fonction de demande qui croît en partie exponentiellement (son ordonnée à l'origine $a(t)$ croît) est responsable de la vitesse d'exploitation et donc des faibles durées d'exploitation des combustibles fossiles. Mais cette fonction reflète la situation actuelle (consommation et prix) ainsi que l'évolution à la hausse de la consommation.

Dans le cas des stocks, on applique la formule suivante :

$$Stock(t) = S_i - \text{somme des consommations précédentes}$$

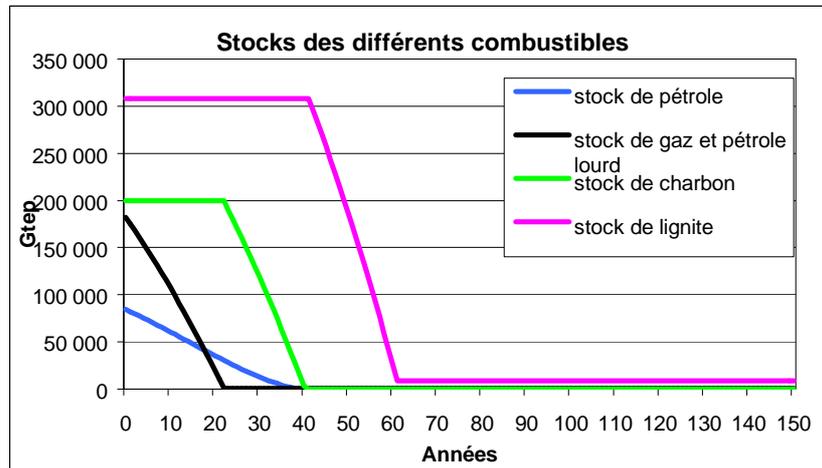


Figure 5 : Evolution des réserves dans le scénario de référence

Le modèle de Hotelling implique de ne pas laisser de ressources stockées jusqu'à ce que son coût d'utilisation dépasse le prix d'une autre énergie. La succession des combustibles apparaît à travers le fait que lorsque le stock d'une ressource s'annule, la ressource suivante commence à être exploitée et présente un stock décroissant. Le cas du pétrole (uniquement transformé en carburants) est à traiter à part, d'où l'absence de corrélation entre l'évolution de son stock et celle des autres. La fin simultanée des carburants et du charbon, dans le scénario de référence, n'est qu'un hasard.

La conclusion essentielle du scénario de référence consiste à affirmer que, si l'on admet les hypothèses présentées précédemment :

$$\begin{aligned}
 T_{car} &= 44,8 \text{ ans} \\
 T_{gaz} &= 22,9 \text{ ans} \\
 T_{cha} &= 18,2 \text{ ans} \\
 T_{lig} &= 20,6 \text{ ans}
 \end{aligned}$$

D'après ces prévisions, le recours aux énergies fossiles sera rendu impossible par l'épuisement des stocks dans 61,72 ans. Cette conclusion souligne l'imminence du problème de l'« après énergies fossiles », et non pas seulement celui de l'« après pétrole ». Une reconversion énergétique est à envisager dans les 50 prochaines années. En réalité, on peut s'attendre à ce que l'effet prix joue un rôle dissuasif, à ce que chaque combustible soit réservé à un emploi spécialisé, en réduisant les autres consommations ou en substituant par les énergies renouvelables dans certains cas. Un certain mode de gestion de l'énergie pourrait permettre de retarder l'échéance de la fin des combustibles fossiles.

c) Les valeurs

Avant de présenter le problème environnemental, il est utile de représenter l'évolution de la rente des propriétaires des combustibles et du surplus des consommateurs. Cela servira de référence pour les variations de profit et de surplus engendrées par l'introduction d'une taxe.

On suppose que ce ne sont pas les mêmes acteurs économiques qui possèdent toutes les ressources de tous les combustibles. On se situe dans un cadre de concurrence pure et parfaite ; chaque combustible est possédé par des propriétaires différents, il n'y a pas de monopole ni pour une

énergie, ni pour un ensemble d'énergies. D'après le graphique ci-dessous, tous les propriétaires ont des profits croissants. Ceux qui possèdent les carburants ont un profit en forme de cloche, où le maximum est de un million de dollars courant et le minimum de 280 000 \$. Dans le cas des autres combustibles, la courbe part d'un minimum, croît rapidement et chute verticalement en raison du passage instantané à une autre énergie :

- le profit de l'exploitation de gaz naturel se situe entre 100 000 et 410 000 \$,
- le profit lié au charbon entre 220 000 et 800 000 \$,
- celui lié à la lignite entre 350 000 et 1 200 000 \$.

Il est donc plus rentable d'exploiter la lignite et les carburants, à cause de la valeur plus élevée de leur rente respective.

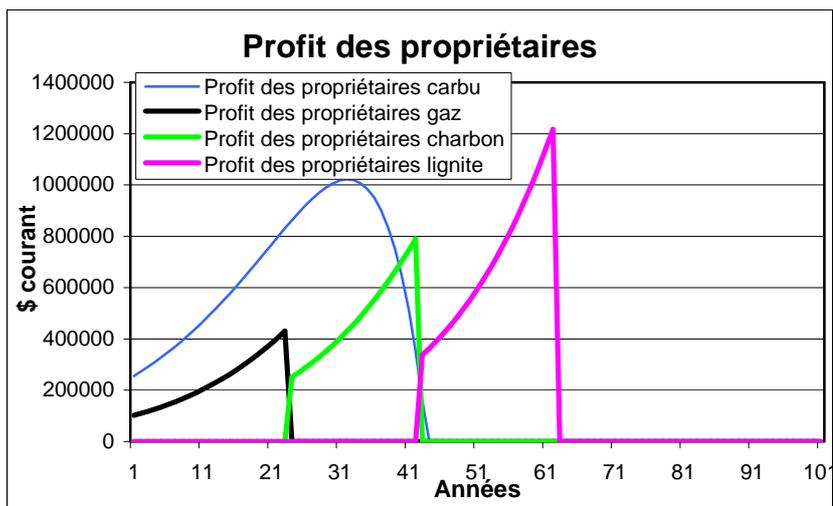


Figure 6 : Profit des propriétaires de chaque combustible fossile

Deux secteurs de consommation existent dans le modèle, leur surplus les distinguent radicalement : l'industrie-résidentiel a un surplus positif, tandis que les transports ont un surplus négatif. On peut observer un légère croissance du surplus des consommateurs industriels et ménagers, avec une continuité de la courbe entre le gaz et le charbon, mais avec une rupture lors du passage à la lignite où le surplus du consommateur devient bien plus important. A l'inverse, le surplus du consommateur des transports est négatif, décroît de plus en plus vite et s'annule quasi instantanément.

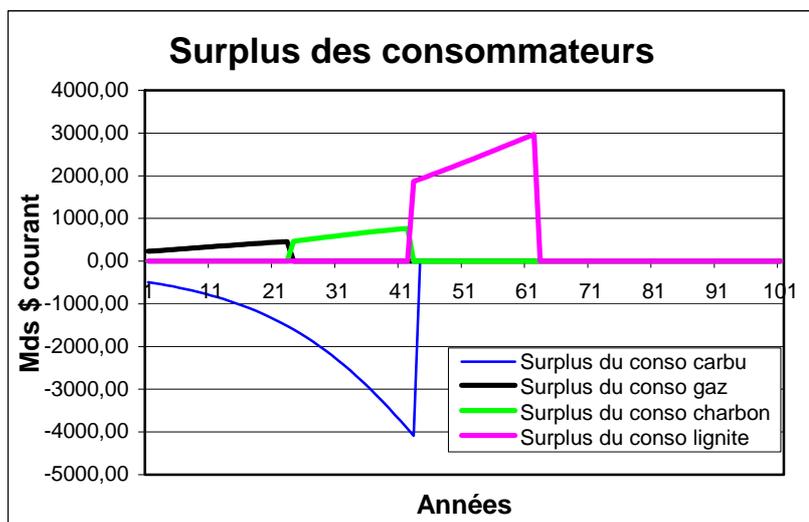


Figure 7 : Surplus des consommateurs par type de combustible

d) Les émissions de carbone

Le problème des conséquences environnementales peut être abordé en se focalisant uniquement sur le rejet du carbone. La politique de lutte contre l'effet de serre devient nécessaire à partir du moment où les émissions de carbone atteignent un niveau inacceptable pour la société. Or les émissions varient en fonction du type de combustible utilisé, et sont cumulatives à l'horizon de temps considéré. On observe une évolution néfaste : on commence par utiliser les énergies fossiles les plus propres (pétrole et gaz naturel) pour ensuite se tourner vers les ressources à fortes émissions en carbone (charbon et lignite). Par conséquent, la situation va se dégrader, et non s'améliorer. Des mesures politiques apparaissent comme nécessaires dès aujourd'hui, en prévision de demain. En effet, la courbe totale se caractérise par une croissance très rapide et par un seuil maximal de 750 GtC atteint dans environ 60 ans.

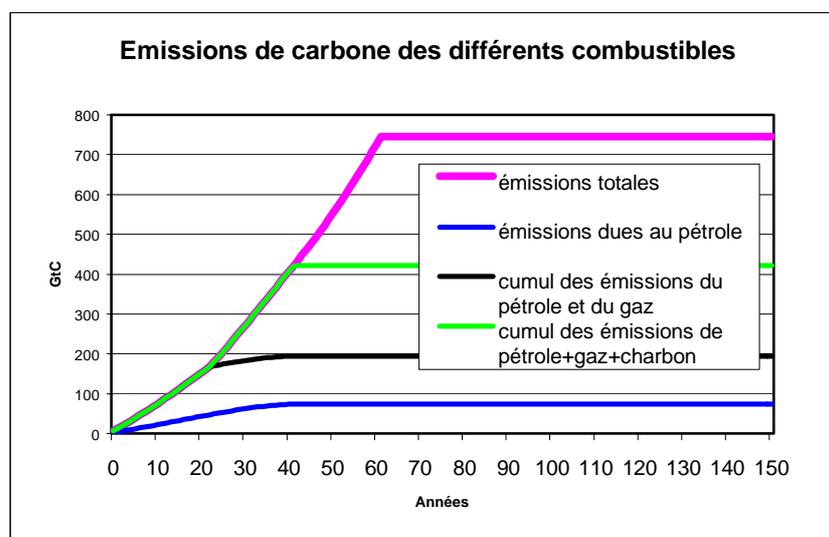


Figure 8 : Emissions cumulées de carbone provenant de la combustion des énergies fossiles

Rappelons que l'extrême rapidité avec laquelle le seuil maximal des émissions de carbone est atteint résulte de l'hypothèse de l'existence d'une solution énergétique alternative : sans elle, la durée d'exploitation des énergies fossiles est plus longue (80 ans). Or la concentration d'émissions de carbone sur un faible intervalle temporel est particulièrement néfaste pour l'environnement et peut entraîner un très fort effet de serre. En effet, les capacités régénératrices de l'atmosphère ne peuvent pas faire face à une telle quantité de carbone rejetées si rapidement. Par conséquent, si une politique visant à allonger les périodes d'exploitation ne se justifie pas par la disparition prochaine des combustibles fossiles, elle est tout à fait intéressante pour réduire les rythmes de rejet carbone dans l'atmosphère.

2.2. Impact d'une politique de lutte contre l'effet de serre

La croissance rapide et continue des émissions de carbone rend nécessaire la promotion d'une politique visant à contrecarrer cette évolution ou, plus modestement, à tenter de l'amoinrir. Plusieurs instruments sont disponibles, tels que les mesures réglementaires (fixation d'un quota de pollution acceptée), la fiscalité uniforme ou la création d'un marché de permis d'émettre. Notons qu'en information parfaite, taxe et permis ont des effets semblables.

2.2.1. Introduction d'une taxe uniforme sur le carbone

Si on augmente le coût d'extraction, le modèle de Hotelling conclut sur l'étalement de l'exploitation de chaque combustible sur une plus longue durée, la réduction de la rente des propriétaires et la modification du surplus des consommateurs.

Une interprétation possible de l'instauration d'une taxe proportionnelle au volume de carbone émis est qu'elle correspond à une variation du coût d'extraction. Cette taxe permet d'« internaliser » le coût social causé par la pollution. Ce système a des incidences redistributives : en augmentant le coût du combustible, il diminue le revenu des consommateurs au profit des agents qui bénéficieront des ressources fiscales ainsi collectées. Dans le cadre de cette maquette, on considérera que le taux de la taxe est une donnée exogène, défini au niveau mondial suivant les résultats fournis par les modèles climatiques sur les impacts des émissions sur le climat.

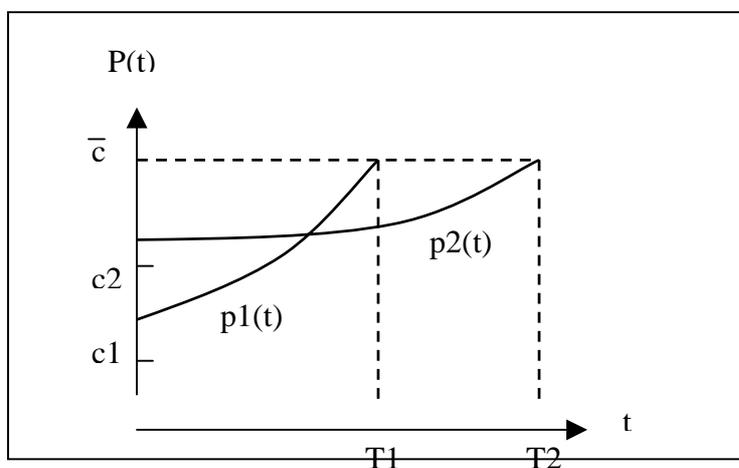


Figure 9 : Effet d'une variation de coût sur la durée d'exploitation ($c_1 < c_2$)

L'utilisateur de combustible est soumis au prix toutes taxes comprises :

$$P_i(t) = p_i(t) + z \cdot cc_i$$

où z désigne le taux de la taxe sur le carbone et cc_i le contenu en carbone du combustible utilisé. La fonction de demande en est modifiée :

$$D(t) = a(t) - b \cdot P(t) = a(t) - b \cdot [p(t) + z \cdot cc_i]$$

L'introduction d'une taxe conduit à un nouveau partage de la rente. L'Etat qui intervient pour obliger à une réduction des émissions de gaz à effet de serre reçoit les recettes $z \cdot cc_i \cdot D(t)$. Le propriétaire des ressources arbitre toujours sur le rythme d'extraction de la même manière, mais en suivant la demande contrainte à un changement du fait de l'augmentation du prix qu'elle subit.

Les conditions de prix de fin de période d'exploitation et d'épuisement de la ressource i (soit le gaz, soit le charbon) s'écrivent :

$$\left\{ \begin{array}{l} c_{i+1} + \varphi_{i+1} + z \cdot cc_{i+1} = c_i + \varphi_i \cdot e^{rT_i} + z \cdot cc_i \\ \int_0^{T_i} (k \cdot e^{\alpha t_{i-1}} \cdot e^{\alpha t} - b \cdot c_i - b \cdot \varphi_i \cdot e^{rt} - b \cdot z \cdot cc_i) dt = S_i \end{array} \right. \quad (0.5)$$

avec $\varphi_i = \pi_i e^{r t_{i-1}}$; $t_{i-1} = t_i - T_i$ et $t_0 = 0$.

Dans le cas de la lignite qui est utilisée avant le recours à l'énergie non fossile, les trajectoires sont décrites par :

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Inf} \left(\bar{c}, \frac{k \cdot e^{\alpha t_{lig}}}{b} \right) = c_{lig} + \varphi_{lig} \cdot e^{r T_{lig}} + z \cdot cc_{lig} \\ \int_0^{T_{lig}} (k \cdot e^{\alpha t_{cha}} \cdot e^{\alpha t} - b \cdot c_{lig} - b \cdot \varphi_{lig} \cdot e^{rt} - b \cdot z \cdot cc_{lig}) dt = S_{lig} \end{array} \right. \quad (0.6)$$

Quant aux carburants, les trajectoires vérifient :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{k_{car} \cdot e^{\alpha_{car} T_{car}}}{b_{car}} = c_{car} + \varphi_{car} \cdot e^{r T_{car}} + z \cdot cc_{car} \\ \int_0^{T_{car}} (k_{car} \cdot e^{\alpha_{car} t} - b_{car} \cdot c_{car} - b_{car} \cdot \varphi_{car} \cdot e^{rt} - b_{car} \cdot z \cdot cc_{car}) dt = S_{car} \end{array} \right. \quad (0.7)$$

2.2.2. Résultats donnés par la maquette pour une taxe de 40 \$/tC

L'avantage de la maquette est qu'elle rend possible de nombreuses simulations pour détailler l'effet du taux de la taxe sur le carbone. Grâce à cela, il devient possible de comparer les scénarios obtenus pour en déduire soit le taux de taxe qui permet d'allonger au maximum les durées d'exploitation en conservant les trois combustibles soit le taux de taxe qui aboutit à laisser la lignite stockée, voire même le charbon, combustibles très polluants. Les résultats seront donnés en fonction du taux de taxe.

Pour $z = 40$ \$/tC, le système des prix se trouve modifié, et il va en résulter des changements au niveau du rythme d'exploitation et de la rente, donc tous les résultats sont modifiés. Pour la présentation de cet exemple, on ne rappellera pas les graphiques du scénario de référence car il suffit de s'y reporter ci-dessus, mais on se focalisera sur les différences par rapport à celui-ci.

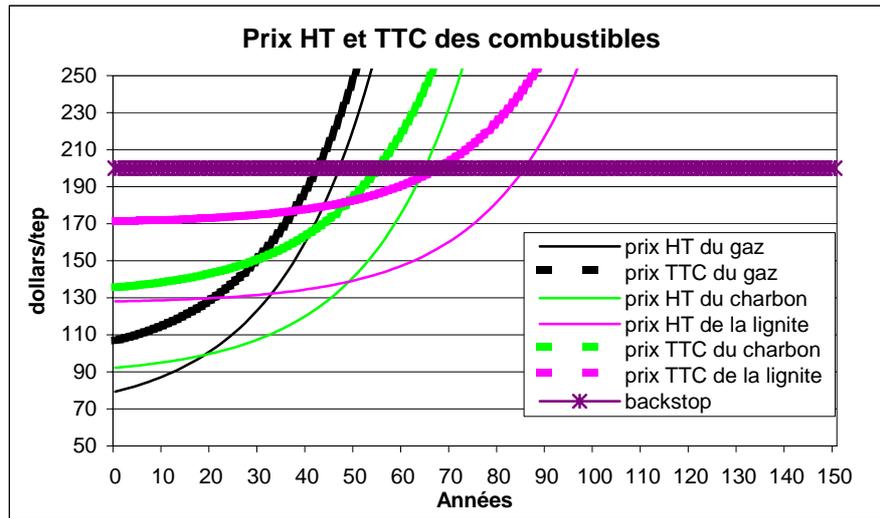


Figure 10 : Evolution des prix HT et TTC dans le scénario où $z = 40\$/tC$

L'introduction de la taxe de 40 \$/tC est suffisamment conséquente pour modifier de 25 à 40 \$ - suivant le combustible - le rapport entre les prix HT (en trait fin) et les prix TTC (en trait gras). Mais elle n'influe pas sur l'ordre des coûts croissants, et les combustibles seront exploités dans le même ordre : le gaz et le pétrole lourd, puis le charbon et enfin la lignite.

On peut noter que les prix obtenus ne reflètent plus exactement les conditions initiales car le prix TTC du gaz naturel apparaît ici supérieur à 100. En effet, la taxe modifie les prix dès l'origine. Dans le tableau ci-dessous, on peut observer les changements de tous les prix exprimés en \$/tep, à la date $t = 0$. Pour chaque combustible, le prix HT (dans le scénario avec taxe) diminue légèrement par rapport à la référence, et le prix TTC augmente. La valeur de la rente subit aussi des modifications : elle baisse pour tous les combustibles mais à des amplitudes différentes :

- 14,7 % pour le gaz naturel,
- 46,6 % pour le charbon,
- 69,2 % pour la lignite,
- 13,4 % pour les carburants.

Les propriétaires de la lignite et du charbon subissent des baisses de rente beaucoup plus importantes que les autres. L'effet de la taxe n'est donc pas homogène, il varie en fonction du type de combustible, c'est-à-dire en fonction du contenu de carbone et de la date t à laquelle ce combustible est exploité.

Combustible	Z = \$0/tC			Z = \$40/tC			
	Prix HT = Prix TTC (\$/tep)	Rente (\$/tep)	Durée d'exploitation (ans)	Prix HT (\$/tep)	Prix TTC (\$/tep)	Rente (\$/tep)	Durée d'exploitation (ans)
Gaz	81,5	15,175	22,9	79,26	106,86	12,938	29,6
Charbon	96,16	8,348	18,2	92,27	135,62	4,453	19,1
Lignite	130,35	3,333	20,6	128,04	171,01	1,023	18,6
Carburant	205,68	113,723	44,8	190,41	224,01	98,456	46,6

Il est particulièrement intéressant de comparer les différences de durées d'exploitation, car un des objectifs de la taxation est justement d'allonger ces durées. Dans l'ensemble, la durée d'exploitation augmente suite à l'introduction de la taxe : au total, elle passe de 61,72 ans dans le scénario de

référence à 67,3 ans dans le cas présent, soit 9 % d'augmentation. Cependant la durée d'exploitation de la lignite diminue de 2 ans. Cela s'explique par le fait que le coût d'exploitation de la lignite est devenu encore plus proche de celui de l'énergie alternative non fossile, et qu'il devient optimal d'écouler très rapidement toutes les réserves de ce combustible avant d'utiliser ce substitut.

On observe que la courbe de demande industrie-résidentiel croît plus rapidement que dans le scénario de référence, et atteint un maximum de 20 000 Mtep au lieu de 17 000. Cela se justifie par la croissance exponentielle de la demande ; or comme la durée d'exploitation totale s'allonge, la demande est plus élevée après 67,3 années qu'après 61,72 années. En raison du prix plus élevé de départ, la consommation en $t = 0$ est inférieure à celle des conditions initiales (Annexe 1). Cependant l'évolution des deux courbes de demande est identique à celle de référence, il n'y a que des décalages de niveau ou de durée pour faire la différence.

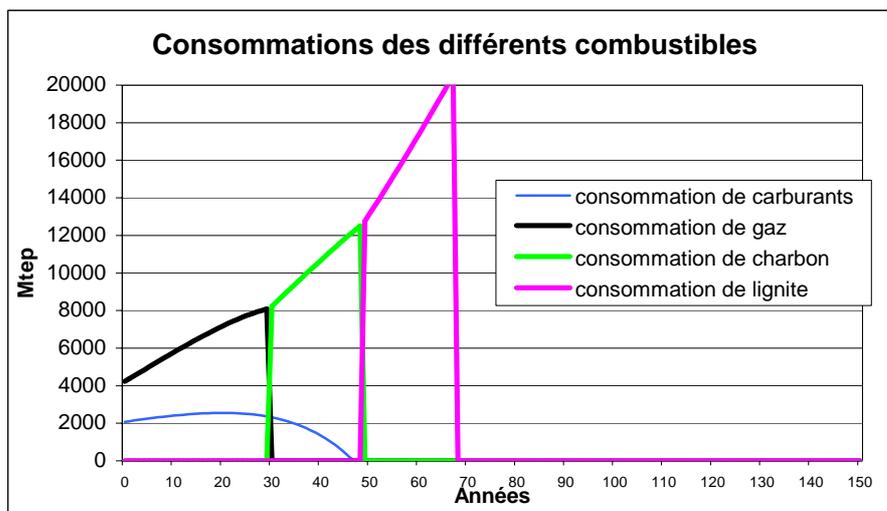


Figure 11 : Evolution de la demande autre et de carburant dans le scénario avec taxe ($z = 40$ \$/tC)

Il n'est pas nécessaire de regarder l'évolution des stocks ou des émissions de carbone, car les niveaux – respectivement, les réserves totales de chaque combustible et les émissions rejetées par la totalité de ces stocks – sont identiques. La différence se situe uniquement sur les dates auxquelles les maxima sont atteints. Certes, l'objectif de la taxation est de retarder la combustion des énergies fossiles, mais elle ne l'empêche pas de se produire. Il sera plus intéressant de regarder ces éléments dans le cas où la lignite n'est pas exploitée par exemple, réduisant alors le total des émissions du montant de celles produites par ce combustible.

Économiquement, on peut mesurer l'impact de la taxe à travers les modifications dans le partage de la rente entre l'État et les propriétaires des ressources. L'augmentation des recettes de l'État est immédiate, et intuitive : le montant de taxes varie en fonction de la consommation et du type de carburant consommé. Or d'après le graphique précédent, la demande industrie-résidentiel augmente de manière presque exponentielle tandis que la demande carburant augmente puis décroît. De plus, les combustibles substituables sont utilisés dans l'ordre croissant de pollution aussi bien que de coût, donc les émissions de carbone sont à la hausse, ce qui fait croître les recettes de l'État. Il y a une très forte augmentation enregistrée aux alentours de 30 ans, ce qui correspond au passage d'un combustible « propre » (gaz et pétrole lourd) à un combustible « sale » (charbon). Par contre le passage du charbon à la lignite se fait de manière plus continue, et ensuite la croissance de la taxe

est forte. A priori, on ne perçoit pas d'impact significatif sur les recettes de la présence ou de l'absence d'exploitation du carburant, car son abandon se fait avec une demande décroissante.

Les variations de profit des propriétaires sont plus difficiles à interpréter. Il faut interpréter le graphique en décomposant par périodes, puisque chacune correspond à des propriétaires différents (concurrence pure et parfaite).

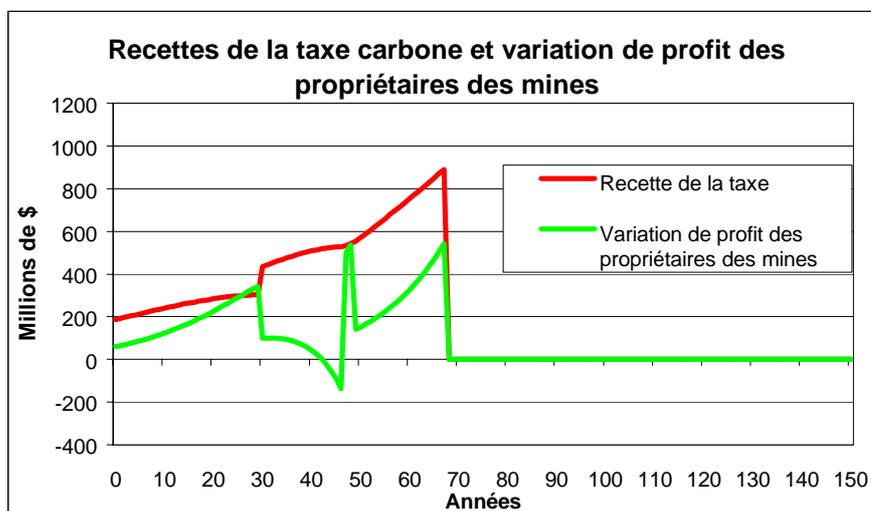


Figure 12 : Recettes de l'Etat provenant de la taxe carbone et variation de profit des propriétaires

La difficulté d'interprétation vient du cumul de l'effet prix et de l'effet volume. Sur les 30 premières années, le profit des propriétaires de carburant, de gaz naturel et de pétrole lourd est à la hausse, jusqu'à atteindre voire dépasser les recettes de l'État. Puis l'exploitation de gaz s'arrête. Sur la vingtaine d'années suivantes, on observe une chute du profit jusqu'à atteindre une variation de profit négative. Puis, il y a un saut qui correspond à l'intervalle pendant lequel les stocks de carburants sont épuisés, mais le charbon est toujours exploité. On peut en déduire que ce sont les propriétaires des ressources produisant les carburants qui ont subi une baisse de leur rente. Enfin, les propriétaires de la lignite bénéficient d'une augmentation de leur profit, parallèlement à l'augmentation des recettes publiques. L'impact de la taxe est donc plus complexe que l'intuition le laisserait croire, et la situation des propriétaires d'un combustible peut être améliorée ou dégradée.

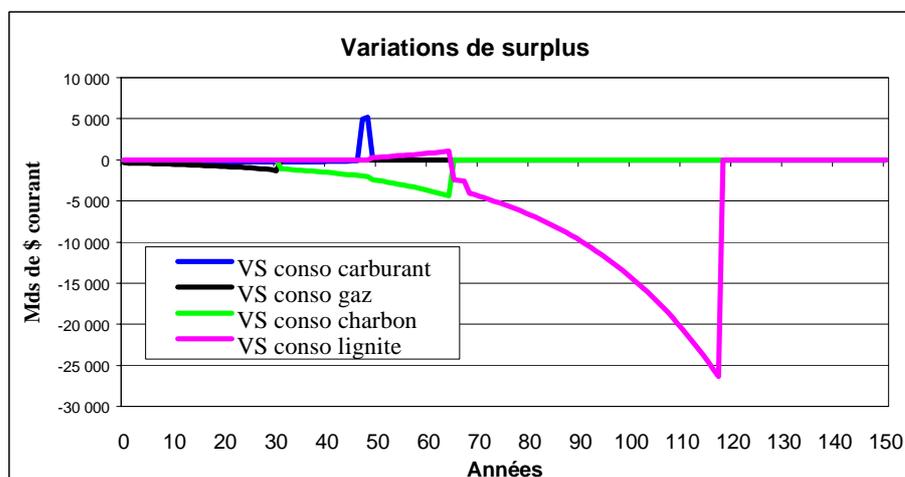


Figure 13 : Variation de surplus des consommateurs en fonction des différents combustibles, après taxation

Il est encore plus délicat d'interpréter les variations de surplus des consommateurs. Cette variation résulte de la baisse de consommation engendrée par la hausse des prix, sachant que certains consommateurs ne peuvent plus avoir accès à la ressource et que d'autres réduisent leur consommation. Mais face au problème de l'absence de substituts, pour le carburant surtout, la demande est captive et les consommateurs doivent reporter cette hausse des dépenses sur d'autres biens de consommation.

2.2.3. Résultats pour une taxe sur le carbone dont le taux varie

Après avoir décrit un cas particulier de taxation, il est intéressant de comparer différents scénarios obtenus en faisant varier le taux de la taxe z . Rappelons que l'objectif de la taxation en tant que politique environnementale est de retarder l'échéance de fin des énergies fossiles, non pas pour prolonger le système économique actuel basé sur leur consommation, mais pour préserver l'atmosphère d'un rejet de carbone trop rapide et massif.

a) Les durées d'exploitation

Les durées d'exploitation sont les premiers résultats affectés par une modification du taux de taxe z , but recherché par la politique fiscale. Cependant les combustibles fossiles ne réagissent pas de manière identique. On remarquera que la durée totale d'exploitation est croissante en fonction de z , mais que l'écart de période d'exploitation entre deux taux de taxe bien différents est toutefois faible : si l'on réutilise l'exemple précédent de $z = 40$ \$/tC, on a une durée maximale de 67,3 ans ; on peut la comparer avec la durée obtenue si $z = 60$ \$/tC : 70,13 ans, ce qui fait à peine trois ans d'écart. On remarque que T_{car} croît légèrement, tout en restant dans le même ordre de grandeur de 45-50 ans. T_{gaz} croît aussi mais plus fortement : on passe de 23 à 45 ans environ, ce qui revient à doubler la durée. Par contre, T_{cha} et T_{lig} ont tendance à stagner, voire à baisser, jusqu'à atteindre le seuil où le combustible ne sera plus exploité.

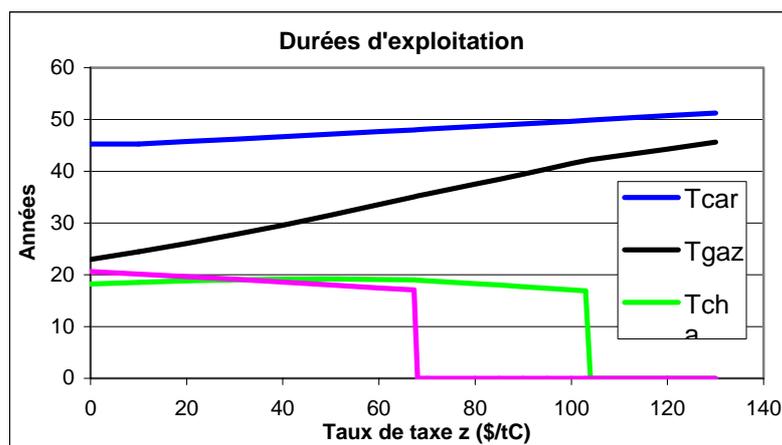


Figure 14 : Evolution des durées d'exploitation des différents combustibles en fonction de z

Dans le cas de la lignite, le seuil se situe au niveau de $z = 67,35$ \$/tC. A ce niveau de taxe, l'exploitation de la lignite devient non rentable. En effet, on vérifie que : $\bar{c} < c_{lig} + z \cdot c_{lig}$. La lignite restera stockée car il est économiquement préférable d'avoir directement recours à l'énergie alternative non fossile. Si on augmente suffisamment le taux de taxe, on peut obtenir la même chose

avec le charbon : si $z = 103,522$ \$/tC, alors le charbon reste stocké et l'énergie substitut est utilisée très rapidement. La hausse significative des taxes permet donc d'éviter d'exploiter les combustibles les plus riches en carbone.

Finalement, la taxe sur le carbone allonge véritablement la durée d'exploitation T_{gaz} , et avec moins d'ampleur T_{car} ; l'impact sur les autres combustibles est différent : la taxe n'a d'effet qu'à partir du moment où elle atteint le seuil qui exclut de l'exploitation le combustible concerné (la lignite et le charbon) .

b) L'évolution de la rente

La rente d'exploitation de tout combustible a tendance à diminuer lorsque le taux de la taxe sur le carbone augmente. Cela est particulièrement visible dans le cas des carburants dont la rente passe de 113 \$/tep à 80 \$/tep, ce qui représente une baisse de 30 % environ. Il y a cependant des niveaux de rente bien différents entre les carburants et les autres combustibles, la rente de ces derniers étant beaucoup plus faible. Pour le gaz, on observe une baisse de rente de 70 %. La rente des deux combustibles charbonneux présente la particularité d'être très faible et de s'annuler lorsque le seuil de fin d'exploitation est atteint, résultat prévisible de notre modèle.

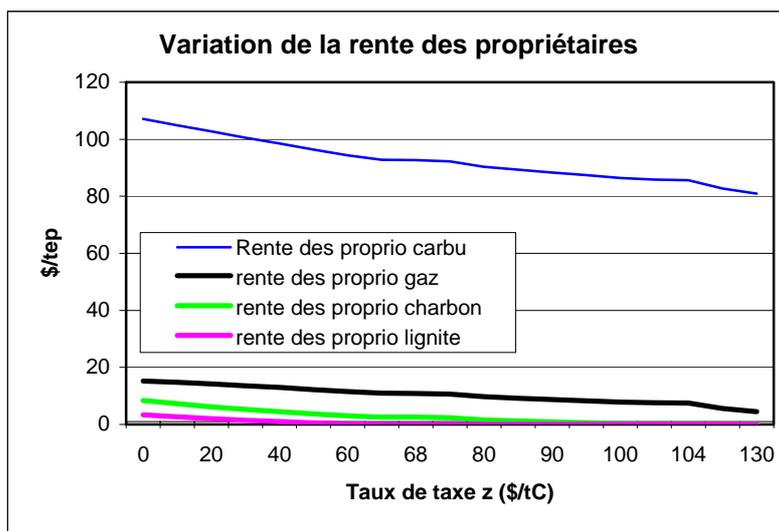


Figure 15 : Variation de la rente des propriétaires des différents combustibles en fonction de z

c) Les émissions de carbone

On observe sur le graphique que l'unique moyen pour faire baisser le niveau d'émissions de carbone est de laisser stockées des ressources fossiles. En passant le premier seuil qui exclut la lignite, on réduit les émissions totales de 750 GtC à 410 GtC environ. On peut remarquer que le niveau d'émissions change instantanément : on laisse tout ou rien stocké, mais pas seulement une partie des ressources. Le même phénomène se constate pour le second seuil où le charbon reste également stocké.

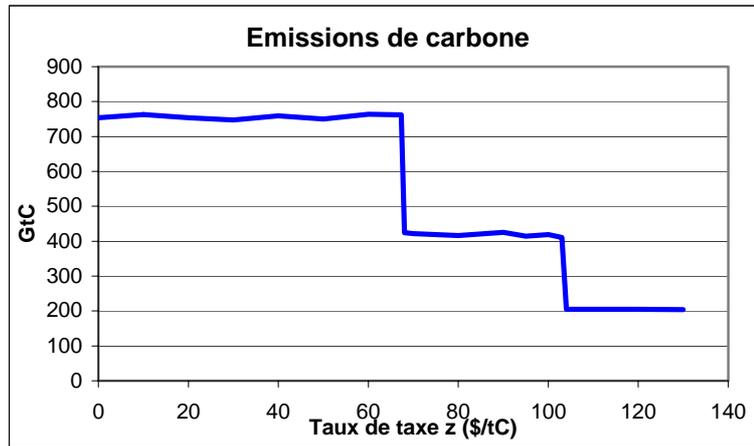


Figure 16 : Evolution des émissions de carbone en fonction du taux z

d) Les impacts économiques

Economiquement, l'introduction d'une taxe a pour effet attendu d'augmenter les recettes de l'État, de diminuer le surplus des consommateurs et de modifier la répartition de la rente entre les propriétaires et l'État. Les graphiques ci-dessous illustrent ces évolutions.

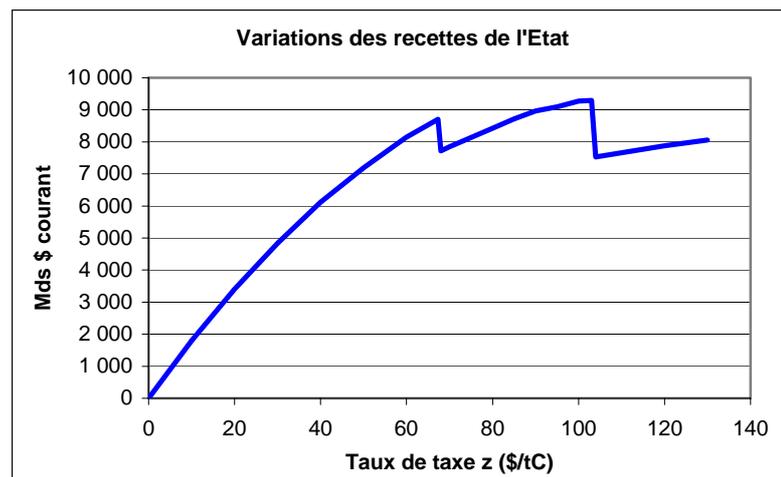


Figure 17 : Variation des recettes de l'État en fonction du taux de taxe z

Les recettes de l'État croissent très rapidement, car elles dépendent à la fois du niveau de consommation et du type de combustible utilisé. On a vu que la consommation est en croissance quasi exponentielle ; or les combustibles sont exploités en ordre croissant de contenu en carbone – d'où une plus grande pollution. Après le premier seuil, la baisse de revenus consécutive à la décision de ne pas exploiter la lignite est rapidement compensée par l'augmentation de z. Par contre, ce n'est pas le cas lors du second seuil, car les deux combustibles les plus polluants restent en terre ; mais le niveau des recettes reste élevé. L'État est le principal bénéficiaire de l'instauration de la taxe.

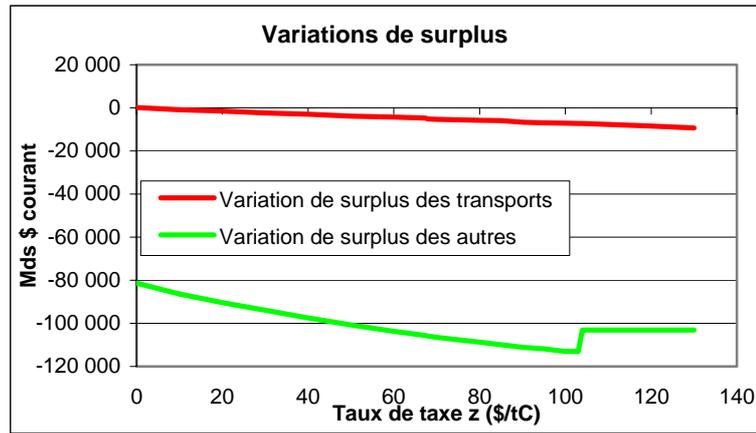


Figure 18 : Variation de surplus des consommateurs par secteur en fonction du taux z

Le surplus des consommateurs a une tendance à la baisse, avec une variation de plus en plus négative. Les deux secteurs ne subissent pas les mêmes impacts : pour les transports, la baisse est plutôt faible, avec pour maximum $-10\ 000$ G\$; par contre, le secteur de l'industrie et du résidentiel subit une très forte baisse allant de $-80\ 000$ à $-110\ 000$ G\$. Il existe donc une inégalité entre les consommateurs, sans doute parce que les carburants ne sont finalement pas très polluants par rapport au charbon et à la lignite, et les quantités consommées ne sont pas les mêmes. Toutefois, dans la réalité, le système fiscal national tend à imposer plus fortement les transports que les autres secteurs. Ce graphique prouve que les transports peuvent supporter de forts taux de taxe sans trop grande perte de surplus. Une taxation différentielle (partie III) peut être un optimum de second rang, sachant la difficulté à imposer l'industrie par exemple.

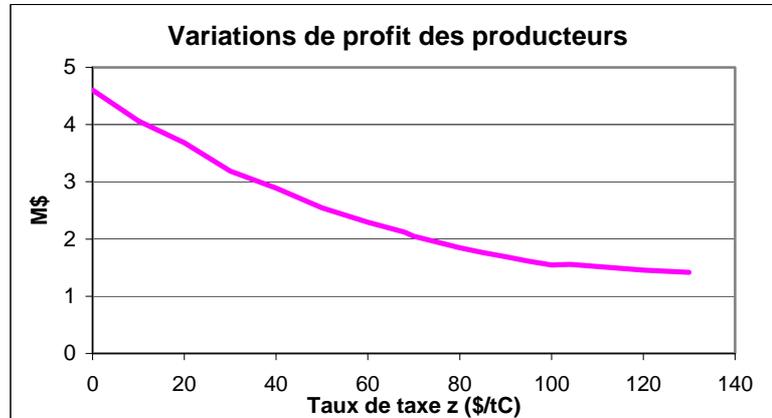


Figure 19 : Variation totale de profit des producteurs en fonction du taux z

Lorsque l'on cumule les profits de tous les propriétaires des différentes ressources, on peut observer les variations totales dues à la taxe sur le carbone. Cette taxe a pour effet de modifier le partage de la rente en faveur de l'État. Le profit augmente toujours, puisque la variation reste positive, allant de 4,5 M\$ à 1,5 M\$. Les producteurs sont gagnants à l'introduction d'une taxe ; les seuls perdants sont les consommateurs. Cependant leur gain diminue au fur et à mesure que la taxe augmente. Il n'y a pas de rupture visible lors des deux seuils décrits précédemment.

D'après les résultats obtenus par la maquette, il semble que si l'on veut véritablement réduire les émissions de carbone, il faut réaliser un effort considérable en créant une taxe mondiale au taux : $z =$

67,35 \$/tC. Si on se contente d'un taux plus faible, les durées d'exploitation seront allongées, mais l'échéance se situera approximativement à la même époque.

Il est peu réaliste de simuler un même taux de taxe à la fois à tous les secteurs d'une économie, et à tous les pays sans tenir compte de leur niveau de développement. Les résultats présentés ici ont pour finalité d'obliger les acteurs à prendre conscience de l'imminence et de l'ampleur du problème et à se responsabiliser. Il serait utile de prolonger ce travail en créant de nouveaux scénarios qui prennent en compte les différents secteurs de l'économie (avec plusieurs fonctions de demande) et les différents niveaux de développement dans le monde (pays de l'Annexe B du protocole de Kyoto, enclins à faire des efforts de diminution des émissions de carbone, et autres).

III. Prolongements possibles

3.1. Une taxation différenciée par secteur économique

Il est peut-être moins efficace économiquement mais plus réaliste politiquement de distinguer les taxes pour les deux secteurs étudiés. En effet, le secteur des transports supporte de plus fortes taxes à la consommation que l'industrie par exemple. Pour le modéliser, il suffit d'introduire un nouveau paramètre : $z_{car} \neq z$. Les équations pour les autres secteurs restent inchangées ; par contre, il est nécessaire de modifier le système décrivant les trajectoires d'exploitation et de prix des carburants :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{k_{car} \cdot e^{\alpha_{car} T_{car}}}{b_{car}} = c_{car} + \varphi_{car} \cdot e^{r T_{car}} + z_{car} \cdot c c_{car} \\ \int_0^{T_{car}} (k_{car} \cdot e^{\alpha_{car} t} - b_{car} \cdot c_{car} - b_{car} \cdot \varphi_{car} \cdot e^{rt} - b_{car} \cdot z_{car} \cdot c c_{car}) dt = S_{car} \end{array} \right. \quad (0.8)$$

Comme la résolution des deux secteurs se fait de manière totalement indépendante, il n'y a pas de répercussion de cette modification sur les autres systèmes, et cela est aisément solvable.

3.2. Une taxe croissante $z \rightarrow z \cdot e^{\tau t}$

On peut considérer que la taxe sur le contenu en carbone des combustibles fossiles croisse en fonction de la prise de conscience des dégâts environnementaux et de sa traduction politique, c'est-à-dire en fonction du temps. Il faut introduire un taux τ de croissance de la taxe applicable aux deux secteurs. Les systèmes d'équations deviennent :

$$\left\{ \begin{array}{l} c_{i+1} + \varphi_{i+1} + z \cdot c c_{i+1} \cdot e^{\tau t_i} = c_i + \varphi_i \cdot e^{r T_i} + z \cdot c c_i \cdot e^{\tau t_i} \\ \int_0^{T_i} (k \cdot e^{\alpha_{i-1} t} \cdot e^{\alpha t} - b \cdot c_i - b \cdot \varphi_i \cdot e^{rt} - b \cdot z \cdot c c_i \cdot e^{\tau t_{i-1}} \cdot e^{\tau t}) dt = S_i \end{array} \right. \quad (0.9)$$

avec $t_i = T_i + t_{i-1}$. Dans le cas de la lignite, cela devient :

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Inf}(\bar{c}, \frac{a + k.e^{\alpha t_{lig}}}{b} = c_{lig} + \varphi_{lig} \cdot e^{rT_{lig}} + z \cdot cc_{lig} \cdot e^{\tau t_{lig}} \\ \int_0^{T_{lig}} (k \cdot e^{\alpha t_{cha}} \cdot e^{\alpha t} - b \cdot c_{lig} - b \cdot \varphi_{lig} \cdot e^{rt} - b \cdot z \cdot cc_{lig} \cdot e^{\tau t_{cha}} \cdot e^{\tau t}) dt = S_{lig} \end{array} \right. \quad (0.10)$$

Et pour le carburant :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{k_{car} \cdot e^{\alpha_{car} T_{car}}}{b_{car}} = c_{car} + \varphi_{car} \cdot e^{rT_{car}} + z_{car} \cdot cc_{car} \cdot e^{\tau T_{car}} \\ \int_0^{T_{car}} (k_{car} \cdot e^{\alpha_{car} t} - b_{car} \cdot c_{car} - b_{car} \cdot \varphi_{car} \cdot e^{rt} - b_{car} \cdot z_{car} \cdot cc_{car} \cdot e^{\tau t}) dt = S_{car} \end{array} \right. \quad (0.11)$$

3.3. Une politique différenciée : pays industrialisés et le reste du monde

La modélisation d'une politique différenciée selon les zones géographiques s'apparente au prolongement avec diversification de la demande. Si on admet qu'un certain pourcentage de consommation est localisé dans les pays industrialisés (par exemple 68,76 % de la consommation des carburants), les deux zones sont interdépendantes et la résolution n'est pas simple. De plus, les évolutions de croissance économique et de population sont loin d'être identiques. Il faudrait construire deux maquettes avec des conditions initiales et des données exogènes différentes, tout en les faisant interagir dans l'exploitation des combustibles fossiles. Si une zone consomme beaucoup, elle va utiliser tout le stock d'un combustible sans souci d'être équitable et de partager avec l'autre zone. De plus, les efforts importants de réduction des émissions de carbone dans une zone sont la condition sine qua non pour que l'autre zone puisse se développer sans être limitée par des politiques environnementales.

3.4. Une demande reflétant la réalité du « mix énergétique »

Pour approcher réellement de la réalité, il faudrait être capable de ne pas recourir à l'hypothèse de substituabilité totale des combustibles. En effet, il existe des besoins qui ne s'expriment que sous forme d'un seul type de combustible, par exemple l'acier a besoin de charbon. De plus, la demande n'est pas unique dans le secteur de l'industrie et du tertiaire-résidentiel : elle est en partie contrainte par des processus de transformation ou par certaines technologies, et en partie indifférente au type de combustible utilisé pourvu qu'il fournisse la quantité d'énergie nécessaire. D'où la nécessité de diversifier la demande selon le type de combustible dont elle a besoin. On peut alors refléter la situation actuelle où tous les combustibles fossiles sont utilisés à des proportions diverses, où le backstop nucléaire est déjà employé dans certains secteurs comme celui de la production d'électricité, et où la substitution entre différents combustibles est possible mais seulement pour certaines utilisations. Le modèle devient très complexe, puisqu'il intègre plusieurs fonctions de demande, avec ou sans backstop.

Conclusion

Le problème de l'effet de serre oblige à renouveler le regard porté sur l'économie des ressources épuisables. Il ne s'agit plus d'une science de la rareté spécialisée dans les énergies fossiles, mais une science qui tente de préserver l'environnement sans lequel les activités humaines ne pourraient exister. L'objectif n'est plus de retarder l'échéance de fin d'exploitation des combustibles fossiles, mais d'essayer de diminuer les émissions de carbone pour empêcher une modification grave du climat.

Pour contrecarrer l'argumentaire des optimistes, le modèle de Hotelling a été utilisé. On admet donc un cadre optimal, l'existence d'une énergie non fossile comme solution alternative pour l'avenir, et surtout on considère que l'augmentation des prix a pour effet de forcer la demande à diminuer. Or la demande est plutôt en croissance, à cause des besoins des pays en développement et de l'augmentation de la population mondiale. Les perspectives semblent être très éloignées d'un scénario idéal où la demande diminuerait mécaniquement par l'effet prix, sans intervention politique.

Face à l'imminence du problème, il s'agit de trouver rapidement un instrument capable de réduire la consommation des agents : une taxe uniforme pourrait remplir ce rôle. Un niveau de taxe intéressant forcerait les agents à prendre la décision de laisser volontairement stocké tout ou partie de certaines ressources fossiles. Mais les résultats de la maquette donnent raison aux pessimistes : pour avoir un véritable impact sur les émissions de carbone, le niveau de taxe nécessaire devrait atteindre 67,35 \$/tC. Si on se réfère aux négociations internationales de Kyoto comme indicateur de ce qui est politiquement réalisable à l'échelle mondiale, imposer une taxe si élevée relève de la pure utopie.

En raison des différences économiques internationales, il n'est pas envisageable de demander à tout pays – quel que soit son niveau de développement – le même niveau d'effort. Au lieu d'une taxe mondiale uniforme, des taxes différentes par zones géographiques pourraient être envisagées.

BIBLIOGRAPHIE

BABUSIAUX Denis, 2000, « Économie de l'énergie », Institut Français du Pétrole, École d'été de physique.

http://sfp.in2p3.fr/Debat/debat_energie/E2PHY/babusiaux.pdf

BABUSIAUX Denis, FAVENNEC Jean-Pierre, RECH Olivier, 2000, « Offre et demande de pétrole et de gaz à moyen et long terme ; problématique des prix », Revue Géologues n°127.

M. de BARBEYRAC and M. CASTELLUCCI, 1999, « Directory of the most important community legislative measures in energy policy », working paper, Directorate General for Research, European Parliament, May.

http://www.europarl.eu.int/workingpapers/ener/pdf/100_en.pdf

BP Statistical Review of World Energy, 2003, June.

http://www.bp.com/files/16/bp_stats_history_1611.xls (consulté en juillet-août 2003)

BUREAU Dominique, « Lutte contre le changement climatique et rente pétrolière : quelques rappels », note interne D4E.

BUREAU Dominique, HENRY Claude, PICARD Pierre, 2000, **Développement durable**, cours de Majeure d'Eco-Sciences à l'École polytechnique.

CHAKRAVORTY Ujjayant, MAGNE Bertrand, MOREAUX Michel, 2003, « Plafond de concentration atmosphérique en carbone et substitutions entre ressources énergétiques ».

J-M CHARPIN et D. MAILLARD, 2002, Prospective énergétique mondiale à l'horizon 2030, 8^{ème} session du 6 novembre.

http://www.industrie.gouv.fr/energie/conf/synconf_6novembre2002.htm#1

D4E, Rapport à la Commission des comptes et de l'économie de l'environnement : **Energie et environnement**, 2003

D4E, **Maîtrise de l'Energie et Environnement**, 2003

D4E, **Production électrique et Environnement**, 2003

GIRAUD Pierre-Noël, cours d'Economie industrielle des commodités

<http://www.cerna.ensmp.fr/Enseignement/PNG-Dauphine.pdf> (consulté en juillet 2003)

GREENSPAN Alan, 2003, « Natural gas supply and demand issues », testimony of Chairman Greenspan, Before the Committee on Energy and Commerce, U.S. House of Representatives, June 10.

<http://www.federalreserve.gov/BoardDocs/testimony/2003/20030610/default.htm>

GUESNERIE Roger, 2003, **Kyoto et l'économie de l'effet de serre**, Rapport du Conseil d'Analyse Economique, La Documentation Française.

IFP (Institut Français du Pétrole), Rapport annuel 2002

JANCOVICI Jean-Marc, 2003, « Qu'est-ce qu'une réserve de pétrole ? En avons-nous pour longtemps », mars.

<http://www.manicore.com/documentation/reserve.html>

JANCOVICI Jean-Marc, 2001, "Combien coûte l'énergie?", juillet.

http://www.manicore.com/documentation/cout_energie.html

LAHERRERE Jean, 2003, "Hydrocarbons resources: Forecast of oil and gas supply to 2050", Petrotech, New Delhi, 9 janvier.

<http://www.hubbertpeak.com/laherrere/Petrotech090103.pdf>

LAHERRERE Jean, 2003, "Modelling future oil production, population and the economy", ASPO Workshop in Paris, May. (à partir de page 33)

<http://www.hubbertpeak.com/laherrere/aspoParis.pdf>

LANDRIEU Guy, 1994, "Les impacts des énergies fossiles sur l'environnement", Les Entretiens de la Villette 5, L'énergie : un concept, des usages, des enjeux, Paris, 29 mars-1er avril.

http://isnwww.in2p3.fr/reacteurs-hybrides/Dautreppe/Landrieu/Landrieu_texte1.htm

Les chiffres clés de l'énergie, 2000, coll. Référence, édition 1999-2000, Direction générale de l'Energie et des Matières Premières, Observatoire de l'Energie.

MAGNE Bertrand, MOREAUX Michel, 2002, « Long Run Energy Trajectories : Assessing The Nuclear Option In Response To Global Warming », revised version.

MAURICE Joël, 2001, **Prix du pétrole**, Rapport du Conseil d'Analyse Economique, La Documentation Française.

PERMAN Roger, et al., 1999, Natural Resource & Environmental Economics, 2nd edition.

SCHRAMM Christophe, 2003, « La libéralisation, Kyoto et la sortie du nucléaire : quel avenir pour le marché allemand de l'électricité ? », mémoire de maîtrise, avec pour directeur Joël Maurice, Magistère d'économie, Université Paris 1, juin.

UNESCO, 1999, The Kyoto Protocol to the Convention on Climate Change, UNEP's Information Unit for Conventions, October.

"The coming global oil crisis"

<http://www.oilcrisis.com> (consulté en juillet 2003)

Annexe 1. Description des données utilisées

Source BP Stat 2003

1. Pétrole

2002	Mtep	%
Stock connu	142 700	
Production	3556,8	
Consommation	3552,5	
Consommation de carburants ¹⁰	2442,4	67,8
Autres consommations	1161,3	32,2

D'où $Scar = 96\,750,6$ Mtep

$Dcar = 2442$ Mtep

Prix déterminé par le marché pétrolier : spot crude prices en 2002

Source : Platts in BP	US \$ par baril	Conversion en \$ par tep
Dubai	23,85	
Brent	25,19	184.677
Nigerian Forcados	25,04	
West Texas Intermediate	26,16	

D'où $Pcar = 184,677$ \$/tep

Calcul des paramètres de la demande de carburant :

On peut supposer que l'élasticité prix ε est relativement faible, car il n'y a pas de substitution possible aux carburants pour le moment et les besoins de transport sont en croissance : $\varepsilon = 0.7$. On peut alors en déduire la pente de la courbe de demande b , qui est liée à l'élasticité de la manière suivante :

$$D(t) = a(t) - b \cdot p(t)$$

$$\Rightarrow \frac{\partial D(t)}{\partial p(t)} = -b$$

$$\Rightarrow -\frac{p(t)}{D(t)} \cdot \frac{\partial D(t)}{\partial p(t)} = +b \cdot \frac{p(t)}{D(t)}$$

$$\text{Alors } b = \varepsilon \cdot \frac{D(t)}{p(t)}$$

On a en particulier pour la condition initiale de 2002 ($t = 0$) :

$$b = \varepsilon \cdot \frac{D(0)}{p(0)}$$

Ceci est valable pour tous les cas de demande. Pour les carburants :

$$b_{car} = 0.7 \cdot 2\,442,4 \cdot 10^6 / 184,677$$

$$= 9,257676 \cdot 10^6 \text{ tep}/\$$$

¹⁰ Gasolines : aviation and motor gasolines and light distillate feedstock (LDF)
Middle distillates : jet and heating kerosines, and gas and diesel oils (including marine bunkers)

On en déduit aisément le paramètre k_{car} d'après la formule de la demande, à la date $t = 0$:

$$k_{car} = D_{car} + b_{car} * P_{car} \\ = 4,152079^E + 9 \text{ tep}$$

2. Gaz naturel

2002	Mtep	Milliard de mètres cube
Stock connu	140 202	155,78
Production	2274,7	
Consommation	2282	

D'où $S_{gaz} = 186\ 151,4 \text{ Mtep}$

Prix du gaz naturel variable selon les coûts de transport :

2002	US \$ par million de Btu	\$ / tep
Gaz naturel liquide		
- Japon (CAV ¹¹)	4,27	
- Union Européenne (CAV)	3,47	
Gaz naturel		
- GB (source : Heren NBP Index)	2,58	
- Etats-Unis (Henry Hub)	3,33	83,25
- Canada (Alberta)	2,57	

3. Charbon

2002	M tonnes	Mtep
Stock connu	984 453	508 000
- anthracite et bitumineux	519 062	200 000
- sous-bitumineux et lignite	465 391	308 000
Production	4832,7	2379,4
Consommation		2397,9

D'où $S_{cha} = 200\ 000 \text{ Mtep}$
 $S_{lig} = 308\ 000 \text{ Mtep}$

Prix variant en fonction du gisement et de l'utilisation :

2002	US \$ par tonne	US \$ par tep
Marker price (nord de l'Europe)	31,65	51,1308
US centrales à fioul	27,46	
Prix japonais (CAV)		
- coking coal	41,91	
- steam coal	37,04	

¹¹ CAV : coût + assurance + voyage

Calcul des paramètres de la demande autre:

En 2002, on peut additionner des volumes actuels de consommation (n'incluant pas les carburants) homogénéisés en tep :

$$\begin{aligned} \text{Dautres} &= D_{\text{gaz}} (\text{dont pétrole}) + D_{\text{charbon}} (\text{dont lignite}) \\ &= (1161,3^{E+6} + 2282^{E+6}) + 2397,9^{E+6} \\ &= 5\,841,2 \text{ Mtep} \end{aligned}$$

Pour les prix, on construit un barycentre en fonction des volumes et des prix de chaque combustible utilisé par les autres secteurs :

$$\begin{aligned} \text{Pautres} &= (214\,465,4 + 189\,976,5 + 122\,606,68) / 5\,841,2 \\ &= 90,2295 \text{ \$ / tep} \end{aligned}$$

On considère que le paramètre b est lié à une élasticité prix assez forte à long terme (aux alentours de 1,5). En utilisant la même formule que précédemment, on en déduit la valeur de b en fonction de la demande et du prix actuels :

$$\begin{aligned} b &= 0.7 * 5\,841,2^{E+6} / 90,2295 \\ &= 9,71057^{E+7} \text{ tep/\$} \end{aligned}$$

Comme la fonction de demande est de la forme : $D(t) = k.e^{at} - b.p(t)$, on peut calculer le paramètre k , puisque $t = 0$ en 2002 :

$$\begin{aligned} k &= 5\,841,2^{E+6} + 9,71057^{E+7} * 90,2295 \\ &= 1,460299^{E+10} \text{ tep} \end{aligned}$$

Consommation de pétrole par pays (Annexe B)

POUR INFORMATION

Source : BP Stat 2003

Pays de l'Annexe B	milliers de barils / jour		milliers de tep / an	
	2001	2002	2001	2002
Allemagne	131,6	127,2	6487,88	6334,56
Australie	28,1	38	1385,33	1892,4
Autriche	12,8	13	631,04	647,4
Belgique + Luxembourg	32,2	32,9	1587,46	1638,42
Bulgarie	4	4,2	197,2	209,16
Canada	88,7	89,7	4372,91	4467,06
Croatie	0	0	0	0
République tchèque	8,3	8,2	409,19	408,36
Danemark	9,8	9,8	483,14	488,04
Espagne	72,7	73,5	3584,11	3660,3
Estonie	0	0	0	0
Fédération Russe	122,3	122,9	6029,39	6120,42
Finlande	10,5	10,9	517,65	542,82
France	95,5	92,8	4708,15	4621,44
Grèce	21,7	21,8	1069,81	1085,64
Hongrie	6,7	6,4	330,31	318,72
Islande	0,9	0,9	44,37	44,82
Irlande	9	8,7	443,7	433,26
Italie	92,8	92,9	4575,04	4626,42
Japon	247,5	242,6	12201,75	12081,48
Letonie	0	0	0	0
Liechtenstein	0	0	0	0
Lituanie	2,7	2,7	133,11	134,46
Monaco	0	0	0	0
Nouvelle-Zélande	6,4	6,8	315,52	338,64
Norvège	9,7	9,4	478,21	468,12
Pays-Bas	43,9	43,8	2164,27	2181,24
Pologne	19,2	19,7	946,56	981,06
Portugal	14,6	14,9	719,78	742,02
Roumanie	10,6	10,9	522,58	542,82
Royaume Uni	77,3	77,2	3810,89	3844,56
Slovaquie	3,2	3,3	157,76	164,34
Slovénie	0	0	0	0
Suède	15,2	15	749,36	747
Suisse	13,1	12,4	645,83	617,52
Union Européenne	0	0	0	0
Ukraine	12,7	12,9	626,11	642,42
Sous-total	1223,7	1225,4	60328,41	61024,92
Etats-Unis d'Amérique	896,1	894,3	44177,73	44536,14
TOTAL Monde	3517,1	3522,5	173393,03	175420,5

Pourcentages de consommation de carburants par régions

Source : idem, pour 2002

Régions	Gasolines	Middle distillates	Total carburants
Amérique du Nord	44,9%	28,3%	73,2%
Amérique du Sud	26,2%	37,1%	63,3%
Europe	25,1%	43,0%	68,1%
Moyen Orient	20,8%	35,8%	56,6%
Afrique	23,6%	41,8%	65,4%
Asie et pacifique	27,4%	37,6%	65,0%
OECD	36,7%	34,2%	70,9%
NPI	23,0%	38,8%	61,8%
TOTAL Monde	32,0%	35,8%	67,8%
Annexe B (1er, 3ème et 6ème)			moy= 68,76%

Annexe 2 : Système de notations

Notation	Signification	Unité
i	Indice du combustible fossile	
car	Carburants	
gaz	Gaz naturel et pétrole lourd	
cha	Charbon	
lig	Lignite	
r	Taux d'actualisation	%
τ	Progression de la taxe	%
z	Taxe sur le carbone pour le secteur de l'industrie-résidentiel	\$/tC
z_{car}	Taxe sur le carbone pour les transports	\$/tC
$D_{car}(t)$	Demande spécifique aux carburants	tep
$a_{car}(t) = k_{car} \cdot e^{\alpha_{car} t}$	Valeur maximale de la demande de carburant	tep
α_{car}	Croissance de la consommation de carburants	%
b_{car}	Pente de la demande de carburant	tep/\$
$p_{car}(t)$	Prix du carburant HT	\$/tep
$P_{car}(t)$	Prix du carburant TTC	\$/tep
$D(t) = a(t) - bp(t)$	Demande d'énergie fossile substituable	tep
\bar{c}	Prix du backstop ou coût d'exploitation de l'énergie alternative	\$/tep
$a(t) = k \cdot e^{\alpha t}$	Valeur maximale de la demande autre	tep
α	Taux de croissance de la demande autre (à l'origine)	%
b	Pente de la demande autre	tep/\$
$p_i(t)$	Prix de l'énergie fossile i HT	\$/tep
$P_i(t)$	Prix de l'énergie fossile i TTC	\$/tep
π_i	Rente de la ressource i en terre à la date $t = 0$	\$
$\varphi_i = \pi_i e^{rT_i-1}$	Rente initiale de la ressource i (lorsqu'on commence à l'exploiter)	\$
c_i	Coût d'exploitation de la ressource i	\$
T_i	Durée d'exploitation de la ressource i	ans
cc_i	Contenu en carbone du combustible i	tC/tep
S_i	Réserves mondiales du combustible i estimées en 2002	tep

Annexe 3 : Résolution des systèmes de Hotelling

1. Équations détaillées pour le cas des carburants

On considère que le secteur des transports n'utilise que du pétrole, sans substitution possible avec d'autres énergies fossiles. De plus, il n'y a pas d'énergie non fossile utilisable, mais une évolution progressive en fonction du progrès technique vers de nouvelles technologies capables de remplacer le moteur à explosion.

Les conditions de prix de fin de période et d'épuisement de la ressource pétrole réservée à la production de carburants s'écrivent :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{k_{car} \cdot e^{\alpha_{car} T_{car}}}{b_{car}} = c_{car} + \varphi_{car} \cdot e^{r T_{car}} + z \cdot CC_{car} \\ \int_0^{T_{car}} (k_{car} \cdot e^{\alpha_{car} t} - b_{car} \cdot c_{car} - b_{car} \cdot z \cdot CC_{car} - b_{car} \cdot \varphi_{car} \cdot e^{rt}) dt = S_{car} \end{array} \right.$$

on peut en déduire l'écriture de la rente pour le carburant :

$$\varphi_{car} = \left(\frac{k_{car} \cdot e^{\alpha_{car} T_{car}}}{b_{car}} - c_{car} - z \cdot CC_{car} \right) \cdot e^{-r T_{car}}$$

D'où la transformation de l'intégrale :

$$k_{car} \cdot \left(\frac{e^{\alpha_{car} T_{car}} - 1}{\alpha_{car}} \right) - (b_{car} \cdot c_{car} + b_{car} \cdot z \cdot CC_{car}) \cdot T_{car} - b_{car} \cdot \left(\frac{k_{car} \cdot e^{\alpha_{car} T_{car}}}{b_{car}} - c_{car} - z \cdot CC_{car} \right) \cdot e^{-r T_{car}} \cdot \left(\frac{e^{r T_{car}} - 1}{r} \right) = S_{car}$$

Finalement, on obtient :

$$\boxed{k_{car} \cdot \left(\frac{e^{\alpha_{car} T_{car}} - 1}{\alpha_{car}} \right) - (b_{car} \cdot c_{car} + b_{car} \cdot z \cdot CC_{car}) \cdot T_{car} - b_{car} \cdot \left(\frac{k_{car} \cdot e^{\alpha_{car} T_{car}}}{b_{car}} - c_{car} - z \cdot CC_{car} \right) \cdot \left(\frac{1 - e^{-r T_{car}}}{r} \right) = S_{car}}$$

2. Équations détaillées pour les trois combustibles

On considère les systèmes d'équation s'appliquant aux trois combustibles fossiles utilisés par le secteur de l'industrie et par les ménages. La fonction de demande est unique mais variable en fonction du temps : $D_t = a_t - b \cdot (p_t + z \cdot cc)$, $a_t = k \cdot e^{\alpha t}$. On suppose une parfaite substituabilité des combustibles. Dans ce cas, le consommateur demande systématiquement le combustible le moins cher (taxe comprise), ce qui explique qu'ils soient utilisés les uns après les autres. La fonction de demande ne dépend que du contenu énergétique procuré.

Exploitation du combustible i pendant T_i , avec i qui prend généralement les valeurs de gaz et de charbon

Les conditions de prix de fin de période d'exploitation et d'épuisement de la ressource i s'écrivent :

$$\begin{cases} c_{i+1} + \varphi_{i+1} + z.cc_{i+1} = c_i + \varphi_i \cdot e^{rT_i} + z.cc_i \\ \int_0^{T_i} (k \cdot e^{\alpha t} \cdot e^{-\alpha t} - b \cdot c_i - b \cdot z.cc_i - b \cdot \varphi_i \cdot e^{rt}) dt = S_i \end{cases}$$

avec $\varphi_i = \pi_i e^{rt_{i-1}}$; $t_{i-1} = t_i - T_i$ et $t_0 = 0$.

D'où :

$$\begin{cases} \varphi_i = e^{-rT_i} \cdot (\varphi_{i+1} + c_{i+1} + z.cc_{i+1} - c_i - z.cc_i) \\ k \cdot e^{\alpha t_i} \cdot e^{-\alpha T_i} \cdot \left(\frac{e^{\alpha T_i} - 1}{\alpha} \right) + (-b \cdot c_i - b \cdot z.cc_i) \cdot T_i \\ -b \cdot (\varphi_{i+1} + c_{i+1} + z.cc_{i+1} - c_i - z.cc_i) \cdot e^{-rT_i} \cdot \left(\frac{e^{rT_i} - 1}{r} \right) = S_i \end{cases}$$

ce qui est équivalent à :

$$\frac{k \cdot e^{\alpha t_i}}{\alpha} (1 - e^{-\alpha T_i}) + (-b \cdot c_i - b \cdot z.cc_i) \cdot T_i - \frac{b}{r} (\varphi_{i+1} + c_{i+1} + z.cc_{i+1} - c_i - z.cc_i) \cdot (1 - e^{-rT_i}) = S_i$$

Donc on obtient :

$$\begin{cases} \varphi_i = e^{-rT_i} \cdot (\varphi_{i+1} + c_{i+1} + z \cdot (cc_{i+1} - cc_i) - c_i) \\ k \cdot e^{\alpha t_i} \left(\frac{1 - e^{-\alpha T_i}}{\alpha} \right) + (-b \cdot c_i - b \cdot z.cc_i) \cdot T_i - b \cdot (\varphi_{i+1} + c_{i+1} + z \cdot (cc_{i+1} - cc_i) - c_i) \cdot \left(\frac{1 - e^{-rT_i}}{r} \right) = S_i \end{cases}$$

Exploitation du combustible n pendant T_n , et généralement $n = \text{lignite}$

Une technologie alternative existe au coût \bar{c} ; ce coût plafonne le prix que le consommateur accepte de payer, ce qui peut éventuellement amener à laisser des ressources en terre au cas où la taxe sur le carbone est élevée. Dans ce cas, le raisonnement est le même, mais la lignite est remplacée par le dernier combustible rentable, c'est-à-dire tel que : $c_i + z.cc_i < \bar{c}$.

Les conditions de prix de fin de période d'exploitation et d'épuisement de la ressource n s'écrivent :

$$\begin{cases} \text{Inf} \left(\bar{c}, \frac{k \cdot e^{\alpha t_n}}{b} \right) = c_n + \varphi_n \cdot e^{rT_n} + z.cc_n \\ \int_0^{T_n} (k \cdot e^{\alpha t} \cdot e^{-\alpha t} - b \cdot c_n - b \cdot \varphi_n \cdot e^{rt} - b \cdot z.cc_n) dt = S_n \end{cases}$$

D'où :

$$\begin{cases} \varphi_n = e^{-rT_n} \cdot (\bar{c} - z \cdot cc_n - c_n) \\ k \cdot e^{\alpha t_n} \cdot e^{-\alpha T_n} \cdot \left(\frac{e^{\alpha T_n} - 1}{\alpha} \right) + (-b \cdot c_n - b \cdot z \cdot cc_n) \cdot T_n - b \cdot (\bar{c} - z \cdot cc_n - c_n) \cdot e^{-rT_n} \cdot \left(\frac{e^{rT_n} - 1}{r} \right) = S_n \end{cases} \text{ car dans}$$

le cas qui nous intéresse, on aura toujours : $\bar{c} < \frac{k}{b}$

Ce système est équivalent à :

$$\frac{k \cdot e^{\alpha t_n}}{\alpha} \cdot (1 - e^{-\alpha T_n}) + (-b \cdot c_n - b \cdot z \cdot cc_n) \cdot T_n - b \cdot (\bar{c} - z \cdot cc_n - c_n) \frac{(1 - e^{-rT_n})}{r} = S_n$$

Finalement, on obtient :

$$\begin{cases} \varphi_n = e^{-rT_n} \cdot (\bar{c} - z \cdot cc_n - c_n) \\ k \cdot e^{\alpha t_n} \left(\frac{1 - e^{-\alpha T_n}}{\alpha} \right) (-b \cdot c_n - b \cdot z \cdot cc_n) \cdot T_n - b \cdot (\bar{c} - z \cdot cc_n - c_n) \cdot \left(\frac{1 - e^{-rT_n}}{r} \right) = S_n \end{cases}$$

Utilisation des notations du modèle :

Tant que $z < \frac{\bar{c} - c_{lig}}{cc_{lig}}$, les équations finales décrivant les durées d'exploitation de chaque combustible

s'écrivent :

$$k \cdot e^{\alpha(T_{gaz} + T_{cha} + T_{lig})} \left(\frac{1 - e^{-\alpha T_{lig}}}{\alpha} \right) + (-b \cdot c_{lig} - b \cdot z \cdot cc_{lig}) \cdot T_{lig} - b \cdot (\bar{c} - z \cdot cc_{lig} - c_{lig}) \cdot \left(\frac{1 - e^{-rT_{lig}}}{r} \right) = S_{lig}$$

$$k \cdot e^{\alpha(T_{gaz} + T_{cha})} \left(\frac{1 - e^{-\alpha T_{cha}}}{\alpha} \right) + (-b \cdot c_{cha} - b \cdot z \cdot cc_{cha}) \cdot T_{cha} - b \cdot (\varphi_{lig} + c_{lig} + z \cdot (cc_{lig} - cc_{cha}) - c_{cha}) \cdot \left(\frac{1 - e^{-rT_{cha}}}{r} \right) = S_{cha}$$

$$k \cdot e^{\alpha T_{gaz}} \left(\frac{1 - e^{-\alpha T_{gaz}}}{\alpha} \right) + (-b \cdot c_{gaz} - b \cdot z \cdot cc_{gaz}) \cdot T_{gaz} - b \cdot (\varphi_{cha} + c_{cha} + z \cdot (cc_{cha} - cc_{gaz}) - c_{gaz}) \cdot \left(\frac{1 - e^{-rT_{gaz}}}{r} \right) = S_{gaz}$$

Les trois équations précédentes sont celles qui ont été traduites dans Excel, afin d'obtenir la maquette. La résolution se fait assez facilement à l'aide du solveur ; cependant l'aide d'une macro n'est pas négligeable pour converger plus rapidement vers la solution.

Annexe 4. Calcul des variations de surplus

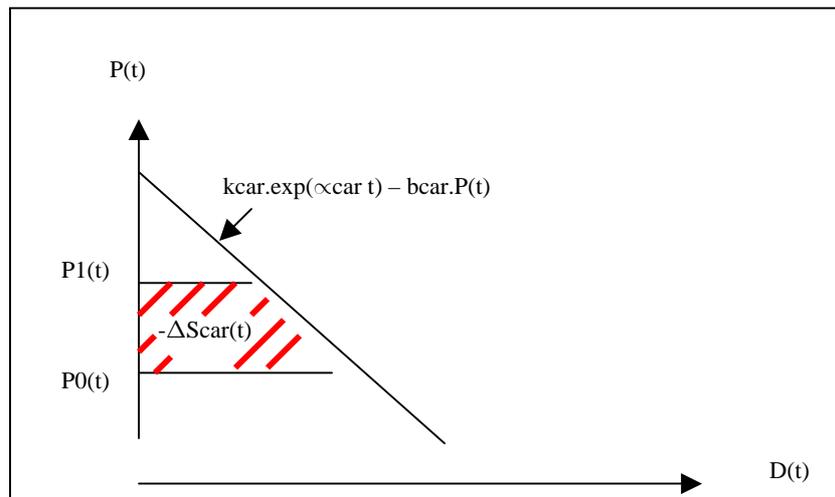
Lorsqu'on introduit une taxe sur le carbone, il y a une modification du prix de chaque combustible. Pour mesurer l'impact sur le consommateur, sur le producteur de la ressource et sur le revenu de l'Etat, on peut calculer des 'variations de surplus'. Il s'agit d'un équivalent monétaire de la perte ou du gain de bien-être, consécutif à la modification du prix du bien. Pour l'Etat, il suffit de calculer les recettes engendrées par la taxe, sachant que la situation de référence est définie par des recettes nulles. Pour les autres agents économiques, il est nécessaire de calculer les variations de surplus pour chaque combustible.

Pour les carburants :

On pose que $P_0(t)$ est le prix du carburant dans le scénario de référence, et que $P_1(t)$ est celui du scénario avec introduction de la taxe sur le carbone, définis respectivement :

$$P_0(t) = c_{car} + \varphi_0 \cdot e^{rt}$$

$$P_1(t) = c_{car} + \varphi_1 \cdot e^{rt} + z \cdot cc_{car}$$



Représentation graphique de la variation du surplus du consommateur

Le surplus du consommateur s'exprime ainsi :

$$s_{car}(t) = \int_{p_0(t)}^{\bar{P}(t)} (k_{car} \cdot e^{\alpha_{car} t} - b_{car} \cdot p(t)) dp$$

$$S_{car}(t) = k_{car} \cdot e^{\alpha_{car} t} [\bar{P}(t) - p_0(t)] - \frac{1}{2} b_{car} \cdot [\bar{P}^2(t) - p_0^2(t)] \text{ si } 0 \leq t \leq T_{car}$$

avec $\bar{P}(t) = \frac{k_{car} \cdot e^{\alpha_{car} t}}{b_{car}}$, constant à chaque date t , et $p_0(t)$ le prix HT du combustible.

Si la date t n'est pas incluse dans la période d'exploitation du carburant, le surplus est nul.

$$S_{car} = k_{car} \cdot e^{\alpha_{car} t} \cdot \left[\frac{k_{car} \cdot e^{\alpha_{car} t}}{b_{car}} - \varphi_0 \cdot e^{rt} \right] - \frac{1}{2} b_{car} \cdot \left[\frac{k_{car}^2 \cdot e^{2\alpha_{car} t}}{b_{car}^2} - \varphi_0^2 \cdot e^{2rt} \right]$$

$$S_{car} = \frac{k_{car}^2 \cdot e^{2\alpha_{car} t}}{2b_{car}} - k_{car} \cdot e^{\alpha_{car} t} \cdot \varphi_0 \cdot e^{rt} + \frac{1}{2} b_{car} \cdot \varphi_0^2 \cdot e^{2rt}$$

Pour calculer la variation de surplus, il faut faire la différence entre le surplus sans taxe et le surplus avec taxe, le tout à la date t .

$$\Delta S_{car} = S_{car}(TTC) - S_{car}(HT) - z \cdot cc_{car} \cdot D(t)$$

$$\Delta S_{car} = \int_{P_1(t)}^{\bar{P}(t)} (k_{car} \cdot e^{\alpha_{car} t} - b_{car} \cdot p(t)) dp - \int_{p_0(t)}^{\bar{P}(t)} (k_{car} \cdot e^{\alpha_{car} t} - b_{car} \cdot p(t)) dp - z \cdot cc_{car} \cdot D(t)$$

$$\Delta S_{car} = k_{car} \cdot e^{\alpha_{car} t} \cdot [p_0(t) - P_1(t)] - \frac{1}{2} b_{car} \cdot [p_0^2(t) - P_1^2(t)] - z \cdot cc_{car} \cdot [k_{car} \cdot e^{\alpha_{car} t} - b_{car} \cdot P_1(t)]$$

$$\Delta S_{car} = k_{car} \cdot e^{\alpha_{car} t} \cdot [p_0(t) - P_1(t) - z \cdot cc_{car}] - \frac{1}{2} b_{car} \cdot [p_0^2(t) - P_1^2(t) + 2z \cdot cc_{car} \cdot P_1(t)]$$

Comme l'on possède les données sur les prix HT et les prix TTC, cette formule peut être directement utilisée sous Excel. Une autre méthode consisterait à calculer séparément le surplus du consommateur sans taxe, puis avec taxe et ensuite soustraire le montant de la taxe qu'il paye (cf. la première équation de la variation de surplus ci-dessus).

Pour les autres énergies substituables :

Sachant que les énergies sont utilisées les unes après les autres, il n'y a, à chaque date t , qu'un combustible utilisé et la variation de surplus ne dépend que du combustible qui est en train d'être consommé. Sur Excel, il sera nécessaire d'introduire la condition selon laquelle la date t n'est pas supérieure à celle de fin d'exploitation (dans le scénario avec taxe) de chaque combustible, sinon le surplus est nul. Il est donc possible d'additionner ensuite les surplus pour chaque combustible car ils ne se recoupent pas dans le temps.

On procède comme indiqué précédemment, en utilisant la formule la plus simple, car elle a le mérite de décomposer chaque partie de la variation de surplus, et ainsi d'éviter les erreurs lors des passages d'un combustible i à l'autre :

$$\Delta S_i = S_i(TTC) - S_i(HT) - z \cdot cc_i \cdot D(t)$$

Le cas des producteurs est différent : on fait l'hypothèse que ceux-ci sont spécialisés dans un domaine particulier, et n'exploitent donc qu'un seul type de combustible fossile. La hausse des prix n'est pas du ressort des producteurs, car elle émane de l'Etat, donc leur profit est toujours nul. Cependant il y a un nouveau partage de la rente, ainsi qu'un élargissement de la durée d'exploitation du combustible.

Annexe 5 : Facteurs de conversion énergétique

On utilise les préfixes s'appliquant à des grammes, des kilogrammes ou des tonnes :

M	million	1,00E+06
G	giga	1,00E+09
T	téra	1,00E+12

tep : tonne d'équivalent pétrole

Energie	Unité physique	Gigajoules (PCI)	tep (PCI) = GJ/42
Charbon			
Houille	1t	26	0,619
Lignite et produits de récupération	1t	17	0,405
Produits pétroliers			
Pétrole brut / gazole / fioul domestique	1t	42	1
Gaz naturel	1 MGWh PCS	3,24	0,077

Source : Observatoire de l'Energie, éd 2000

Coefficient d'émission de carbone (CEC)

Combustible	tC / TJ
pétrole brut	20
charbon à coke	25,8
lignite	27,6
gaz naturel (sec)	15,3

CEC * valeur en
= TJ d'une TEP

Coefficient d'équivalence

Combustible	tC/tep
charbon	1,08368336
gaz	0,643792208
petrole	0,84

Equivalence physique pour pétrole brut

Transformer des tonnes en barils	*	7,33
Transformer des barils en tonnes	*	0,1364
Transformer des barils/j en tonnes/an	*	49,8

Annexe 6 : Étude de sensibilité sur le scénario de référence

	Variation résultante			
	Tlig	Tcha	Tgaz	Tcar
Paramètre variant de - 10%	20,600669	18,189531	22,936991	42,697565
r	0,86%	-0,86%	-2,83%	-6,65%
f	0,23%	1,66%	-3,51%	3,51%
kcar				-6,16%
alphacar				0,29%
bcar				1,08%
ccar				1,08%
Scar				4,72%
csup	4,23%	2,02%	0,95%	
k	-5,05%	-8,13%	14,25%	
alpha	-9,08%	-5,87%	-1,51%	
b	2,79%	4,34%	6,45%	
cgaz	-0,66%	-1,03%	2,14%	
ccha	-1,49%	0,78%	2,35%	
clig	0,50%	2,56%	1,22%	
Sgaz	-2,20%	-3,45%	7,12%	
Scha	-2,69%	7,67%	-0,73%	
Slig	7,35%	-0,66%	-0,30%	-2,13%

On remarquera que lorsque la variation de -10 % d'un paramètre entraîne une modification de plus de 5 % (en valeur absolue), la cellule est mise en évidence par un fond gris foncé, et lorsque la modification dépasse 10 % par un fond gris clair. On en déduit que les paramètres les plus sensibles sont ceux déterminant la demande autre : α et k . Le montant des réserves est aussi un paramètre significatif, mais il n'a d'impact que sur le combustible concerné. Il faut rappeler que les paramètres de la fonction de demande ont été les plus difficiles à obtenir en raison de l'absence de données homogènes ; or ce sont eux qui déterminent fortement les résultats obtenus.

On peut additionner les valeurs absolues de toutes les variations pour chaque colonne, et ainsi comparer les combustibles selon l'impact qu'ils subissent après une variation de paramètre. On obtient :

- 37,11 % (3,09 % de variation en moyenne) pour Tlig,
- 39,03 % (3,25 % en moyenne) pour Tcha,
- 43,36 % (3,61 % en moyenne) pour Tgaz,
- 23,49 % (3,35 % en moyenne) pour Tcar.

Dans le cadre de la demande autre, Tgaz semble être le résultat le plus sensible à une variation de paramètre ; mais on reste en moyenne dans le même ordre de grandeur (3 %).