

Substitution énergétique Mythe ou réalité?



**Conseil régional de l'environnement et du
développement durable (CREDD)**

Groupe de recherches écologiques de La Baie (GREB)

**Rapport #1
sur l'énergétique régionale**

**Substitution énergétique
Mythe ou réalité?**

Réalisé par

Patrick Déry, B.Sc, M.Sc. (physique)
Analyste/consultant, spécialiste en énergétique,
agriculture et environnement

Pour

**Conseil régional de l'environnement et du développement
durable (CREDD), Saguenay-Lac-St-Jean**

Groupe de recherches écologiques de La Baie (GREB)

Octobre 2007

Partenaires financiers



Sommaire

Sommaire	3
Note	3
Remerciements	3
Avertissement	3
Présentation des organisations	4
Introduction	5
Qu'est-ce que la substitution énergétique?	6
1- La substitution des parts de marché (ou relative)	6
2- La substitution énergétique effective	8
Pourquoi parle-t-on autant de substitution énergétique?	12
1- La sécurité ou indépendance énergétique nationale	12
2- Le réchauffement climatique	13
Que peut-on retirer des données historiques quant à la substitution?	14
États-Unis d'Amérique	14
Le monde	25
Allemagne	30
Québec	34
Résultats	38
Quelles sont les conditions pour réussir une substitution ?	39
Conclusion	40
La planification énergétique à long terme, une condition essentielle	40
Mais quelle est la pertinence de cette planification?	40

Note

Le présent rapport est le premier d'une série de cinq sur l'énergétique au Saguenay-Lac-St-Jean. Les trois premiers rapports concernent des concepts importants de l'énergétique que sont la substitution énergétique, l'efficacité énergétique et l'économie d'énergie et le rendement énergétique. Le quatrième aborde l'énergétique au niveau mondial et québécois. Le dernier rapport met l'accent sur la situation régionale face à la question énergétique.

Remerciements

L'auteur tient à remercier tous ceux et celles qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce rapport.

Avertissement

Les commentaires ou opinions exprimés dans ce rapport ne représentent pas nécessairement les positions du Conseil régional de l'environnement et du développement durable (CREDD), du Groupe de recherches écologiques de La Baie (GREB), du Regroupement action jeunesse (RAJ-02) et du Secrétariat à la Jeunesse (SAJ); elles constituent des observations et affirmations personnelles de l'auteur. Les graphiques, tableaux ou toute autre partie de ce rapport peuvent être utilisés à condition de mentionner l'auteur.

Présentation des organisations

Conseil régional de l'environnement et du développement durable (CREDD) du Saguenay-Lac-St-Jean

Organisme à but non-lucratif dont les mandats sont :

- Regrouper et représenter des organismes ou groupes environnementaux ainsi que des organismes publics ou privés, des entreprises, des associations et des individus intéressés par la protection de l'environnement et par la promotion du développement durable d'une région, auprès de toutes les instances concernées et de la population en général;
- Favoriser la concertation et les échanges avec les organisations de la région et assurer l'établissement de priorités et de suivis en matière d'environnement dans une perspective de développement durable;
- Favoriser et promouvoir des stratégies d'actions concertées en vue d'apporter des solutions aux problèmes environnementaux et participer au développement durable de la région (par de la sensibilisation, de la formation, de l'éducation et d'autres types d'action);
- Agir à titre d'organisme ressource au service des intervenants régionaux oeuvrant dans le domaine de l'environnement et du développement durable;
- Réaliser des projets découlant du plan d'action du CRE;
- Favoriser par la concertation et, par le partage d'expertises, la mise sur pied de projets par le milieu (organismes, groupes ou individus);
- Collaborer d'un commun accord aux projets déjà pris en charge par le milieu (organismes, groupes ou individus).

Groupe de recherches écologiques de La Baie (GREB)

Organisme à but non-lucratif dont la mission est :

Favoriser l'essor d'un mode de vie écologiquement, socialement et économiquement viable, dans la perspective d'une occupation et d'un développement territoriaux rationnels et ce, selon quatre axes d'intervention : recherche, expérimentation, éducation, puis action publique et civique.

«Les faits ne cessent pas d'exister parce qu'ils sont ignorés», **Aldous Huxley**

Introduction

Principalement en raison de la préoccupation croissante concernant le réchauffement climatique, certaines filières énergétiques sont perçues depuis plusieurs années comme solution à cette problématique car elles pourraient se substituer aux sources d'énergie fortement émettrices de gaz à effet de serre¹.

Toutefois, les travaux réalisés jusqu'à maintenant sur la question de la substitution énergétique, comme ceux de Cesare Marchetti dans les années 1970², ont tous été liés à la substitution des parts de marché et non à la substitution réelle de sources d'énergie par d'autres. Rarement, il nous a été donné de constater qu'une source plus «propre» empêchait la consommation d'une autre sur une période de temps importante.

Pourtant, la substitution constitue souvent, avec la séquestration du carbone, un élément essentiel aux stratégies de lutte aux changements climatiques.³ Aussi, la substitution est-elle souvent un argument fort des promoteurs de projets énergétiques pour justifier ceux-ci auprès des décideurs et de la population.⁴ Il est d'ailleurs très fréquent d'entendre que l'installation d'éoliennes, de panneaux solaires ou d'une centrale au gaz naturel permettrait d'éviter l'utilisation de charbon plus polluant.

Mais qu'en est-il vraiment de la substitution énergétique?

Peut-on vraiment éviter de consommer tout ce charbon et ce pétrole en les substituant par des sources plus propres?

Les productions supplémentaires par des sources «propres» d'énergie ne font-elles pas que s'ajouter à la consommation totale d'énergie?

Quelles sont les conditions qui permettraient effectivement à la substitution énergétique d'avoir un impact réel et concret sur la consommation d'énergie et l'émission de gaz à effet de serre?

C'est à ces questions que nous tenterons de répondre par ce rapport.

¹ Le plan du gouvernement québécois sur la réduction de la consommation de mazout lourd visant à améliorer la qualité de l'air et réduire les émissions de gaz à effet de serre en est un bon exemple (1^{er} octobre 2007).

² Marchetti, C., Primary Energy Substitution Models: On the Interaction Between Energy and Society, *Technological Forecasting and Social Change*, 10:345—356, 1977.

Marchetti, C., Energy Systems -- The Broader Context, *Technological Forecasting and Social Change*, 14:191—203, 1979.

Marchetti, C., and Nakicenovic, N., The Dynamics of Energy Systems and the Logistic Substitution Model part I part II, RR-79-13, International Institute for Applied Systems Analysis, Laxenburg, Austria, 1979.

Luis de Sousa, Marchetti's curves, the Oil Drum, juillet 2007

³ Working Group III, Fourth assessment report, chapter 4, IPCC (GIEC), 2007.

⁴ Exemple : «Rabaska : un pas vers Kyoto», La Presse, 29 septembre 2007.

Qu'est-ce que la substitution énergétique?

La substitution énergétique est le remplacement d'une source d'énergie par une autre. Définition simple mais qui cache en fait une réalité à deux facettes soit la substitution des parts de marché et la substitution effective.

1- La substitution des parts de marché (ou relative)

La substitution des parts de marché consiste à la prise de possession des parts de marché d'une source d'énergie par une autre. Les parts de marché de chaque source sont exprimées en pourcentage de la valeur totale de la consommation ou de la production énergétique, ayant été ramené à une valeur unitaire (100%), d'une entité prédéfinie (pays, province, région...).

Pour observer la substitution des parts de marché, il faut d'abord transformer les valeurs numériques de la consommation d'énergie de chaque filière en proportion de la consommation totale d'énergie pour chaque année. Par exemple, dans le tableau 1 en 1990, la consommation de 100 Mtep (mégatonne d'équivalent pétrole) pour la source A sur une consommation totale de 175 Mtep donne une part de marché de 57%.

On représente ensuite l'ensemble des valeurs obtenues sur un graphique avec une courbe pour chaque source d'énergie.

En observant chacune des courbes, il est ensuite possible d'identifier les moments où il y a substitution des parts de marché, soit un remplacement d'une source par une autre relativement à leur part de marché. Voici deux exemples purement théoriques pour illustrer la démarche.

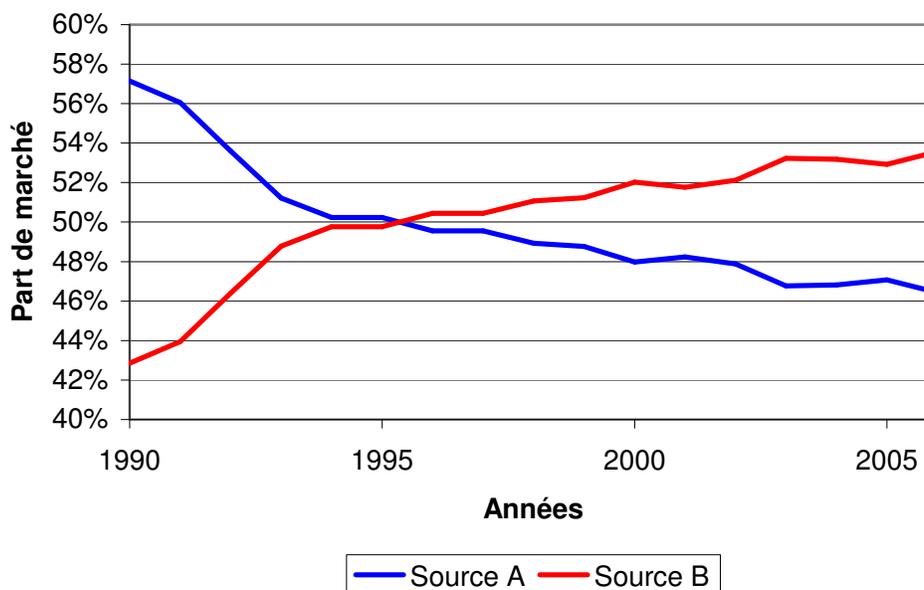
Tableau 1 : exemple 1

Année	Consommation			Part de marché (%)	
	Source A	Source B	Totale	Source A	Source B
1990	100	75	175	57%	43%
1991	102	80	182	56%	44%
1992	104	90	194	54%	46%
1993	105	100	205	51%	49%
1994	106	105	211	50%	50%
1995	108	107	215	50%	50%
1996	110	112	222	50%	50%
1997	113	115	228	50%	50%
1998	115	120	235	49%	51%
1999	118	124	242	49%	51%
2000	119	129	248	48%	52%
2001	123	132	255	48%	52%
2002	124	135	259	48%	52%
2003	123	140	263	47%	53%
2004	125	142	267	47%	53%
2005	129	145	274	47%	53%
2006	130	150	280	46%	54%

Tableau 2 : Exemple 2

Année	Consommation			Part de marché (%)	
	Source A	Source B	Totale	Source A	Source B
1990	100	75	175	57%	43%
1991	98	77	175	56%	44%
1992	94	81	175	54%	46%
1993	90	85	175	51%	49%
1994	88	87	175	50%	50%
1995	88	87	175	50%	50%
1996	87	88	175	50%	50%
1997	87	88	175	50%	50%
1998	86	89	175	49%	51%
1999	85	90	175	49%	51%
2000	84	91	175	48%	52%
2001	84	91	175	48%	52%
2002	84	91	175	48%	52%
2003	82	93	175	47%	53%
2004	82	93	175	47%	53%
2005	82	93	175	47%	53%
2006	81	94	175	46%	54%

Figure 1: Part de marché par filière exemples 1 et 2



Les graphiques des parts de marché de ces deux exemples étant identiques, nous les avons fusionnés en un seul graphique (figure 1). On peut y voir que les parts de marché de la source A ont été substituées par la source B pour l'ensemble de l'échelle de temps représentée pour les deux exemples.

Si l'on s'arrête là, on pourrait conclure que la source A cède réellement sa place à la source B. C'est ce que font habituellement les analystes qu'ils soient du domaine énergétique ou économique. Nous verrons dans la prochaine section s'il y a eu un réel remplacement de la source A par la source B.

2- La substitution énergétique effective

La substitution effective consiste au remplacement concret et mesurable de la consommation ou de la production d'une source par une autre. La source substituée doit alors voir son utilisation diminuer de façon mesurable et inversement pour la source qui substitue. Une consommation ou production additionnelle évitée d'une source par une autre source ne constitue pas de la substitution effective car elle n'engendre aucun remplacement direct.

Pour observer un réel remplacement d'une source par une autre et ses impacts à long terme, il est nécessaire d'utiliser directement les données historiques de consommation d'énergie. Pour cela, il faut réaliser deux graphiques différents.

Le premier graphique consiste à réaliser sur celui-ci les courbes des statistiques de la consommation d'énergie pour chaque filière pour une entité géopolitique déterminée. Le second graphique est plus complexe à effectuer et nécessite un certain traitement des données historiques. La méthode ne sera pas détaillée ici, mais précisons seulement qu'il faut extraire des données historiques, les variations négatives de consommation pour chacune des filières et les variations positives qui y sont associées. De cette façon, on peut à la fois identifier les sources dont la consommation a diminué et celles qui les ont remplacées.

À partir de ces deux graphiques, il est possible de mettre en évidence les moments où il y eu substitution, quelles ont été les sources substituées et les substituantes ainsi que la durée de la substitution. Comme mentionné l'ai écrit précédemment, l'ajout ou l'augmentation de la consommation d'une source qui ne fait pas diminuer la consommation des autres sources ne constitue pas une substitution effective, mais plutôt une addition à la consommation. D'ailleurs, ces changements n'ont habituellement aucun impact sur la sécurité énergétique ou sur la réduction des émissions de gaz à effet de serre.

Prenons les deux exemples précédents pour illustrer le propos.

Même si ces deux exemples avaient la même représentation sur les graphiques des parts de marché (figure 1), la réalité est tout à fait différente en ce qui concerne la représentation graphique de la consommation réelle (figures 2 et 4).

Figure 2: Consommation par filière exemple 1

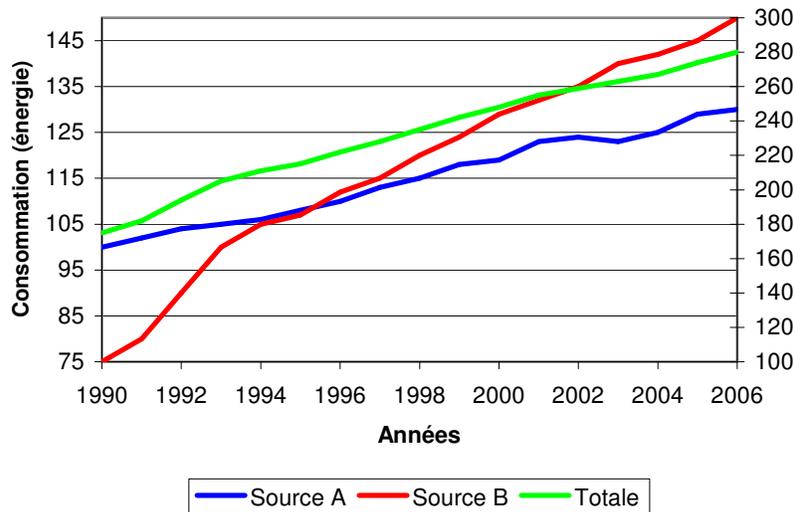
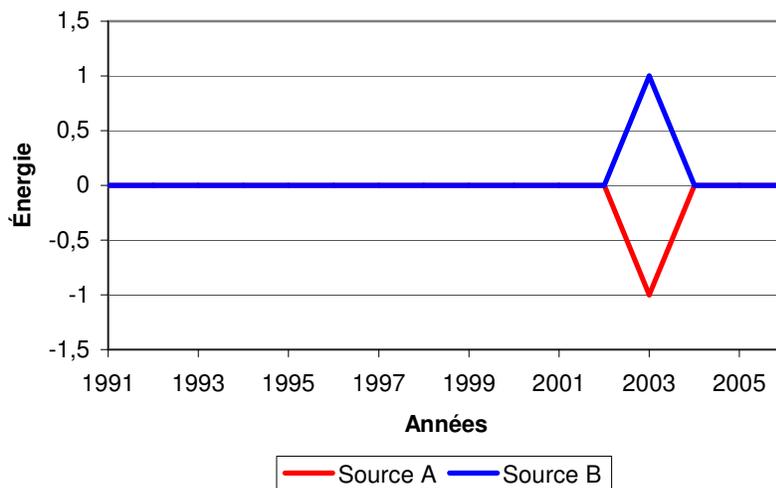


Figure 3: Substitution par filière exemple 1



Sur la figure 2, celle de l'exemple 1, il est facile d'observer qu'il n'y a aucune forme de substitution à long terme à cause de la croissance continue de la consommation de chaque filière. La figure 3 indique clairement d'ailleurs une substitution effective uniquement en 2003 et pour un an seulement. Ce résultat est très différent de celui obtenu avec les courbes de substitution des parts de marché. La croissance plus rapide de la consommation de la source B que celle de la source A explique le changement des parts de marché et non une quelconque substitution effective. Ce n'est que l'apparence d'un remplacement d'une source par une autre.

Figure 4: Consommation par filière exemple 2

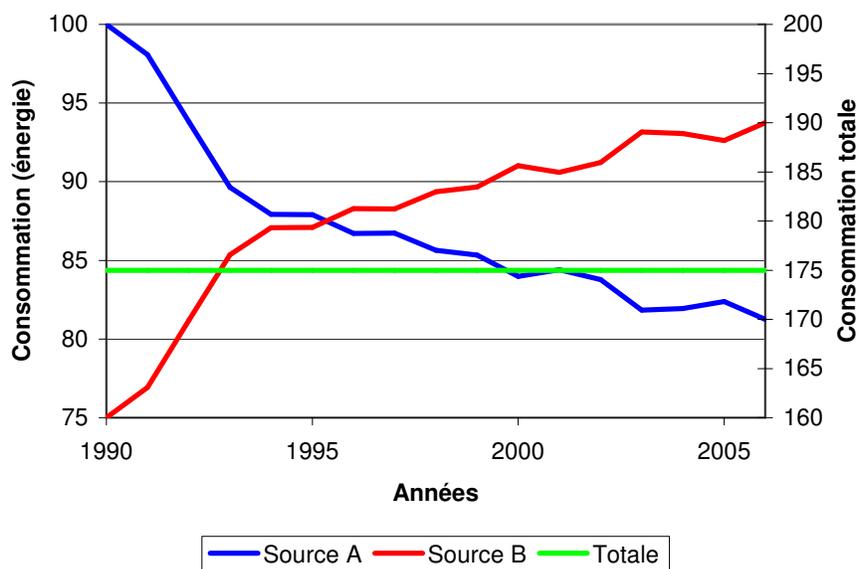
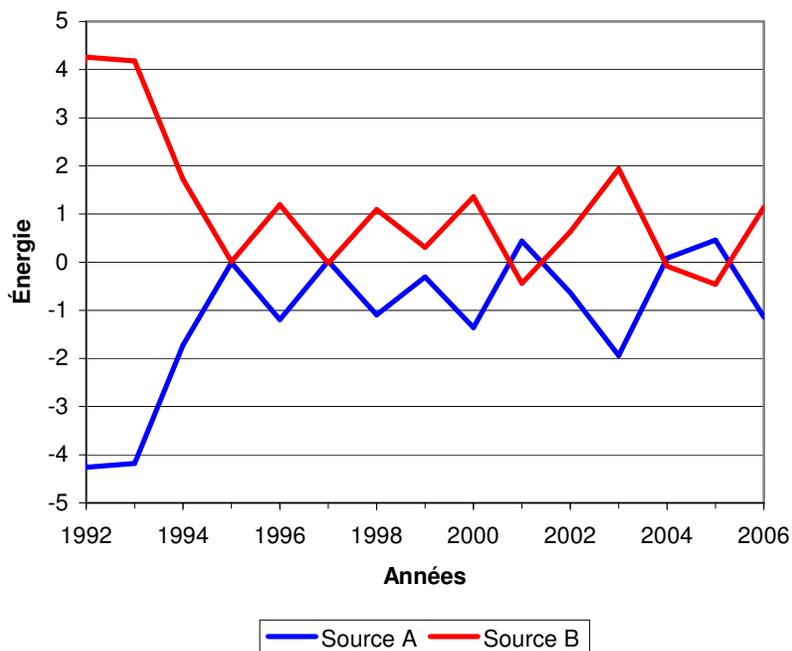


Figure 5: Substitution par filière exemple 2



Sur la figure 4 (exemple 2), à l'inverse de la figure 2, la consommation totale est stable tandis que la consommation de la source A décroît et celle de la source B s'accroît. Il y a donc une réelle substitution de la source A par la B. La figure 5 nous indique les substitutions effectives et leurs ampleurs selon les années.

Ces deux exemples, bien qu'hypothétiques, illustrent de façon non équivoque que l'utilisation de graphiques de part de marché ne permet pas de reconnaître une substitution ayant des impacts concrets. L'utilisation à la fois d'un graphique de la consommation réelle d'énergie par filière et d'un graphique de substitution effective s'avère efficace pour atteindre cet objectif. Nous verrons plus loin ce qui se passe avec des données réelles.

Pourquoi parle-t-on autant de substitution énergétique?

Actuellement, la substitution énergétique est un concept en vogue principalement pour deux raisons. La première en importance est la question du réchauffement climatique et la seconde la question de la sécurité énergétique nationale.

1- La sécurité ou indépendance énergétique nationale

Après le discours du président américain George W. Bush sur l'état de l'Union en janvier 2006 et sa phrase désormais célèbre : « we are addicted to oil »⁵, le gouvernement américain a lancé un programme d'indépendance énergétique basé principalement sur la substitution du pétrole provenant des pays du Moyen-Orient par des biocarburants tel que l'éthanol. Ceux-ci ne se révèlent pourtant pas très efficaces à cette fin, du moins pour l'instant, étant donné la grande quantité de pétrole et de gaz naturel, sous la forme de fertilisants, produits phytosanitaires et carburants, nécessaires à la production agricole⁶. Il est difficile de confirmer qu'il y a réelle substitution du fait que la production a débuté depuis peu de temps. Pour l'instant, s'il y a eu substitution, elle serait tellement faible qu'elle serait indiscernable des autres effets comme le ralentissement économique dû à la crise immobilière américaine.

Il demeure que les États-Unis, comme plusieurs autres pays dont la Suède ou l'Islande⁷, utilisent l'argument de la substitution de sources de provenances étrangères par des sources locales pour l'atteinte d'une indépendance et d'une sécurité énergétique nationale. Le Québec a d'ailleurs invoqué cette raison pour justifier le transfert du chauffage au mazout vers l'électricité dans les années 70-80 après les deux chocs pétroliers et la mise en service de la Baie-James.

⁵ AFP, Essence : Bush veut réduire la consommation, Le Devoir, 15 mai 2007.

⁶ Bhat, M.G., B.C. English, A.F. Turhollow and H. Nyangito. 1994, Energy in Synthetic Agricultural Inputs: Revisited. Oak Ridge National Laboratory Report ORNL/Sub/90-99732/2. Oak Ridge, TN: Oak Ridge National Laboratory.

N.B. McLaughlin et al., Comparison of energy inputs for inorganic fertilizer and manure-based corn production, Canadian Agricultural Engineering, Vol. 42, No. 1, 2000.

Brent D. Yacobucci Randy Schnepf, Ethanol and Biofuels: Agriculture, Infrastructure, and Market Constraints Related to Expanded Production, March 16, 2007, Congressional Research Service report for Congress

Amani Elobeid, Simla Tokgoz, Dermot J. Hayes, Bruce A. Babcock, and Chad E. Hart, The Long-Run Impact of Corn-Based Ethanol on the Grain, Oilseed, and Livestock Sectors: A Preliminary Assessment, Center for Agricultural and Rural Development, Iowa State University, November 2006.

travaux de pimentel sur l'éthanol

EcoNexus, Biofuelwatch, Carbon Trade Watch (Transnational Institute), Corporate Europe Observatory, Ecologistas en Acción, Ecoropa, Grupo de Reflexión Rural, Munlochy Vigil, NOAH (Friends of the Earth Denmark), Rettet Den Regenwald, Watch Indonesia, Agrofuels - Towards a reality check in nine key areas, June 2007.

⁷ Statement of Government Policy presented by the Prime Minister, Mr Göran Persson, to the Swedish Riksdag on Tuesday, 13 September 2005

John Vidal, environment editor, Sweden plans to be world's first oil-free economy, Guardian, Wednesday February 8, 2006.

2- Le réchauffement climatique

Les changements climatiques constituent l'argumentaire principal à la substitution des sources d'énergie fortement émettrices de CO₂ comme le pétrole et le charbon par des sources moins émettrices comme le gaz naturel et les sources renouvelables⁸. L'utilisation des sources fossiles compte en effet pour 85% au bilan des émissions de CO₂ anthropogénique mondiale⁹. La diminution de leur usage par des économies d'énergie et par le transfert vers des sources contribuant moins aux changements climatiques s'avère alors tout indiqué.

Nous verrons dans la prochaine section ce qu'il en est réellement de ces affirmations sur la substitution énergétique et des résultats qui ont été obtenus selon les conditions d'application.

⁸ Working Group III, Fourth assessment report, chapter 4, IPCC (GIEC), 2007.

⁹ id.

Que peut-on retirer des données historiques quant à la substitution?

À partir des données historiques de la consommation d'énergie, il est possible d'observer les substitutions énergétiques effectives qui ont eu lieu au cours de l'histoire. Pour chaque cas de substitution, il est possible de resituer le contexte de l'époque et déterminer ce qui a permis cette substitution. Il serait possible d'analyser chaque pays, continent ou tout autre entité géopolitique pour lequel les données sont disponibles. Pour les besoins de ce rapport, et compte tenu des ressources dont nous disposons, nous limiterons notre analyse à quatre entités géopolitiques ou géographiques soit les États-Unis, le monde, l'Allemagne et le Québec. Le choix se base principalement sur la disponibilité et la fiabilité des données historiques mais aussi sur l'intérêt que représentent ces entités au regard de la substitution.

Les données que nous avons utilisées n'incluent pas l'énergie musculaire des animaux de trait ou du travail des êtres humains. À une certaine époque, l'énergie métabolique des êtres vivants, comme les animaux de traits ou celle des êtres humains, était très importante dans le bilan énergétique total des pays industrialisés ce qui n'est plus le cas aujourd'hui.¹⁰ Les pays sous-développés, et dans une moindre mesure les pays émergents, peuvent avoir une forte contribution de cette forme d'énergie même encore aujourd'hui, mais elle est très difficile à quantifier¹¹.

États-Unis d'Amérique

Depuis les débuts de la colonisation, les États-Unis ont évalué leur consommation d'énergie, ont conservé ces statistiques et les ont rendues publiques et facilement accessibles. Ils sont les premiers consommateurs mondiaux d'énergie et ont figuré longtemps, au cours des deux précédents siècles, comme les premiers producteurs mondiaux de pétrole, de gaz et de charbon¹². Ils sont aussi, durant les années 1960 et 1970, les leaders des technologies de productions alternatives d'énergie tels que le photovoltaïque et l'éolien. Ce pays est donc un joueur incontournable lorsqu'il est question d'énergie.

Les données ont été acquises auprès de l'United States Energy Information Administration (EIA)¹³. Les séries de données débutent en 1635 pour se terminer en

¹⁰ Voir Cutler Cleveland, Energy transitions past and future, The Oil Drum, 8 août 2007.

¹¹ Id.

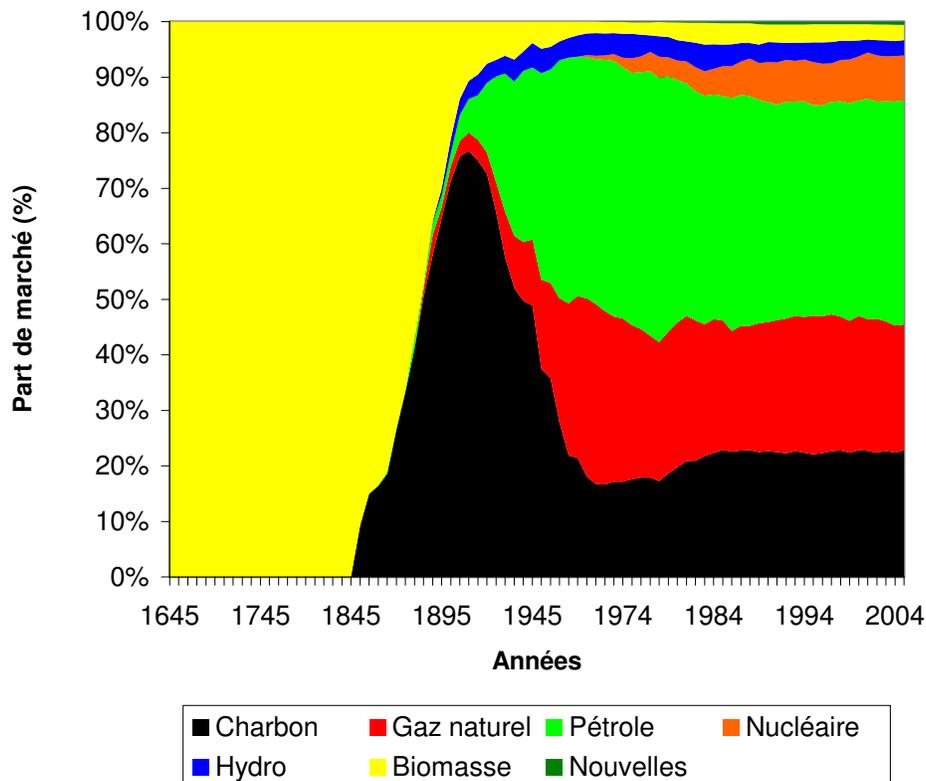
Douglas Clark and Caroline Stein, Monitoring and analysis of wood energy developments: data quality and availability, inter-organisation cooperation, joint FAO/UNECE working party on forest economics and statistics, 2005.

¹² United States Energy Information Administration, Energy in the United States : 1635-2000.

¹³ Energy Information Administration, Annual Energy Review 2005.

2005. Nous avons mis ces données sous forme graphique et nous en ressortons quelques observations quant à la substitution énergétique effective.

Figure 6: Part de marché par filière (États-Unis)



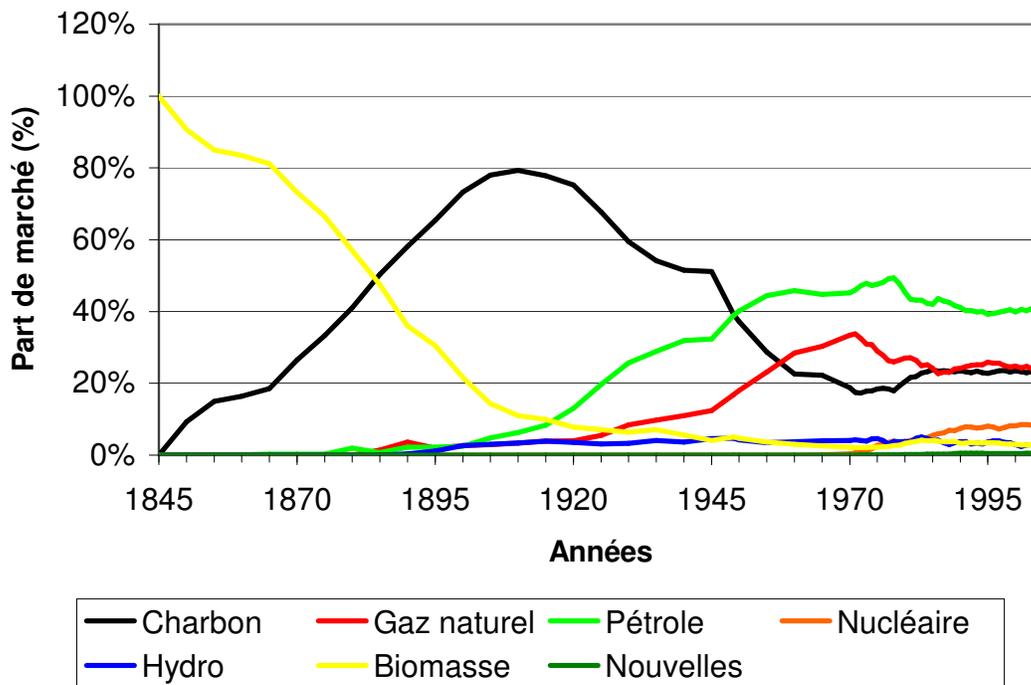
Sur la figure 6, les données de consommation d'énergie ont été cumulées et ramenées à une valeur unitaire (100%). Ainsi il est possible de voir la place qu'occupait chaque source d'énergie dans le bilan de la consommation totale. Toutefois, comme on l'a vu dans une section précédente, la consommation réelle est indiscernable.

Ce qui frappe le plus sur ce graphique, c'est l'espace que prenait le bois comme source d'énergie jusqu'au milieu du 19^{ième} siècle. À cette époque aux États-Unis, celui-ci fut déclassé par le charbon. L'une des raisons principales fut que le bois était consommé en si grande quantité (pour la sidérurgie, le transport, le chauffage...) que la production de ce dernier commença à péricliter pour cause de surexploitation¹⁴. Le charbon devint donc le substitut le plus indiqué pour l'industrialisation des États-Unis, ceux-ci ayant d'ailleurs les plus grandes réserves mondiales de charbon¹⁵.

¹⁴ United States Energy Information Administration, Energy in the United States : 1635-2000 Total Energy

¹⁵ Coal : Research and development to support national energy policy, June 2007, National Academy of Sciences.

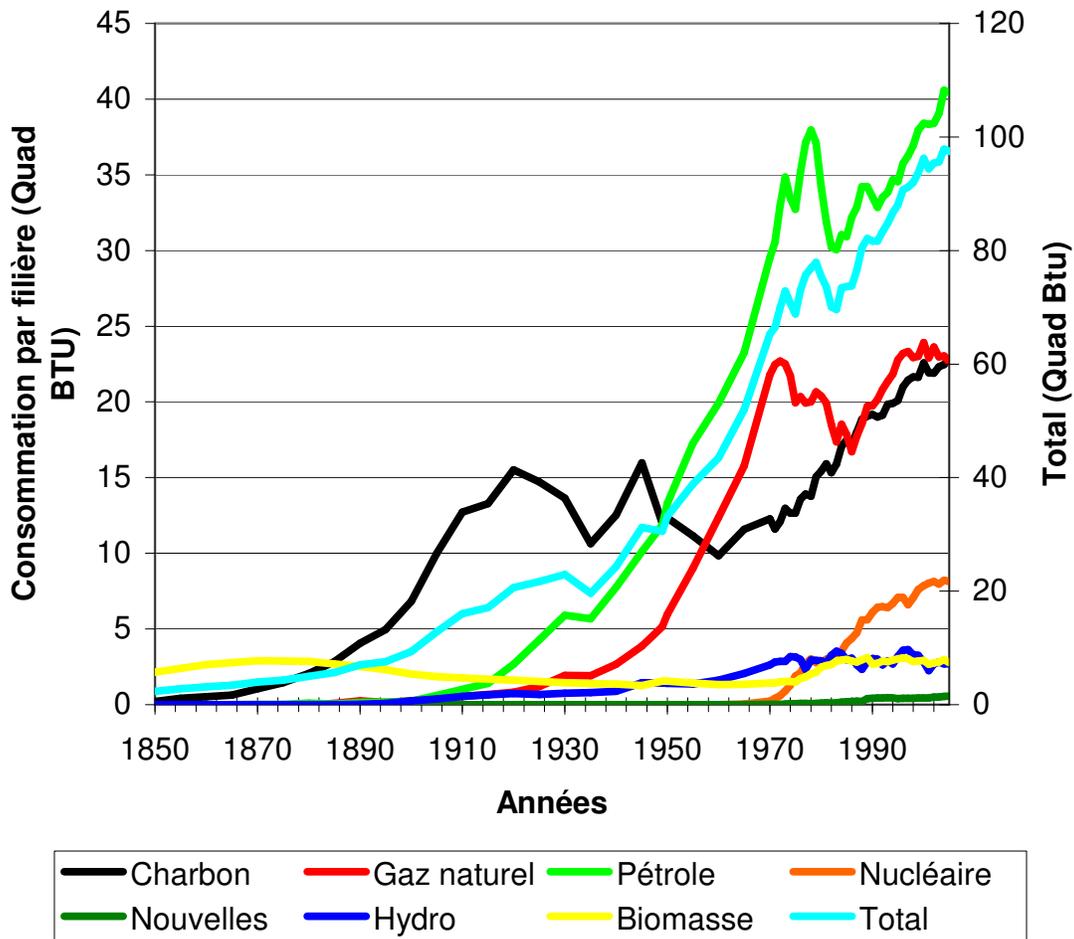
Figure 7: Part de marché par filière (États-Unis)



La figure 7 permet de comparer la consommation de chaque filière l'une par rapport à l'autre. C'est avec cet outil qu'il est possible de voir les substitutions relatives des filières. Il est clair que la substitution relative du bois par le charbon fut suivie par la substitution de ce dernier par plusieurs sources : le pétrole d'abord, le gaz ensuite. Après les chocs pétroliers, le charbon reprit des parts de marché au pétrole et au gaz naturel. L'hydroélectricité, apparue vers la fin du 19^{ième} siècle, la biomasse ainsi que les sources nouvelles (éolien, solaire, géothermie...) n'occupent que très peu d'espace dans le bilan au début du troisième millénaire. Seules ces dernières sont renouvelables et ont la possibilité de remplacer les sources non-renouvelables pour l'instant. Théoriquement, le potentiel de celles-ci serait suffisant pour fournir l'énergie nécessaire mais d'autres contraintes comme l'intermittence, les coûts, la disponibilité de matériaux en quantités suffisantes, pour ne citer que celles-là, portent à croire qu'il sera difficile pour les États-Unis de substituer réellement les sources actuelles par des sources alternatives.¹⁶

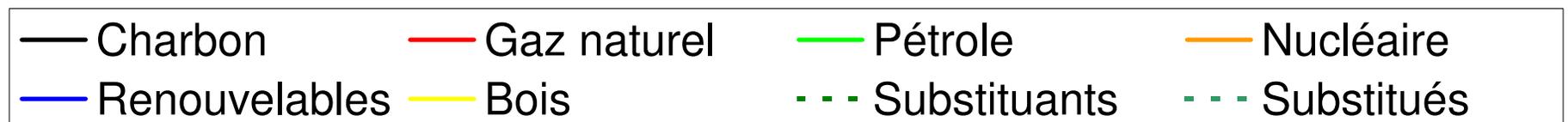
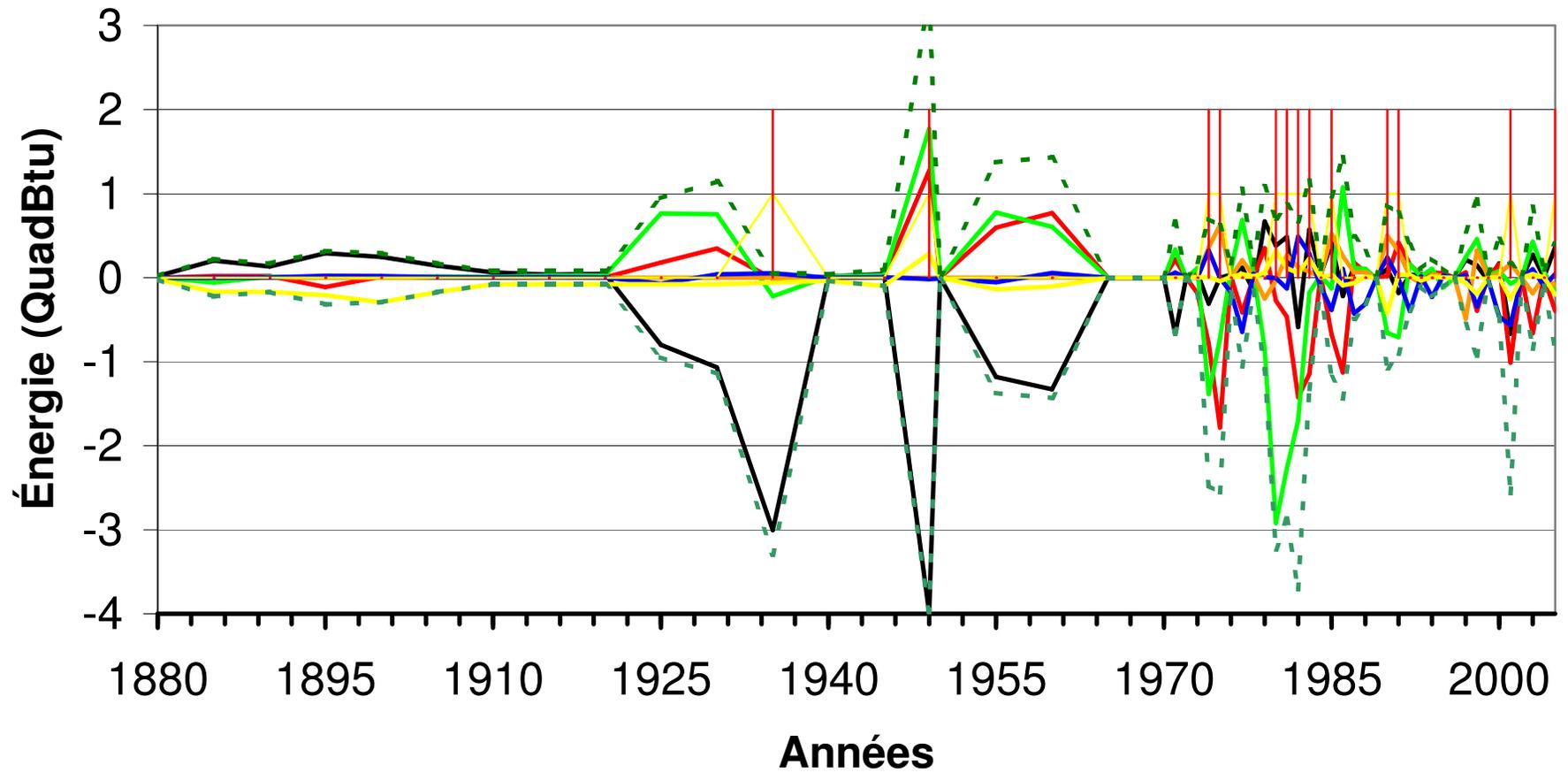
¹⁶ Ted Trainer, Renewable Energy Cannot Sustain a Consumer Society, Springer 2007

Figure 8: Consommation d'énergie par filière (États-Unis)



La figure 8 est constituée simplement de courbes de consommation d'énergie en fonction du temps. Il faut lui adjoindre un graphique de substitution effective (figure 9), pour observer les moments où il y a eu substitution réelle et avec quelle ampleur. Lorsque les courbes descendent dans la partie négative, les filières qui leurs sont associées se font remplacer par les filières dont les courbes sont dans la partie positive au même moment. Lorsque qu'il n'est pas possible de substituer entièrement les sources dans la partie négative, c'est qu'il y a diminution de la consommation totale, donc économie d'énergie effective. Cela est représenté par les barres verticales rouges. Les courbes en pointillés représentent la somme de l'ensemble des résultats positifs (substituants) ou la somme des résultats négatifs (substitués) et indiquent l'ampleur de la substitution.

Figure 9: Substitution par filière 1880-2005 (États-Unis)



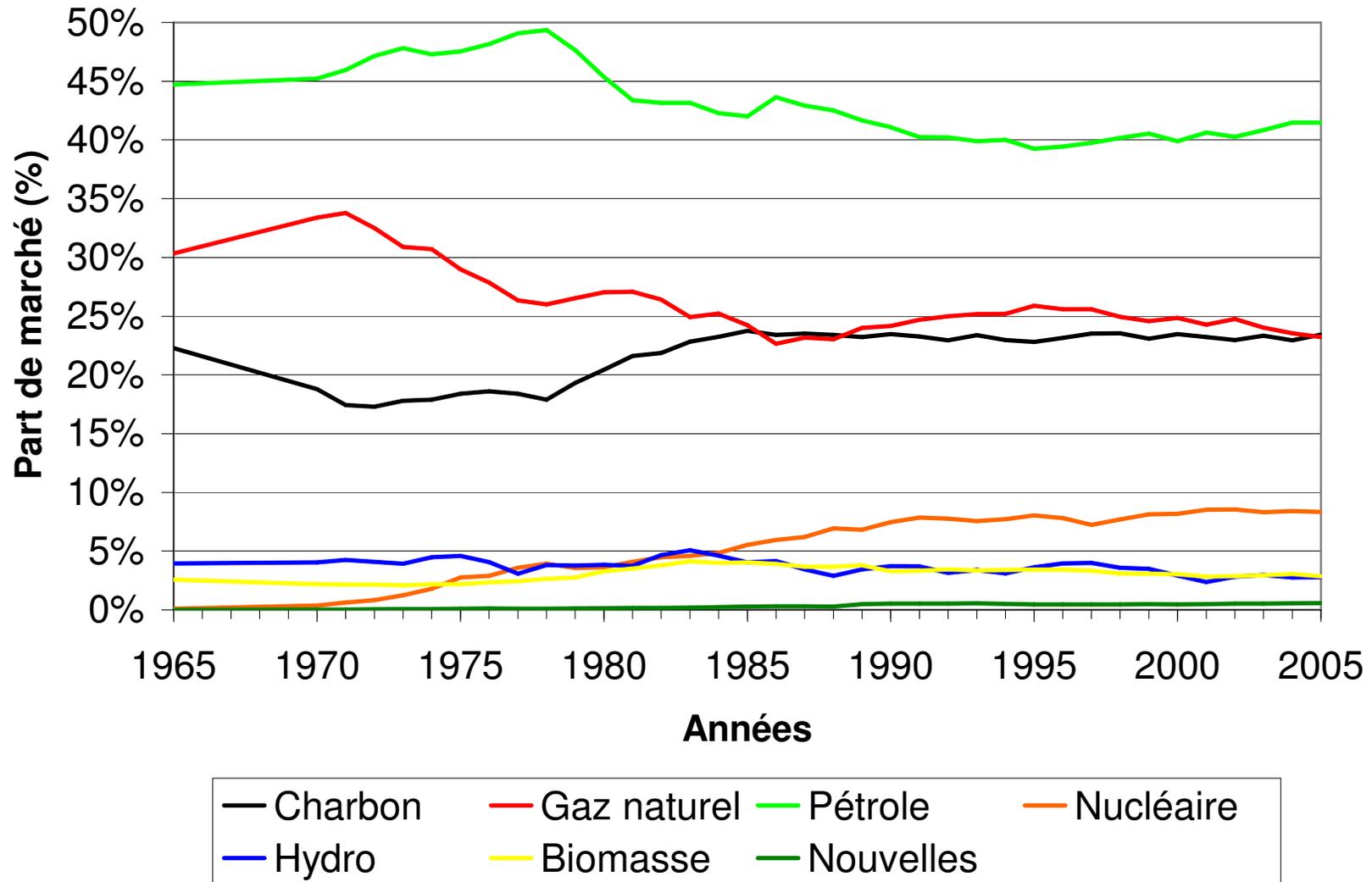
Les figures 14 et 15 permettent d'observer une substitution effective aux États-Unis à partir 1875. Le remplacement du bois, en déclin à cause de sa surexploitation, par le charbon au début et par le pétrole et le gaz naturel par la suite se maintient jusqu'au milieu des années 1970, soit sur une période de près de 100 ans. Suite aux deux chocs pétroliers, la biomasse reprendra sa production d'avant la substitution. Celle-ci est effectivement possible aujourd'hui, sans surexploitation, grâce à de nouvelles superficies dans l'ouest qui n'avaient pas été utilisées à l'époque, étant donné les coûts de transport importants; les industries consommatrices de biomasse étant situées principalement sur la côte est. À partir des années 1970, l'augmentation de l'utilisation de la biomasse n'a occasionné de substitution que pour une quinzaine d'années durant la période des chocs pétroliers.

La grande dépression des années 1930 a engendré un recul de la consommation totale d'énergie. La croissance de celle-ci a toutefois repris pour répondre aux besoins engendrés par la 2^{ième} guerre mondiale et s'est maintenue par la suite jusqu'aux chocs pétroliers des années 1970.

Une substitution du charbon a eu lieu pendant environ 30 ans, de la fin de la seconde guerre mondiale jusqu'à l'amorce du premier choc pétrolier. Il a alors été remplacé par le pétrole et le gaz naturel. Une réorganisation de la production industrielle autour de ces sources à plus grande densité énergétique et meilleure facilité d'utilisation est à la base de cette substitution. La hausse des prix du pétrole et l'augmentation de la consommation d'électricité ont contribué au retour du charbon lequel se prêtait aisément à la production d'électricité. Le charbon n'a pas connu de nouvelle substitution par la suite sauf pendant la courte période des chocs pétroliers.

Le pétrole et le gaz naturel ont été substitués principalement par le charbon durant la période des chocs pétroliers. Le nucléaire et la biomasse ont aussi participé à cette substitution mais dans une moindre mesure que le charbon. La production d'hydroélectricité quant-à-elle, est restée relativement stable alors que les nouvelles sources d'énergie (solaire, éolien, géothermie...) ont été et sont encore à ce jour très marginales.

**Figure 10: Part de marché par filière
1965-2005 (États-Unis)**



**Figure 11: Consommation d'énergie par filière
1965-2005 (États-Unis)**

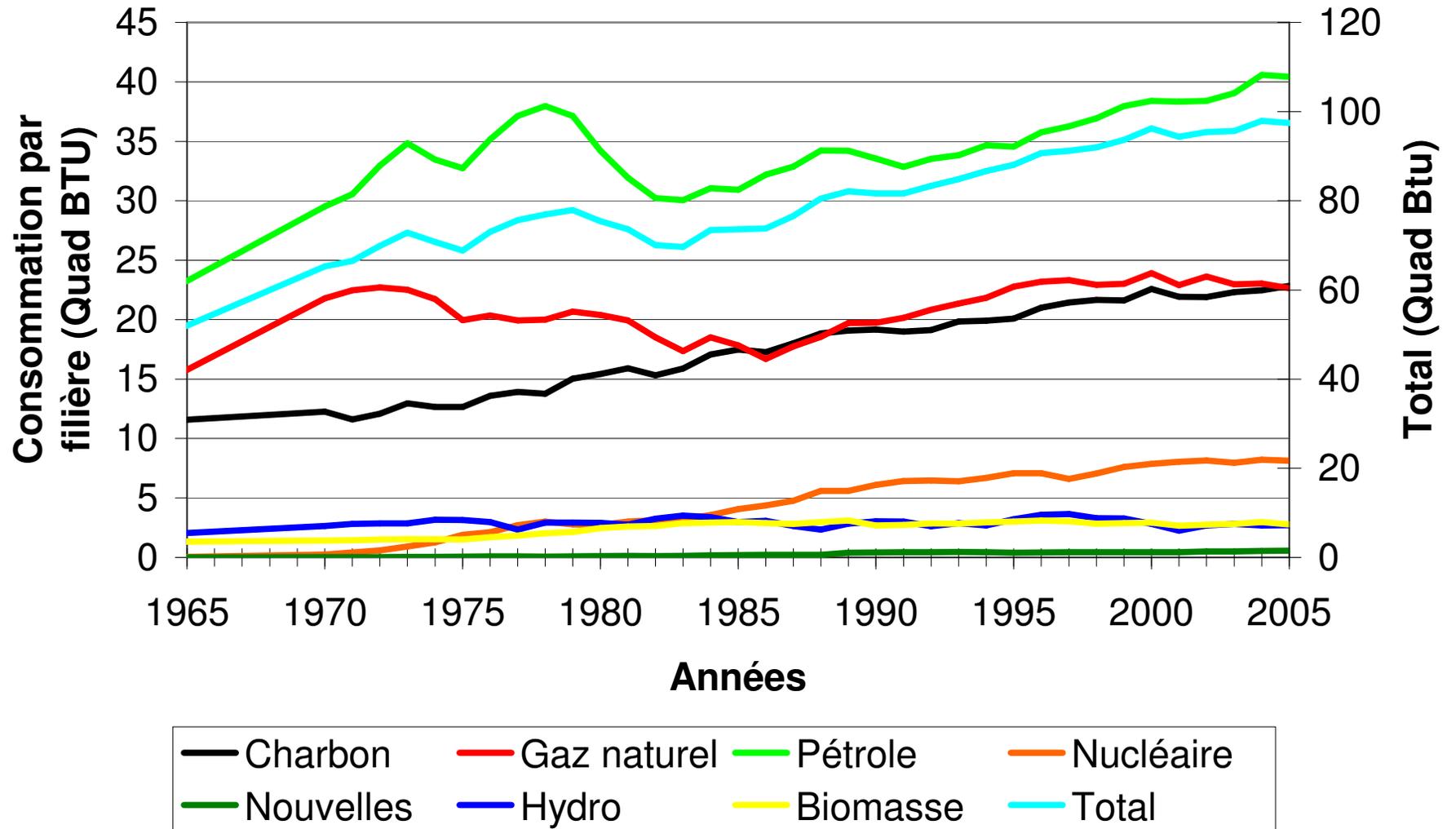
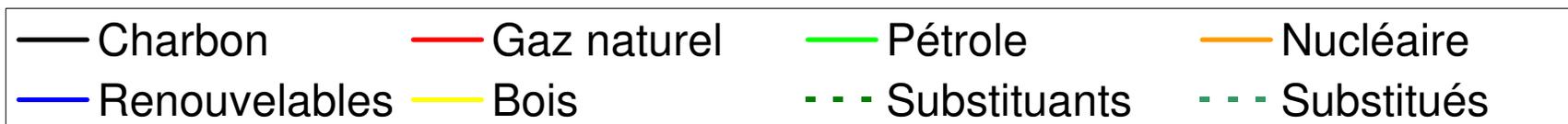
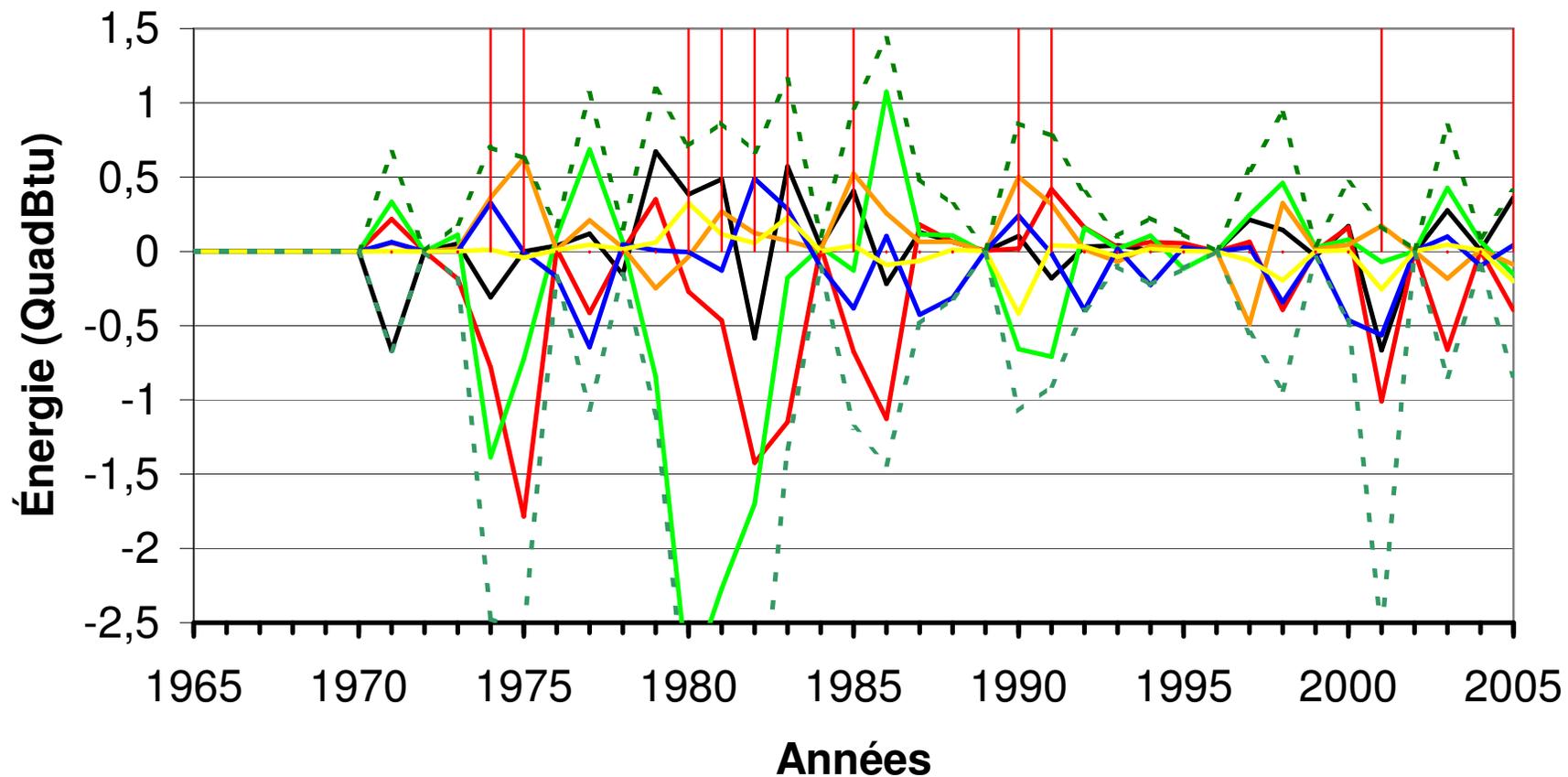


Figure 12: Substitution par filière 1965-2005 (États-Unis)



Sur les trois graphiques précédents (figure 10, 11 et 12), nous avons changé la plage de temps pour débiter les observations en 1965, une période de temps plus représentative de notre mode de vie «moderne».

La consommation totale d'énergie est en constante augmentation mais, depuis 2000, le taux d'augmentation a légèrement diminué. La baisse de la production des sources renouvelables d'énergie a été compensée par la production d'électricité d'origine nucléaire depuis 1997. La production à partir de biomasse est stable de 1965 à 2005. Le gaz naturel semble subir une substitution aux États-Unis depuis 2000. La compensation se fait par une augmentation de la consommation de pétrole et de charbon dans une moindre mesure. L'atteinte du pic gazier à l'échelle de l'Amérique du nord en 2001 ainsi que la hausse des prix du gaz peuvent probablement expliquer cette substitution¹⁷. L'importation de gaz naturel liquéfié provenant d'ailleurs dans le monde ne compensera pas la perte occasionnée par le déclin du gaz à l'échelle du continent américain.¹⁸ Il est fort probable que cette substitution du gaz naturel par d'autres sources devienne permanente¹⁹.

À partir de la figure 12, on peut observer onze substitutions effectives dont nous avons résumé les composantes sur le tableau 3 qui suit. Sur ce dernier, nous avons inscrit l'année de la substitution, les sources substituées, les sources substituantes, la diminution de la consommation d'énergie totale s'il y a lieu, l'ampleur de la substitution totale, la durée de la substitution pour chaque filière substituée et des informations mettant en perspectives les conditions de la substitution.

¹⁷J. David Hughes, Natural Gas in North America: Should We be Worried?, Geological Survey of Canada, World Oil Conference, ASPO – USA, Boston, Massachusetts, October 26, 2006

Darley, Julian, High noon for natural gas: the new energy crisis, Chelsea Green, 2004.

¹⁸ Id.

¹⁹ Id.

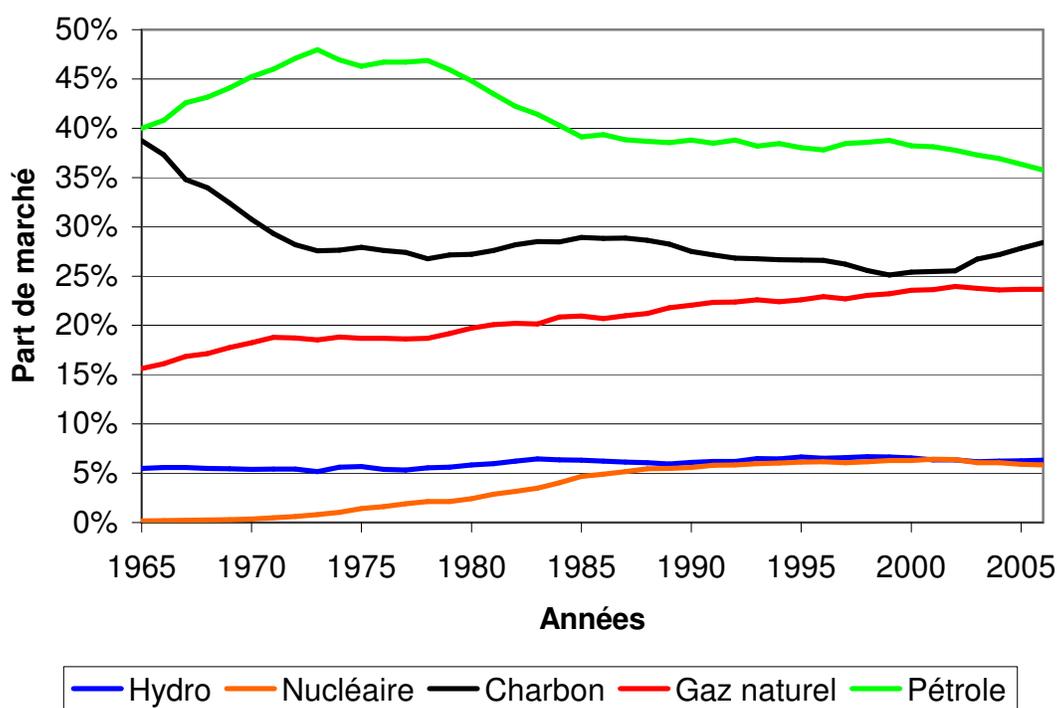
Tableau 3

	Année	Substituées	Substituants	*Économie d'énergie	Ampleur	Durée (années)	Notes
1	1971	Charbon	Pétrole/gaz naturel/renouvelables	Non	Faible	1	
2	1974-75	Gaz Pétrole Charbon	Nucléaire/renouvelables*	Oui	Forte	3 17 1	1 ^{er} choc pétrolier (pénurie temporaire)
3	1977	Renouvelables Gaz	Pétrole/nucléaire/charbon	Non	Moyenne	1 2	
4	1979-83	Pétrole Gaz	Charbon/renouvelables/bois/nucléaire*	Oui	Très forte	22 11	2 ^{ème} choc pétrolier (pénurie temporaire)
5	1986	Gaz Renouvelables	Pétrole/nucléaire/charbon*	Oui	Moyenne	3 4	
6	1990-91	Pétrole Bois Charbon	Nucléaire/gaz*	Oui	Moyenne	5 5 1	1 ^{ère} guerre d'Irak
7	1994	Renouvelables	Pétrole/gaz/nucléaire	Non	Faible	2	
8	1998	Gaz Renouvelables Bois	Pétrole/charbon	Non	Moyenne	2 en cours 2	
9	2001	Gaz Charbon Renouvelables Bois Pétrole	Nucléaire*	Oui	Forte	1 3 en cours 4 1	
10	2003	Gaz Nucléaire	Pétrole/charbon/renouvelables	Non	Moyenne	En cours 1	Pic gazier américain (pénurie temporaire ou permanente)
11	2005	Gaz Bois Pétrole Nucléaire	Charbon*	Oui	Moyenne	-----	

Le monde

Les données pour le monde proviennent de British Petroleum (BP)²⁰ et s'étendent sur une plage de 1965 à 2006. Pour la très grande majorité des pays et des nations, les sources d'énergie actuelles sont principalement d'origines non-renouvelables (pétrole, gaz naturel, charbon et uranium). Elles constituent d'ailleurs près de 95% du bilan de la consommation mondiale (excluant le bois encore beaucoup utilisé dans les pays sous-développés)²¹. Elles sont en bonne partie transigées sur le marché et les prix sont fixés par ce dernier. Il est donc important d'observer ce qui se passe au niveau mondial pour prévoir l'avenir de ces sources d'énergie.

Figure 13: Part de marché par filière (monde)



Sur la figure 13, on observe que depuis les chocs pétroliers, le pétrole cède des parts de marché (substitution relative) en faveur principalement du gaz et du nucléaire et depuis peu, du charbon. Le charbon avait quant à lui cédé des parts de marché importantes avant les chocs pétroliers. En analysant uniquement les parts de marché, il apparaît que nous soyons relativement moins dépendants du pétrole qu'auparavant. Mais le sommes-nous réellement?

²⁰ BP Statistical Review of World Energy June 2007, www.bp.com/statisticalreview

²¹ Agence Internationale de l'Énergie (AIE), World Energy Outlook 2006, novembre 2006.

Figure 14: Consommation d'énergie par filière (monde)

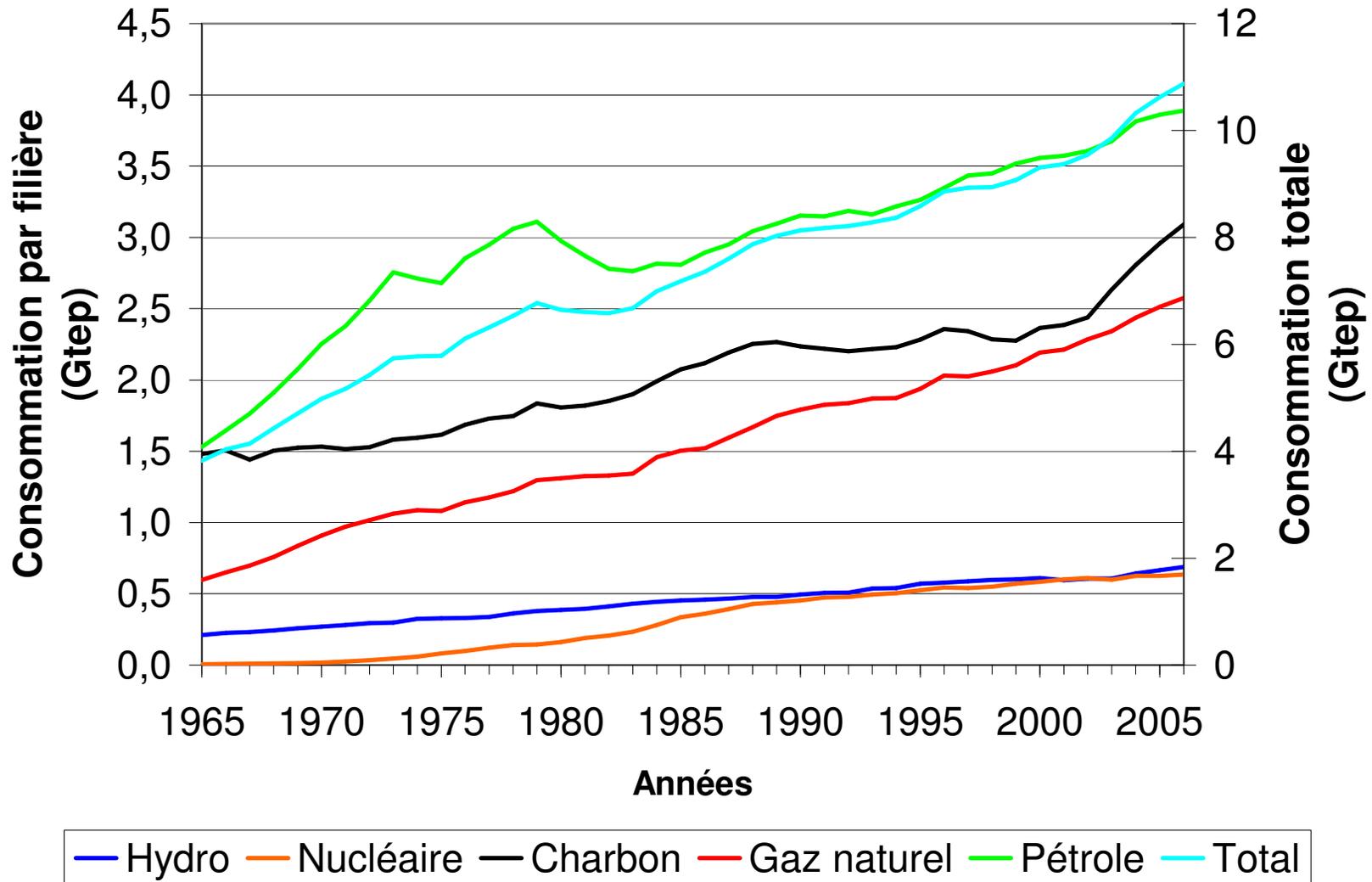
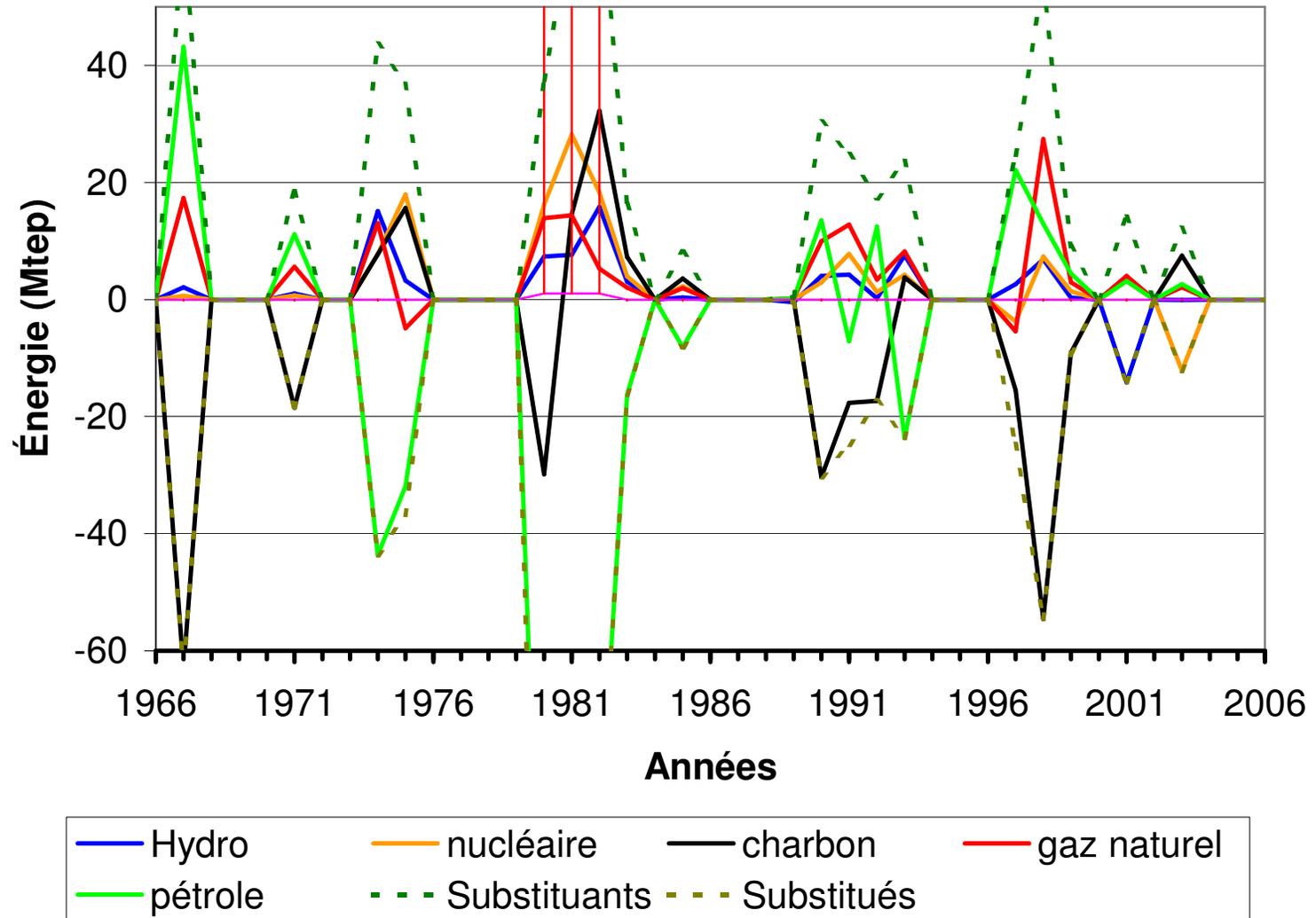


Figure 15: Substitution par filière Monde



Les figures 14 et 15 permettent d'observer que le pétrole a subi une faible substitution temporaire (environ 10 ans) après le second choc pétrolier (1979), cela au profit de l'ensemble des filières, une substitution d'ailleurs plus faible qu'aux États-Unis. Après cette période, la consommation de toutes les sources, incluant le pétrole, est en progression très forte. À partir de 2002, il y a hausse significative du taux de croissance de la consommation d'énergie, dont la plus remarquable est celle du charbon. La forte industrialisation de la Chine et de l'Inde explique probablement cette augmentation du taux de la hausse de consommation²². Il est à noter que la Chine possède de très grandes réserves de charbon²³.

Si l'on exclut la substitution temporaire du pétrole, il n'y a aucune substitution effective d'énergie à long terme. Malgré l'augmentation de la production de sources d'énergie plus propre au niveau des gaz à effet de serre (GES) comme le gaz naturel, le nucléaire ou les sources renouvelables, il n'y a, à l'échelle mondiale, aucun déplacement de l'utilisation des sources plus polluantes. Toutes les sources s'ajoutent et contribuent à la croissance peu importe leur provenance. L'accroissement de l'utilisation de sources «propres» d'énergie (éolien, solaire, gaz naturel...)²⁴ ne contribue donc pas à la diminution de gaz à effet de serre comme on le suppose à priori, du moins au niveau mondial. Elle semble plutôt donner à l'économie mondiale une possibilité de croissance que ne lui permettrait pas la seule utilisation des sources fossiles d'énergie.

Le tableau 4 résume l'ensemble des neuf substitutions effectives qui se sont produites dans le monde entre 1965 et 2006.

²² Selon les données du BP Statistical Review of World Energy, depuis 2002 la Chine a accru sa consommation de charbon de 75% et l'Inde de 38% tandis que le monde a accru de 30%.

²³ Agence Internationale de l'Énergie (AIE), World Energy Outlook 2006, novembre 2006.

²⁴ BP Statistical Review of World Energy 2007 : Renewables

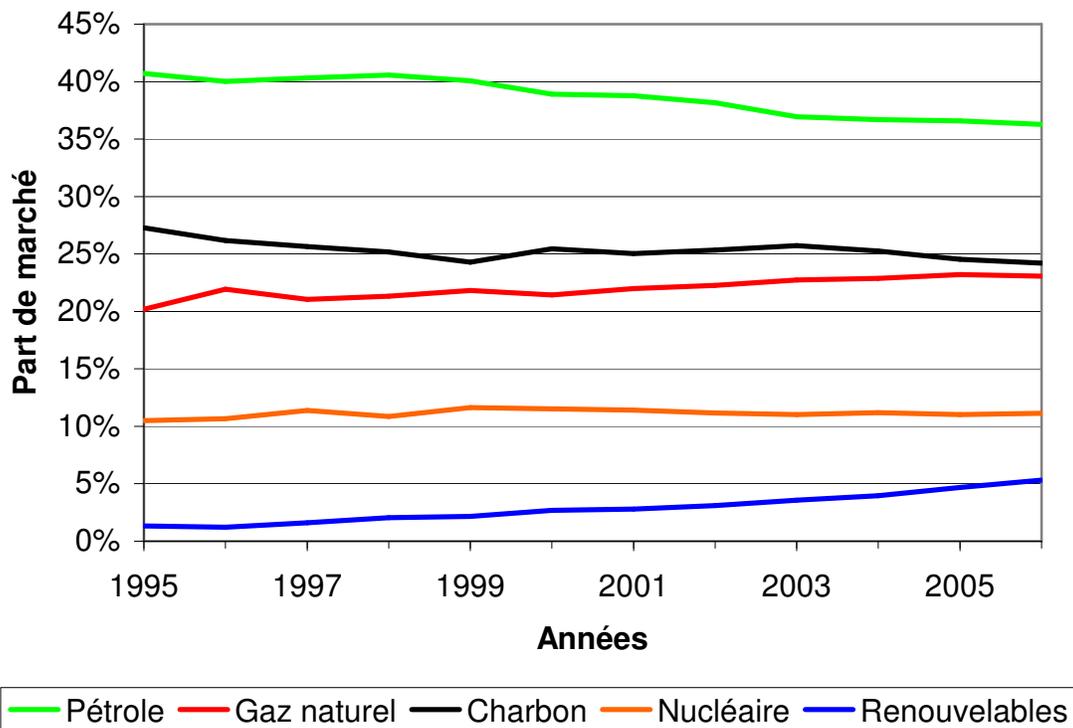
Tableau 4

	Année	Substituées	Substituants	*Économie d'énergie	Ampleur	Durée (années)	Notes
1	1967	Charbon	Pétrole Gaz naturel Hydro	Non	Fort	2	
2	1971	Charbon	Pétrole Gaz naturel	Non	Faible	1	
3	1974	Pétrole	Nucléaire Charbon Hydro Gaz naturel	Non	Fort	2	Premier choc pétrolier
4	1980-82	Pétrole	Charbon Nucléaire Gaz naturel Hydro	Oui	Très fort	10	Second choc pétrolier
5	1985	Pétrole	Charbon Gaz naturel	Non	Faible	1	
6	1990-93	Charbon	Gaz naturel Nucléaire Hydro	Non	Moyenne	6	
7	1998	Charbon	Gaz naturel Pétrole Hydro Nucléaire	Non	Fort	3	
8	2001	Hydro	Gaz naturel Pétrole	Non	Faible	3	
9	2003	Nucléaire	Charbon Pétrole Gaz naturel	Non	Faible	1	

Allemagne

L'Allemagne a été choisie comme exemple inverse des politiques énergétiques de libre marché, comme aux États-Unis ou dans le monde par exemple. L'Allemagne a été le successeur des États-Unis comme leader de l'alternative énergétique à partir des années 1980 jusqu'à aujourd'hui²⁵. En 2006, ce pays était dépendant à environ 95% de sources non-renouvelables d'énergie, ce qui explique l'intérêt des allemands à se doter de sources renouvelables d'énergie. Les données proviennent du Federal Statistical Office Germany²⁶ ainsi que de BP²⁷.

Figure 16 Part de marché par filière (Allemagne)



Sur la figure 16, on peut observer que les parts de marché des sources les plus polluantes, comme le pétrole et le charbon, sont en régression. La part de marché du nucléaire est stable alors que celles du gaz naturel et des renouvelables sont en progression. On sait aussi que le bilan CO₂ est en diminution en Allemagne, conformément au protocole de Kyoto. Mais comment cela se traduit-il réellement?

²⁵ Deutsche Welle, Report: German Companies World-Leaders in Renewable Energy, 2007.

²⁶ Federal Statistical Office Germany, Share of renewable energy sources in primary energy consumption, 2007.

²⁷ BP Statistical Review of World Energy June 2007, www.bp.com/statisticalreview

Figure 17 Consommation d'énergie par filière (Allemagne)

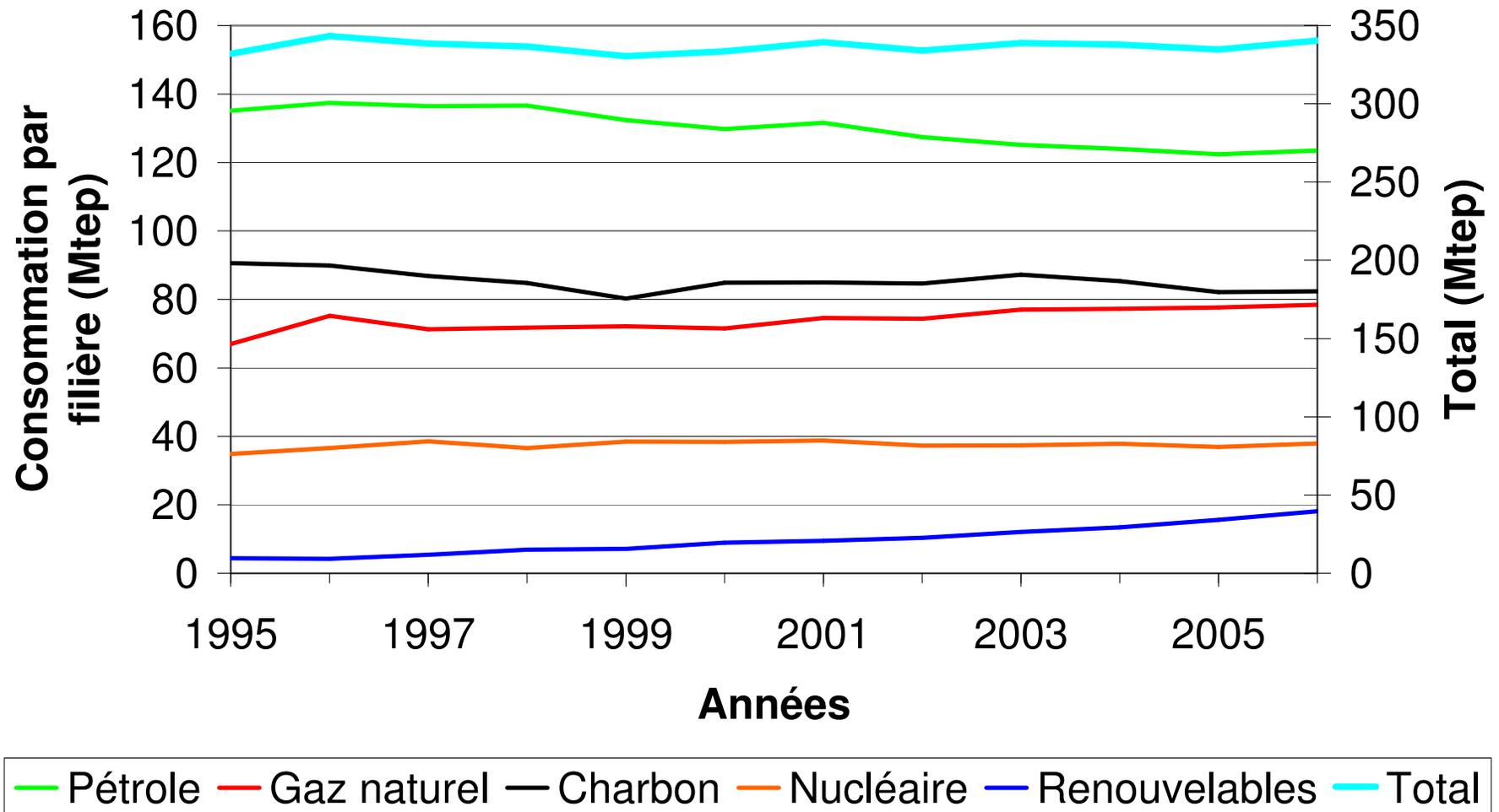
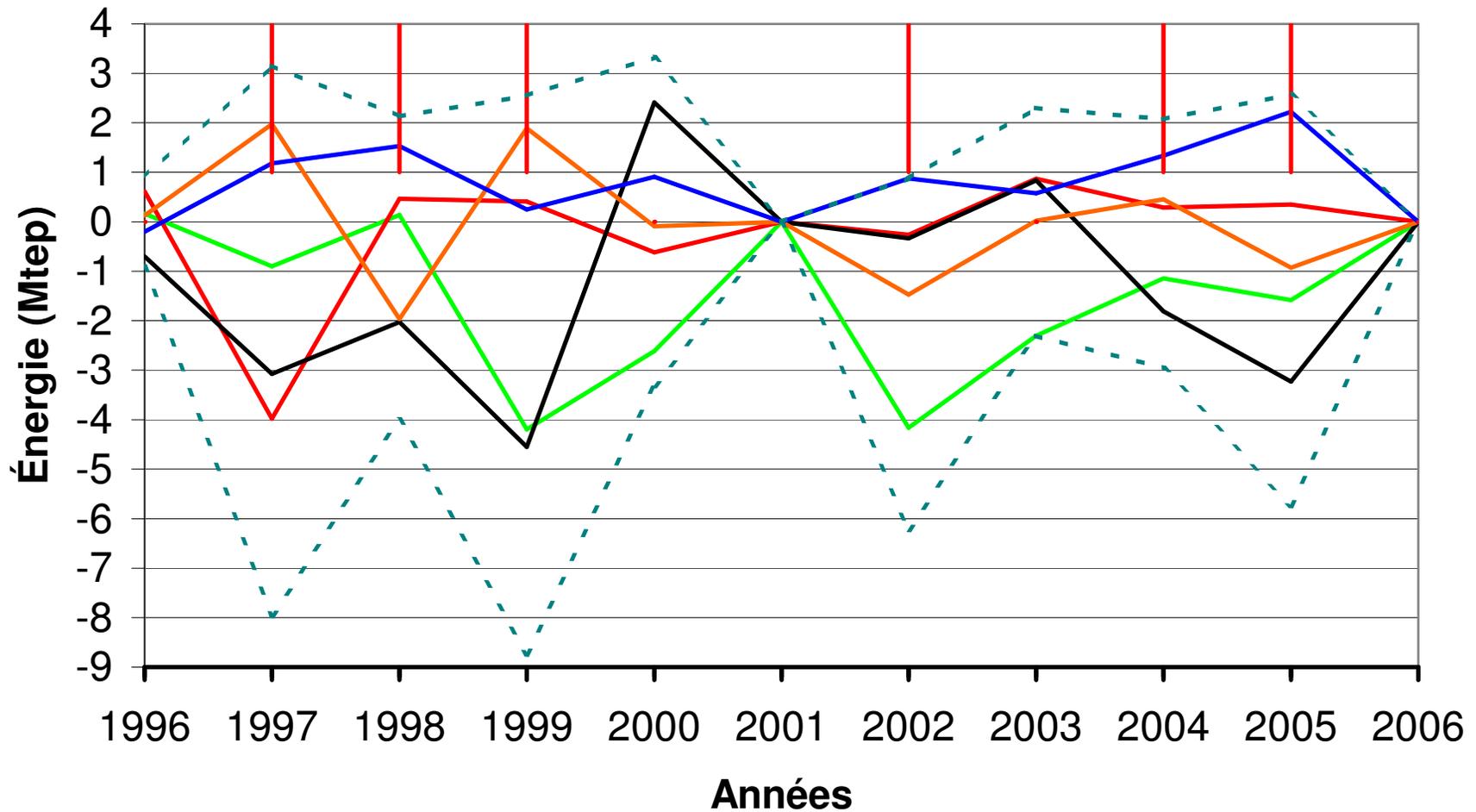


Figure 18 Substitution par filière (Allemagne)



Le cas de l'Allemagne est très intéressant au point de vue de la substitution. C'est l'un des rares pays à maintenir une croissance économique, quoique faible par rapport aux autres pays européens²⁸, tout en ayant stabilisé sa consommation totale d'énergie et ayant réussi à réellement substituer des sources plus propres d'énergie à celles plus polluantes au niveau des GES. Mais avec actuellement 83,6% de sources fossiles d'énergie, 88,2% en 1995, les efforts dans le sens de la substitution et de l'efficacité énergétiques devront être plus importants surtout considérant le déclin futur de la production de ces sources fossiles²⁹.

La consommation totale d'énergie de l'Allemagne est stable. En dix ans, la décroissance réelle de la consommation a été de 11% pour le pétrole et de 9% pour le charbon. Toujours en dix ans, la hausse de consommation a été de 17% pour le gaz naturel et de 300% pour les sources renouvelables. En 2000, le gouvernement de Gerhard Schröder a pris la décision d'éliminer progressivement le nucléaire et la première centrale a été fermée en novembre 2003³⁰. Le remplacement du nucléaire conjugué avec les problèmes européens d'approvisionnement en gaz naturel, forceront les allemands à redoubler d'effort pour développer les sources renouvelables d'énergie.

Cette réussite de la substitution, du moins jusqu'à maintenant, s'explique en grande partie par une législation (Subventions R&D³¹, Feed-in tariff system³²...) permettant l'innovation technologique dans les équipements de production d'énergie renouvelable. Les coûts supplémentaires engendrés sont répartis sur l'ensemble des consommateurs. Cette législation a permis la production d'une énergie moins émettrice de GES dans le sens du respect du protocole de Kyoto. Elle a aussi favorisé le développement d'une expertise technologique qui est aujourd'hui exportée à travers le monde³³. Au plan économique, la balance commerciale allemande profite de la diminution des importations d'énergie étrangère et de l'augmentation de l'exportation de technologie et d'équipements de production d'énergie renouvelable³⁴.

²⁸ Croissance PIB réel (1998-2007) Allemagne : 1,3%; France : 2,2 %; Royaume-Uni : 2,7% (Eurostat)

²⁹ Robert L. Hirsch, Peaking of world oil production: Recent forecasts, DOE NETL, April 2007.

National Petroleum Council (US), Facing The Hard Truths About Energy, July 2007.

Government Accountability Office, CRUDE OIL: Uncertainty about Future Oil Supply Makes It Important to Develop a Strategy for Addressing a Peak and Decline in Oil Production, February 2007.

Agence internationale de l'énergie, Medium Term Oil Market Report, July 2007.

World Energy Council, Survey of Energy Resources 2007, september 2007.

Energy Watch Group, Uranium resources and nuclear energy, December 2006 EWG-Series No 1/2006

Energy Watch Group, Coal: Resources and Future Production (April, 2007).

Robelius, F. 2007. Giant Oil Fields -The Highway to Oil. Giant Oil Fields and their Importance for Future Oil Production. Acta Universitatis Upsaliensis. *Digital Comprehensive Summaries of Uppsala Dissertations from the Faculty of Science and Technology* . 168 pp. Uppsala.

Darley, Julian, High noon for natural gas: the new energy crisis, Chelsea Green, 2004.

Dr. Albert Bartlett: Arithmetic, Population and Energy <http://globalpublicmedia.com/node/461>

³⁰ AFP, German nuclear energy phase-out begins with first plant closure, novembre 2003.

³¹ Joint Global Change Research Institute, Renewable Energy Policy in Germany: An Overview and Assesment, 2005.

³² Dr. Mario Ragwitz, Dr. Claus Huber , Feed-In Systems in Germany and Spain and a comparison, Fraunhofer Institut für Systemtechnik und Innovationsforschung, 2005.

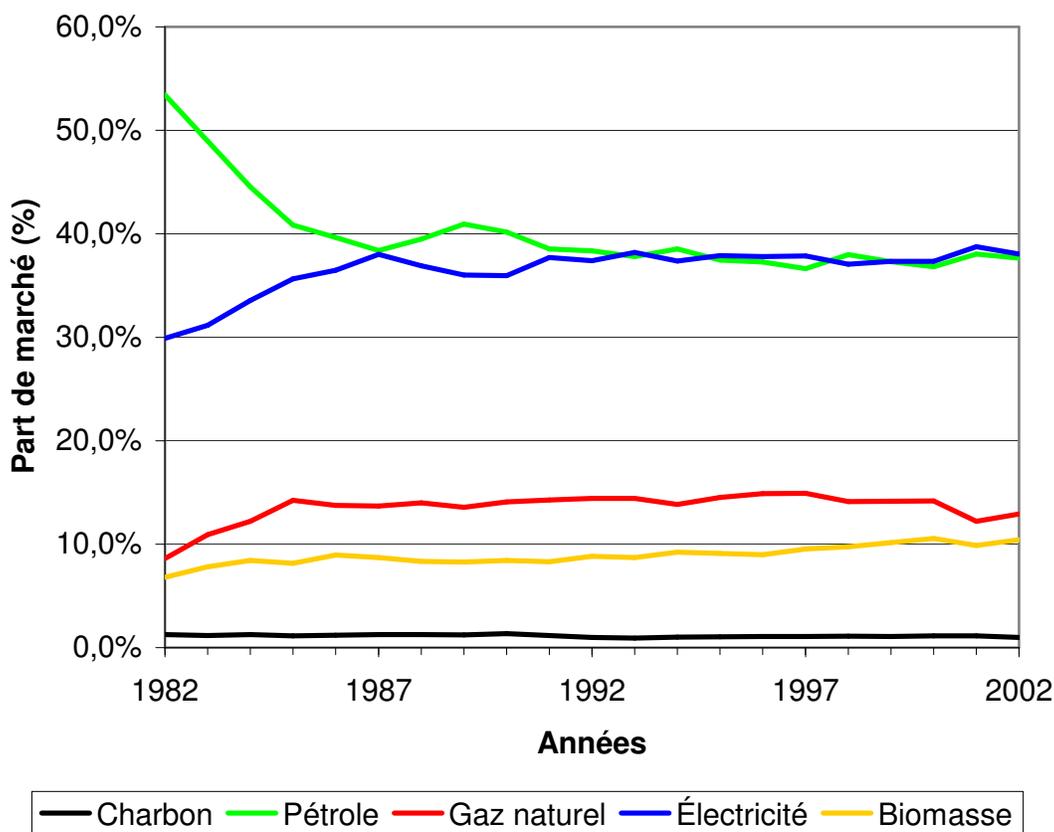
³³ Deutsche Welle, Report: German Companies World-Leaders in Renewable Energy, 2007.

³⁴ Id.

Québec

Le Québec a été le théâtre d'une substitution énergétique très intéressante durant les années 1980. Les données étudiées proviennent du ministère des Ressources naturelles et de la Faune du Québec³⁵.

Figure 19 Part de marché des filières (Québec)



Avant les deux chocs pétroliers des années 1970, le mazout constituait une source importante de chauffage pour les ménages québécois. L'apparition du gaz naturel dans le paysage québécois et les grands projets hydroélectriques de la Baie-James ont permis, durant les mêmes années, de dégager un surplus de production énergétique qui a été mis à contribution pour la substitution du pétrole. Une réduction de la consommation de pétrole d'environ 30% a été observée. Un encadrement législatif, ainsi que des tarifs

³⁵Ministère des Ressources naturelles et de la Faune du Québec, L'énergie au Québec 2004.

www.mrnf.gouv.qc.ca/publications/energie/energie/energie-au-quebec-2004.pdf

Ministère des Ressources naturelles et de la Faune du Québec, Évolution de la demande d'énergie au Québec, Scénario de référence, horizon 2016.

www.mrnf.gouv.qc.ca/energie/energie/energie-prevision.jsp

d'hydroélectricité, parmi les plus bas sur la planète, auront effectivement permis de réduire considérablement l'utilisation de pétrole³⁶. Sans trop en être conscient, le Québec était à l'avant-garde de la lutte contre le réchauffement climatique bien avant la propagation publique du concept lui-même. À l'époque, l'argument était économique et non pas environnemental.

La réalité de la consommation d'énergie québécoise ne colle pas au discours «environnemental» souvent entendu au Québec.³⁷ En effet, depuis 1991, la courbe de la consommation d'électricité (à plus de 95% d'origine hydraulique) et celle du pétrole se suivent. Le charbon demeure peu présent dans le bilan énergétique québécois. La biomasse, provenant des résidus forestiers principalement, croît constamment. La consommation de gaz naturel, en légère augmentation depuis 1985, diminue à partir de 2000 probablement pour les mêmes raisons invoquées aux États-Unis (hausse des prix et déclin de la production nord-américaine).

La durée de la substitution du pétrole par l'hydroélectricité et le gaz naturel n'aura été que d'environ 25 ans. Elle aura cessé d'être observée principalement à cause de la hausse constante de la demande d'énergie dans le secteur des transports³⁸. Bien que nous soyons mieux positionnés que la majorité des pays industrialisés, nous sommes encore à dépendant à 52% de sources fossiles d'énergie.

Tableau 5

	Année	Substituées	Substituants	*Économie d'énergie	Ampleur	Durée (années)	Notes
1	-1986	Pétrole	Hydro/gaz naturel	Non	Fort	22**	Second choc pétrolier
2	1987	Pétrole Biomasse	Hydro	Non	Faible	1 1	
3	1991	Pétrole Biomasse	Aucun	Oui	Fort	9 2	1 ^{ère} guerre d'Irak
4	1995	Pétrole Biomasse	Gaz naturel/hydro	Oui	Faible	4 1	
5	1998	Hydro Gaz naturel	Pétrole/biomasse	Oui	Moyenne	2 3	
6	2001	Gaz naturel Biomasse	Hydro/pétrole	Oui	Fort	3** 1	

** Selon la projection de la hausse de consommation et les données débutants en 1982. Les données du ministère des Ressources naturelles après 2003 ne sont pas encore disponibles.

³⁶ Hydro-Québec, Rapport sur le développement durable 2002.

³⁷ Cardinal, François, *Le mythe du Québec vert*, Les Éditions Voix Parallèles, 2007.

³⁸ Ministère des Ressources naturelles et de la Faune du Québec, *L'énergie au Québec 2004*.

Figure 20 Consommation d'énergie totale et par filière (Québec)

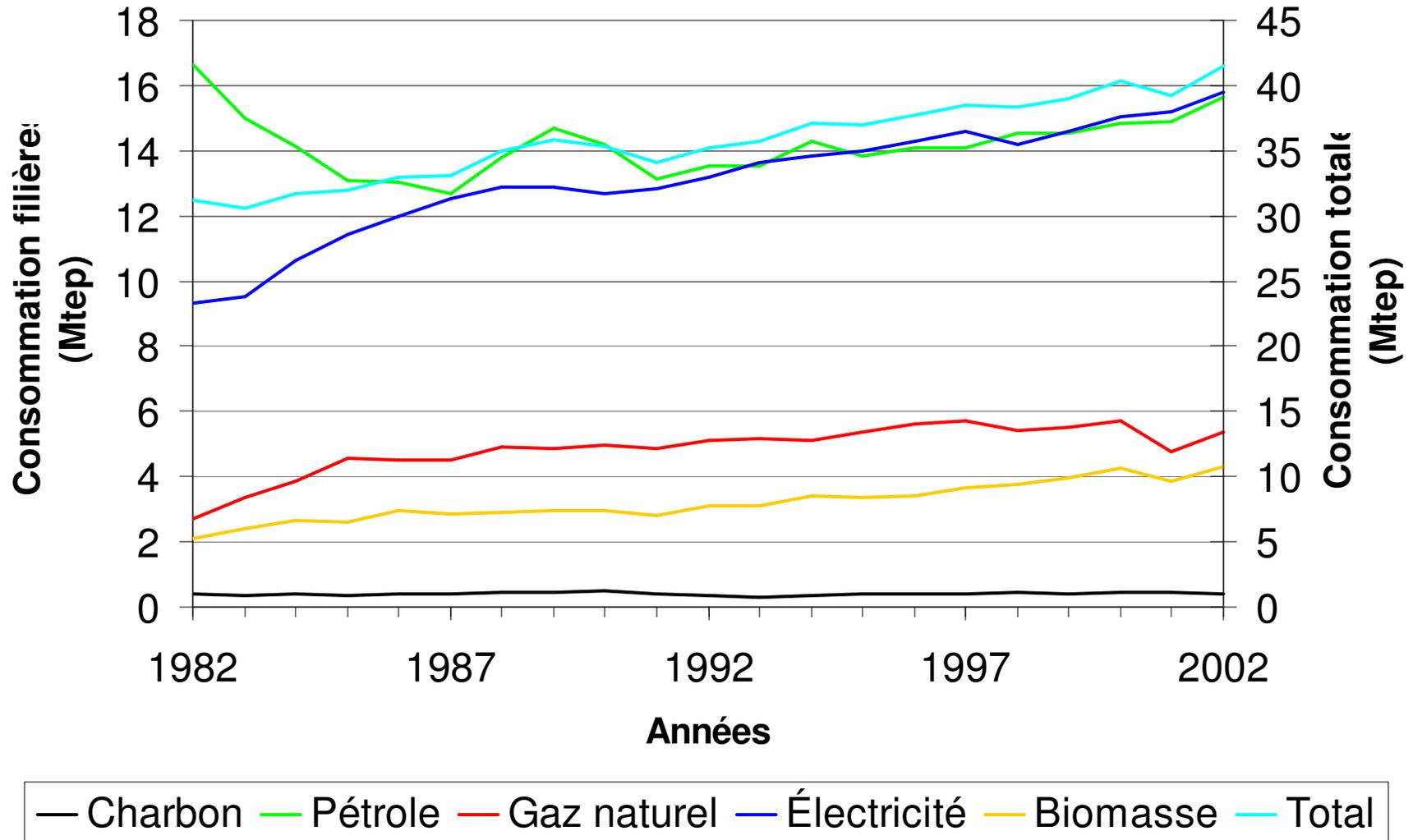
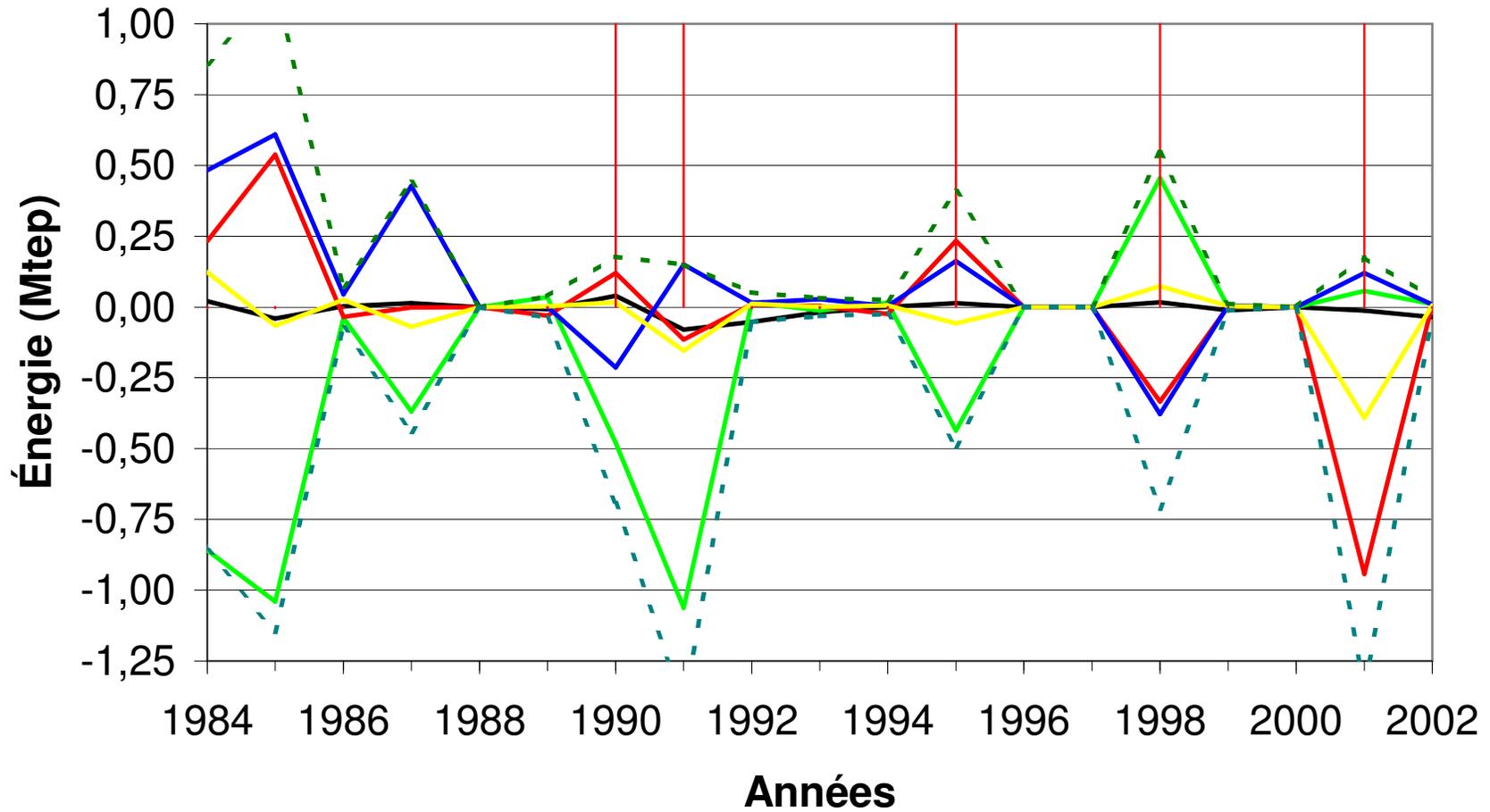


Figure 21 Substitution par filière Québec



Résultats

À partir des quatre zones géopolitiques étudiées, nous avons observé que les causes des substitutions effectives dont les impacts sont à court terme et à moyen terme (moins de 10 ans) sont difficiles à identifier parce qu'elles ne sont habituellement pas structurelles (changements profonds des infrastructures énergétiques par exemple). Les prix, la spéculation, la demande à court terme (pour renflouer les réserves stratégiques par exemple) ou les variations saisonnières du climat peuvent expliquer ces substitutions temporaires. Les substitutions à court terme peuvent notamment être attribuables à des fluctuations statistiques, donc donner simplement l'apparence de substitution.

La substitution effective, que ce soit pour la sécurité des approvisionnements ou pour la question du réchauffement climatique, n'est intéressante que dans la mesure où elle persiste sur une longue période (plus de 10 ans), car toute infrastructure énergétique requière une planification à long terme pour assurer sa rentabilité³⁹.

Dans le tableau 6, sont inscrites les substitutions effectives des entités géopolitiques que nous avons analysé et dont les durées de substitution sont égales ou supérieures à 10 ans.

Tableau 6 : Récapitulatif des substitutions effectives à long terme

Lieux	Années	Substitués	Durées (années)	Causes probables
États-Unis	1880-1910	Bois	~100	Pénurie de bois
États-Unis	1974-75	Pétrole	17	Premier choc pétrolier (pénurie artificielle)
États-Unis	1979-83	Pétrole Gaz naturel	22 11	Second choc pétrolier (pénurie artificielle)
Monde	1980-82	Pétrole	10	Second choc pétrolier (pénurie artificielle)
Allemagne	-2006	Pétrole Charbon	+11 +11	Politique d'encouragement au remplacement des sources polluantes.
Québec	-2004	Pétrole	+22	Second choc pétrolier, arrivée du gaz naturel et politique de transfert du chauffage vers l'hydroélectricité

L'analyse des données historiques nécessiterait une recherche extensive sur un plus grand nombre de pays ainsi que sur les causes des substitutions effectives observées. Les ressources dont nous disposons nous empêchent d'aller plus loin dans notre analyse. Toutefois, il est déjà possible de faire ressortir les grandes lignes des conditions favorisant la substitution réelle de sources d'énergie.

³⁹ Hirsch, R.L., Bezdek, R., Wendling, R. Peaking of World Oil Production: Impacts, Mitigation & Risk Management. DOE NETL. February 2005.

Quelles sont les conditions pour réussir une substitution ?

Pour permettre la lutte aux changements climatiques et faire face à la réduction de la production de pétrole dans un proche avenir et des autres sources non-renouvelables dans un avenir un peu plus lointain, la substitution effective de ces sources par des sources renouvelables ou des économies réelles d'énergie, devront inévitablement se faire.

Nous avons observé que le marché à lui seul ne peut réaliser une réelle substitution énergétique durable. Historiquement, les seules raisons qui ont entraîné une substitution effective d'une durée importante sont de deux ordres : soit lors d'un problème d'approvisionnement (guerre, récession ou pénurie de la source substituée), soit lorsque des dispositions législatives sont prises à cet effet (taxes ou subventions par exemple).

Pour réussir une substitution réelle à long terme, nous devons nous imposer la planification de cette substitution à tous les paliers décisionnels (municipal, régional, provincial...) sinon un problème d'approvisionnement nous l'imposera un jour. Donc, la condition préalable et nécessaire est la réalisation et l'implantation d'une **politique énergétique cohérente et intégrée** dont les caractéristiques sont les suivantes:

- 1- Elle s'adresse à la fois à la production **ET** à la consommation
- 2- Elle comporte des objectifs de substitution clairs, précis et mesurables
- 3- Elle comprend un cadre législatif approprié (feed-in tariff system, subventions, R&D...)
- 4- Elle fait l'objet d'un suivi du processus
- 5- Elle comprend des améliorations continues du cadre législatif
- 6- Elle prend en considération la «rentabilité à long terme» pour les promoteurs privés ou publics de sources de remplacement.

Conclusion

Nous avons pu observer que :

- Les prétentions concernant la diminution véritable des émissions de CO₂ des promoteurs de sources d'énergie émettant moins de gaz à effet de serre ne concordent pas avec la réalité. Dans le contexte actuel du libre marché, la production de ces sources nouvelles s'additionne à la production existante et ne la remplace pas.
- Laisser faire le marché n'amène d'aucune façon une substitution réelle à moyen et long terme, le marché étant trop gourmand de toute forme d'énergie quelle qu'elle soit.
- La croissance de l'économie mondiale commande une croissance extrêmement rapide de la consommation mondiale d'énergie surtout depuis le début du millénaire.
- Toutes les sources non-renouvelables d'énergie sont exploitées aux maximum de leur capacité.

La planification énergétique à long terme, une condition essentielle

Une planification énergétique à long terme est nécessaire pour réaliser une substitution énergétique effective comme on le voit actuellement en Allemagne et comme au Québec dans les années 1980.

Cette planification devra comporter les conditions suivantes :

- 1- Elle s'adresse à la fois à la production **ET** à la consommation
- 2- Elle comporte des objectifs de substitution clairs, précis et mesurables
- 3- Elle comprend un cadre législatif approprié (feed-in tariff system, subventions, R&D...)
- 4- Elle fait l'objet d'un suivi du processus
- 5- Elle comprend des améliorations continues du cadre législatif
- 6- Elle prend en considération la «rentabilité à long terme» pour les promoteurs privés ou publics de sources de remplacement.

Mais quelle est la pertinence de cette planification?

Si on réduit la consommation nationale d'énergie d'origine fossile par la substitution et par des économies d'énergie réelles, cela aura-t-il des impacts au niveau mondial?

L'énergie ainsi libérée ne sera-t-elle pas de toute façon consommée par d'autres, ailleurs sur la terre, continuant ainsi les émissions de GES?

Quels impacts cela aura-t-il sur notre sécurité énergétique?

Il est fort probable qu'une planification énergétique nationale n'ait aucun impact concret sur les émissions de CO₂ au niveau mondial. La consommation d'énergie au niveau international étant comme un vase communicant; ce que l'un économise, l'autre l'utilise. La question du réchauffement climatique ne peut donc se régler chacun dans son coin.

Seule une concertation complète de tous les pays peut résoudre le problème car il ne suffit que de quelques pays qui ne suivent pas, comme c'est d'ailleurs le cas actuellement, pour que les effets soient à peu près nuls. Toutefois, le problème de l'approvisionnement énergétique s'approchant à grands pas, se tourner vers des sources renouvelables en remplacement de celles qui ne le sont pas pourrait augmenter notre sécurité énergétique et nous mettrait dans une meilleure position pour l'avenir.

Le charbon a mis près de 50 ans pour représenter 50% de la consommation totale d'énergie. Cinquante autres années ont été nécessaires pour que l'ensemble des sources d'énergie principalement utilisées de nos jours viennent en équilibre. Aucune autre nouvelle source d'énergie n'est entrée en force depuis.

Considérant le déclin inexorable des sources non-renouvelables d'énergie d'ici 20 à 30 ans⁴⁰, on peut se poser la question sur le temps que prendra le remplacement de celles-ci par des sources «alternatives» tout en maintenant un approvisionnement énergétique suffisant? Si l'on se fie à nos observations ainsi qu'à celles de Cesare Marchetti⁴¹, il est fort probable qu'une quarantaine d'années seront nécessaires car les sources nouvelles d'énergie (solaire, éolien, géothermie...) n'occupent actuellement qu'une très petite part de marché au niveau mondial⁴². De plus, la fusion nucléaire, source la plus souvent perçue comme remplacement ultime aux sources non-renouvelables, ne sera pas prête avant 50 ans⁴³.

Nous pourrions donc être confrontés à une pénurie d'énergie d'une durée d'au moins 20 ans en laissant le marché à lui-même⁴⁴. **Ceci renforce d'autant l'idée de l'urgence de prendre en main, de façon énergétique, notre planification énergétique.**

⁴⁰ Robert L. Hirsch, Peaking of world oil production: Recent forecasts, DOE NETL. April 2007.
National Petroleum Council (US), Facing The Hard Truths About Energy, July 2007.
Government Accountability Office, CRUDE OIL: Uncertainty about Future Oil Supply Makes It Important to Develop a Strategy for Addressing a Peak and Decline in Oil Production, February 2007.
Agence internationale de l'énergie, Medium Term Oil Market Report, July 2007.
World Energy Council, Survey of Energy Resources 2007, september 2007.
Energy Watch Group, Uranium resources and nuclear energy, December 2006 EWG-Series No 1/2006
Energy Watch Group, Coal: Resources and Future Production (April, 2007).
Robelius, F. 2007. Giant Oil Fields -The Highway to Oil. Giant Oil Fields and their Importance for Future Oil Production. Acta Universitatis Upsaliensis. *Digital Comprehensive Summaries* of Uppsala Dissertations from the Faculty of Science and Technology . 168 pp. Uppsala.
Darley, Julian, High noon for natural gas: the new energy crisis, Chelsea Green, 2004.
Dr. Albert Bartlett: Arithmetic, Population and Energy <http://globalpublicmedia.com/node/461>

⁴¹ Marchetti, C., Primary Energy Substitution Models: On the Interaction Between Energy and Society, Technological Forecasting and Social Change, 10:345—356, 1977.

Marchetti, C., Energy Systems -- The Broader Context, Technological Forecasting and Social Change, 14:191—203, 1979.

Marchetti, C., and Nakicenovic, N., The Dynamics of Energy Systems and the Logistic Substitution Model part I part II, RR-79-13, International Institute for Applied Systems Analysis, Laxenburg, Austria, 1979.

Luis de Sousa, Marchetti's curves, the Oil Drum, juillet 2007

⁴² Agence Internationale de l'Énergie (AIE), World Energy Outlook 2006, novembre 2006.

⁴³ Nick Rouse, Will Nuclear Fusion Fill the Gap Left by Peak Oil?, janvier 2007.

⁴⁴ Hirsch, R.L., Bezdek, R., Wendling, R. Peaking of World Oil Production: Impacts, Mitigation & Risk Management. DOE NETL. February 2005.