



HAL
open science

Contribution à l'élaboration des scénarios énergétiques

Paul Alba, Olivier Rech

► **To cite this version:**

Paul Alba, Olivier Rech. Contribution à l'élaboration des scénarios énergétiques: Cahiers de l'Economie, Série Recherche, n° 48. 2001. hal-03218689

HAL Id: hal-03218689

<https://ifp.hal.science/hal-03218689>

Preprint submitted on 5 May 2021

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

**Contribution à l'élaboration
des scénarios énergétiques**

*Paul ALBA
Olivier RECH*

décembre 2001

Les cahiers de l'économie

ÉCOLE DU PÉTROLE ET DES MOTEURS

INSTITUT FRANÇAIS DU PÉTROLE

228-232, avenue Napoléon Bonaparte

92852 RUEIL-MALMAISON CEDEX

téléphone : 01 47 52 62 80 - télécopieur : 01 47 52 70 36

Contribution à l'élaboration des scénarios énergétiques

*Paul ALBA
Olivier RECH*

décembre 2001

Les cahiers de l'économie - n° 48

Série Recherche

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

Les opinions émises dans les textes publiés dans cette collection doivent être considérées comme propres à leurs auteurs et ne reflètent pas nécessairement le point de vue de l'École ou de l'IFP.

Pour toute information complémentaire, prière de contacter :

Denis Babusiaux - Tél. 01 47 52 62 80

Résumé

Notre objectif de contribution à l'élaboration des scénarios énergétiques à long terme s'appuie sur un mode de représentation graphique global et un cadre d'analyse des évolutions énergétiques propres que nous développons en trois temps :

1. la nature de l'analyse nécessite l'usage de séries statistiques **filtrées** et non brutes afin de ne conserver que les tendances de long terme.
2. toute évolution doit être analysée en tenant compte de ses trois dimensions : valeur absolue, sens des variations et vitesse des variations. La vitesse des variations, que nous appelons « **dynamique** », fait référence aux phases d'accélération / décélération. Nous utilisons la **représentation en phase** en complément graphique au calcul de la dynamique. Au-delà du simple usage graphique, cette représentation intègre la dimension économique du développement d'une énergie en synthétisant et illustrant le degré de tension entre offre et demande.
3. l'analyse des énergies primaires impose de prendre en compte simultanément quantité (consommation) et part de marché. Nous adoptons une représentation graphique, dite f/c, consistant à croiser les historiques **des consommations et des parts de marché** d'une énergie primaire donnée, sur une échelle logarithmique.

L'application de cette méthode aux séries longues (1850-1997) de consommation des énergies primaires au niveau mondial nous permet de mettre en évidence certains phénomènes et d'obtenir les résultats suivants :

1. toute énergie bénéficie d'un **effet d'apparition**, lors de son introduction, se traduisant par des taux de croissance très élevés et des gains de part de marché quasi proportionnels au taux de croissance de la consommation. Les taux de croissance élevés, caractéristiques de la phase d'apparition, sont par la suite appelés à diminuer tendanciellement.
2. la représentation f/c suggère de retenir un **cycle de vie énergétique** composé de 4 phases : apparition, maturité, retrait, déclin. La typologie des énergies primaires sur la base de ce cycle de vie énergétique nous amène à la conclusion que certaines énergies présentent un potentiel de développement tandis que d'autres verront leur rôle stagner, voire diminuer.
3. les vitesses d'évolution, croissance ou décroissance, des énergies primaires demeurent **limitées**, inférieures à 0,5 point par an, et n'ont jamais permis d'atteindre des variations de part de marché supérieures à 1 point par an en tendance.
4. sur longue période, l'évolution des consommations et des parts de marché n'est pas linéaire mais **courbe** : en dehors de l'effet d'introduction, toute période de croissance ou de décroissance est constituée de deux phases successives à peu près symétriques, d'accélération puis de décélération. Sous cet angle, l'usage de taux de croissance moyens se révèle inadapté.

A la lumière de notre méthodologie, les grandes tendances énergétiques depuis la fin du 19^{ème} siècle associées à la situation actuelle de chacune des énergies primaires fournissent un cadre permettant de formuler des scénarios énergétiques « vraisemblables ». Nous retenons arbitrairement deux valeurs de consommation mondiale de 12 et 14 Gtep à l'horizon 2020 et tentons de quantifier, dans les deux cas, un éventuel **excédent** ou **déficit** d'approvisionnements énergétiques. La contribution **potentielle** de chacune des énergies primaires est évaluée par l'examen simultané des trajectoires de consommation et de part de marché :

1. dans le repère f/c : afin de tester la cohérence du scénario par rapport au cycle de vie énergétique
2. dans le plan de phase : afin de tester la cohérence de ce même scénario en terme d'amplitude des phases d'accélération / décélération

En formulant l'hypothèse que l'énergie nucléaire conserve le niveau qui est le sien actuellement (0,6 Gtep), nous évaluons le total des approvisionnements énergétiques en 2020 à un maximum de :

1. 12,9 Gtep dans le cas du scénario 12 Gtep, soit un **excédent** net de près de 1 Gtep
2. 13 Gtep dans le cas du scénario 14 Gtep, soit un **déficit** net de 1 Gtep

A l'horizon 2020, nous insistons particulièrement sur les éléments suivants :

1. aucune énergie nouvelle n'est susceptible de bouleverser le panorama énergétique actuel
2. la contribution du charbon devrait rester inférieure à 4 Gtep
3. la contribution du pétrole ne pourra que difficilement dépasser 4 Gtep
4. la contribution du gaz naturel ne saurait atteindre 3,5 Gtep sans présenter le risque d'une **rupture** similaire à celle ayant affecté le charbon puis le pétrole au cours de leur histoire respective (vers un choc gazier ?)
5. les énergies renouvelables (hors biomasse) devraient demeurer marginales de l'ordre de 0,6 Gtep

La clé du risque de tension sur les approvisionnements réside dans la **dynamique** d'évolution de la demande.

Contribution à l'élaboration des scénarios énergétiques

<u>1. Origine : l'échec du modèle de Marchetti</u>	7
<u>2. Principes de la méthode proposée</u>	10
2.1 Utilisation de données filtrées	
2.2 Examen de l'évolution en phase	
2.3 La représentation « f/c » : parts de marché vs quantités	
<u>3. Illustration de la méthode</u>	14
3.1 Historique des consommations	
3.2 Historique des parts de marché	
3.3 Emploi de la représentation f/c	
3.3.1 Energies indépendantes et effet d'apparition	
3.3.2 Energies en compétition	
3.3.3 Le cycle de vie énergétique	
3.4 Conclusion : savoir d'où l'on vient	
<u>4. Application à l'élaboration de scénarios énergétiques</u>	23
4.1 Première approche par extrapolation linéaire f/c	
4.2 L'espace des scénarios	
4.2.1 Evaluation de la contribution des énergies renouvelables	
4.2.2 Evaluation de la contribution des énergies fossiles	
4.3 Perspectives énergétiques mondiales à 2020	
<u>5. Evolutions récentes et conclusions</u>	35
5.1 Court terme et long terme : un éclairage mutuel	
5.2 Conclusions générales	

Encadrés

- Encadré 1 : La représentation en phase – exemple de l'évolution de la part de marché du charbon
Encadré 2 : La représentation en phase – exemple de l'évolution de la consommation de charbon

Tableaux

- Tableau 1 : Données historiques
Tableau 2 : Historique des croissances de consommations
Tableau 3 : Historique des croissances de parts de marché
Tableau 4 : Calcul du coefficient d'introduction
Tableau 5 : Résumé de l'historique
Tableau 6 : Contribution des énergies primaires à une consommation mondiale de 12 Gtep par scénario tendanciel linéaire
Tableau 7 : Contribution des énergies primaires à une consommation mondiale de 14 Gtep par scénario tendanciel linéaire
Tableau 8 : Estimation de la contribution des énergies renouvelables en 2020
Tableau 9 : Estimation de la contribution des énergies fossiles en 2020
Tableau 10 : Contribution des énergies primaires à une consommation mondiale de 12 Gtep
Tableau 11 : Contribution des énergies primaires à une consommation mondiale de 14 Gtep

Figures

- Figure 1 : Système de représentation de Marchetti
Figure 2 : Historique des consommations primaires
Figure 3 : Historique des parts de marché des énergies primaires
Figure 4a : Représentation f/c des énergies primaires (diagramme logarithmique)
Figure 4b : Représentation f/c des énergies primaires (diagramme cartésien)
Figure 5 : Chronique des taux de croissance annuelle (séries brutes) (1)
Figure 6 : Chronique des taux de croissance annuelle (séries brutes) (2)
Figure 7 : Chronique des taux de croissance annuelle (séries lissées) (1)
Figure 8 : Chronique des taux de croissance annuelle (séries lissées) (2)
Figures 9a : Evolution en plan de phase des consommations primaires charbon, pétrole et gaz
Figures 9b : Evolution en plan de phase des consommations primaires renouvelables et nucléaires
Figures 10a : Evolution en plan de phase des parts de marché charbon, pétrole et gaz
Figures 10b : Evolution en plan de phase des parts de marché renouvelables et nucléaires
Figures 11a : Positions f/c des énergies renouvelables dans les scénarios 2020 – 12 et 14 Gtep
Figures 11b : Positions f/c des énergies fossiles dans les scénarios 2020 – 12 et 14 Gtep
Figures 12a à 12f : Scénarios énergies 2020 – extrapolations linéaires f/c
Figures 13a à 13f : Scénarios énergies 2020 – représentations consommation en phase
Figures 14a à 14f : Scénarios énergies 2020 – représentations part de marché en phase
Figure 15 : Cycles de consommation pétrolière et taux de croissance 1998-1999-2000

Annexes

- Annexe 1 : Sources statistiques
Annexe 2 : Filtrage
Annexe 3 : Représentation en phase, dynamique et cycles : éléments mathématiques et remarques fondamentales
Annexe 4 : Substitutions énergétiques et modèle logistique

Introduction

Le présent article poursuit l'effort de recherche des auteurs, consacré aux prévisions énergétiques et présenté dans la Revue de l'Energie et les Cahiers Economie de l'ENSPM. Le premier travail, intitulé « Peut-on améliorer les prévisions énergétiques »¹ nous a permis de mettre en évidence des problèmes de diverses natures, soit liés aux statistiques (précision, équivalences) soit méthodologiques, les insuffisances, dans ce dernier cas, tenant essentiellement à la non prise en compte des phénomènes d'accélération / décélération dans l'analyse des tendances des principales variables.

Nous étions amenés à souligner, à l'aide d'une approche méthodologique nouvelle que nous allons détailler et compléter dans le présent article :

- l'inadéquation d'un paramétrage à taux de variation constant (ce qui est toujours contraire à ce que nous montre le passé)
- le caractère bouleversant de certains scénarios, impliquant en fait de véritables utopies économiques
- la précision insuffisante de certaines études quant aux données utilisées, aux dates de références, aux coefficients d'équivalence entre formes d'énergies, voire aux méthodes utilisées. Nous ne revenons pas ici sur ces problèmes, qui relèvent des organismes « clients » des études, ainsi que des instituts statistiques

Nous présentons donc, en premier lieu, notre démarche méthodologique qui approfondit les principes développés lors des travaux précédents sur la consommation totale d'énergie et ses déterminants et les étend aux énergies primaires. Nous avons reporté en annexes divers développements relatifs à la méthodologie ou à des points que nous considérons comme secondaires, relatifs cependant aux phénomènes énergétiques, ceci afin de ne pas alourdir notre exposé.

Nous nous risquons ensuite à explorer le champ des scénarios énergétiques, pour montrer la souplesse de notre méthode, sans prétendre proposer une sorte d'arme absolue que l'expérience des études économiques montre d'ailleurs ne pas être près d'exister.

Le problème des scénarios énergétiques est en effet au cœur de politiques qui ont des caractéristiques marquées : le poids des investissements, la durée de vie des installations, le caractère essentiel du besoin à satisfaire, les considérations géopolitiques et enfin, et non le moindre, le caractère à première vue limité des ressources d'origine fossile. On conçoit donc que les scénarios énergétiques constituent des éléments importants quant aux choix politiques qu'ils peuvent faciliter.

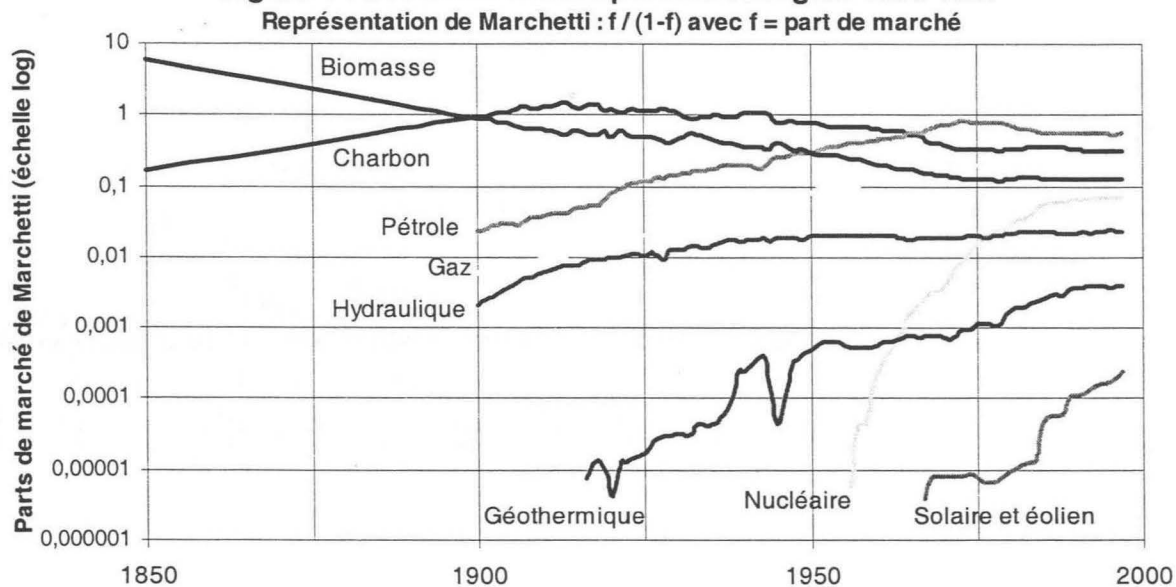
Nous ne reviendrons pas ici sur les problèmes de qualité statistique et de coefficient d'équivalence, ce dernier élément, pour critique qu'il soit, n'intervenant, au plan mathématique, que de façon linéaire donc sans distordre les évolutions constatées ou prédites. Ces questions sont connues de tous même si on peut déplorer que nombre de publications omettent de mentionner leurs sources et leurs équivalences utilisées. La précision des données est inconnue : dans un bilan mondial de 8 Gtep, le « pour mille », si l'on prend cette référence de précision extrême, représente 8 millions de tep, le « pour cent » 80. On peut estimer que l'on est meilleur que 1% mais peut-on vraiment conclure quant à une variation annuelle de 2 ou 3 pour mille ? Quoi qu'il en soit, et même si toutes les données économiques sont susceptibles de telles remarques, nous devons faire avec ce dont nous disposons.

¹ P. Alba et O. Rech, « Peut-on améliorer les prévisions énergétiques ? », Revue de l'énergie, n° 513 et 514, janvier et février 2000.

1. Origine : l'échec du modèle de Marchetti

A l'origine de nos travaux se trouve un exercice d'actualisation des travaux de Marchetti². Pourquoi ? Parce que, sauf erreur de notre part, c'est le seul auteur qui ait cherché une représentation globale des évolutions énergétiques. En s'appuyant sur un modèle de diffusion, Marchetti a proposé en 1978 un schéma quasi déterministe, dans un système de coordonnées « temps / $\log(f/1-f)$ », f étant la part de marché (cf. figure 1). « L'observation du passé, depuis la Révolution Industrielle au 18^{ème} siècle, semble révéler que les diverses sources d'énergie se succèdent inexorablement à des rythmes fatidiques qui peuvent être calculés avec précision et extrapolés avec confiance. L'idée développée par Marchetti est qu'il existerait ainsi une succession de vagues énergétiques se succédant les unes aux autres selon une périodicité quasi fatale, un schéma obligé auquel le monde ne peut échapper. »³

Figure 1 : évolution historique des énergies 1850-1997



Ce modèle, pourtant sommairement justifié par Peterka et Fleck⁴ s'est révélé trop ambitieux et ses prévisions se révèlent peu vérifiées, notamment lorsque le modèle est appliqué pour un pays donné. Mais cette tentative montra que l'évolution énergétique n'était pas n'importe quoi et que la **représentation pouvait faciliter la compréhension**. En outre, d'intéressants parallélismes entre différentes énergies, que nous retrouverons et expliquerons, étaient mis en évidence.

Pour avoir une première vue du problème des évolutions énergétiques, on peut utiliser les données très longues (cf. tableau 1). Bien que l'hydraulique soit très sous-estimée dans le passé lointain, et que le solaire et l'éolien viennent du fond des âges, on retiendra que l'ordre historique d'apparition est le suivant : biomasse, charbon, pétrole, hydroélectricité, gaz naturel, géothermie, nucléaire, solaire/éolien. Les « autres énergies renouvelables » (géothermie, solaire, éolien) sont placées au mieux des données disponibles, dont la précision est faible, ce qui revient à ne pas garantir leurs chroniques autrement que par une sorte d'harmonie du schéma d'ensemble. Les données du tableau entraînent diverses questions, qui montrent les limites de l'approche, esthétiquement séduisante, de Marchetti : bien entendu évolution de la consommation globale mais aussi évolution de chaque énergie en quantité et part de marché alors que Marchetti ne considère que les parts de marché. Le cas du charbon est remarquable : les quantités croissent, la part de marché croît puis décroît. Les données du tableau 1 sont reprises figures 2 (consommations) et 3 (parts de marché).

² Marchetti & Nakicenovic, « The dynamics of energy systems and the logistic substitution model, Volume 1 : Phenomenological Part », IIASA, 1978.

³ J. Percebois, « Economie de l'énergie », Economica, 1989, p. 154.

⁴ Peterka & Fleck, « The dynamics of energy systems and the logistic substitution model, Volume 2 : Theoretical Part », IIASA, 1978.

Figure 2 : Historique des consommations primaires

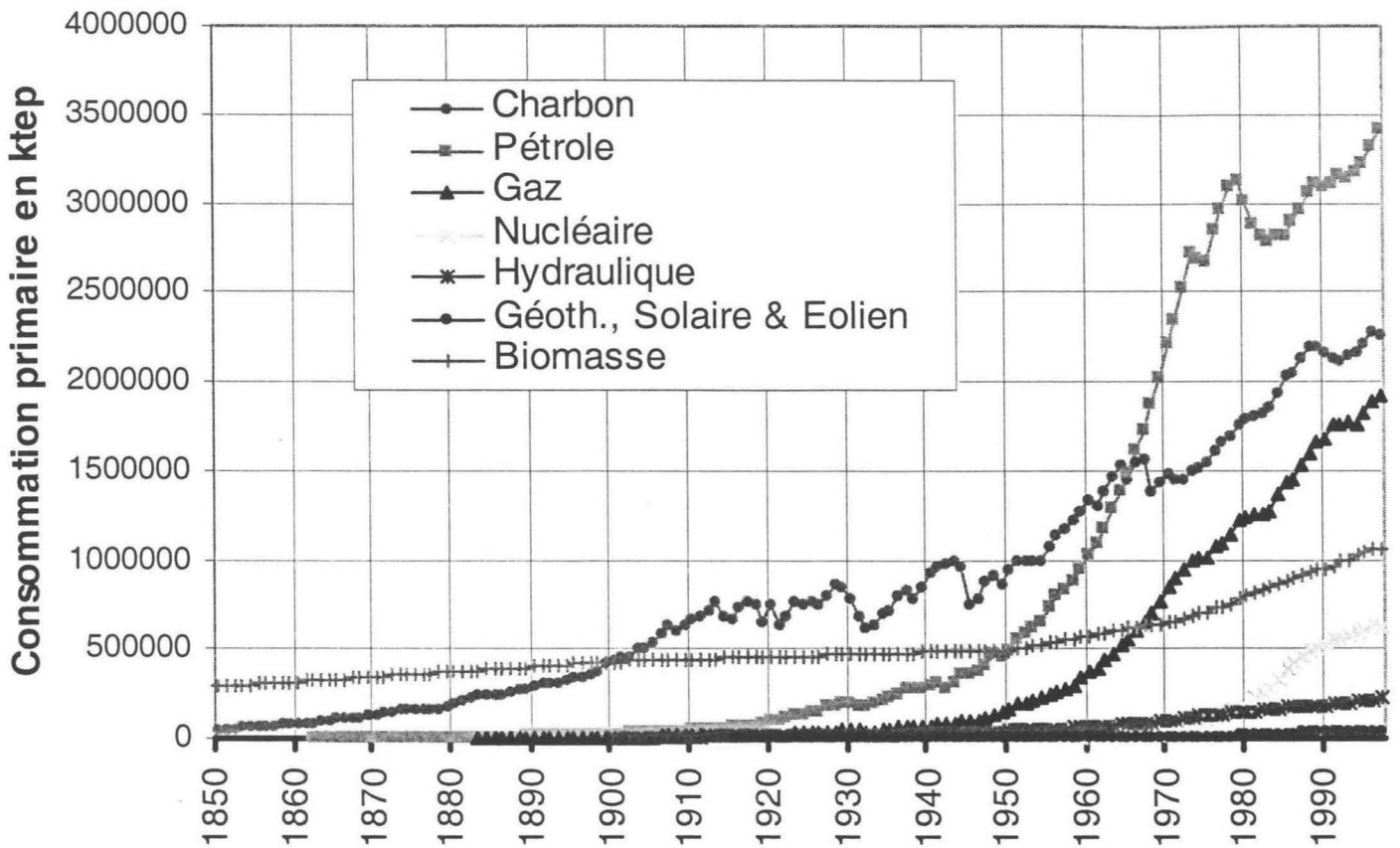


Figure 3 : Historique des parts de marché

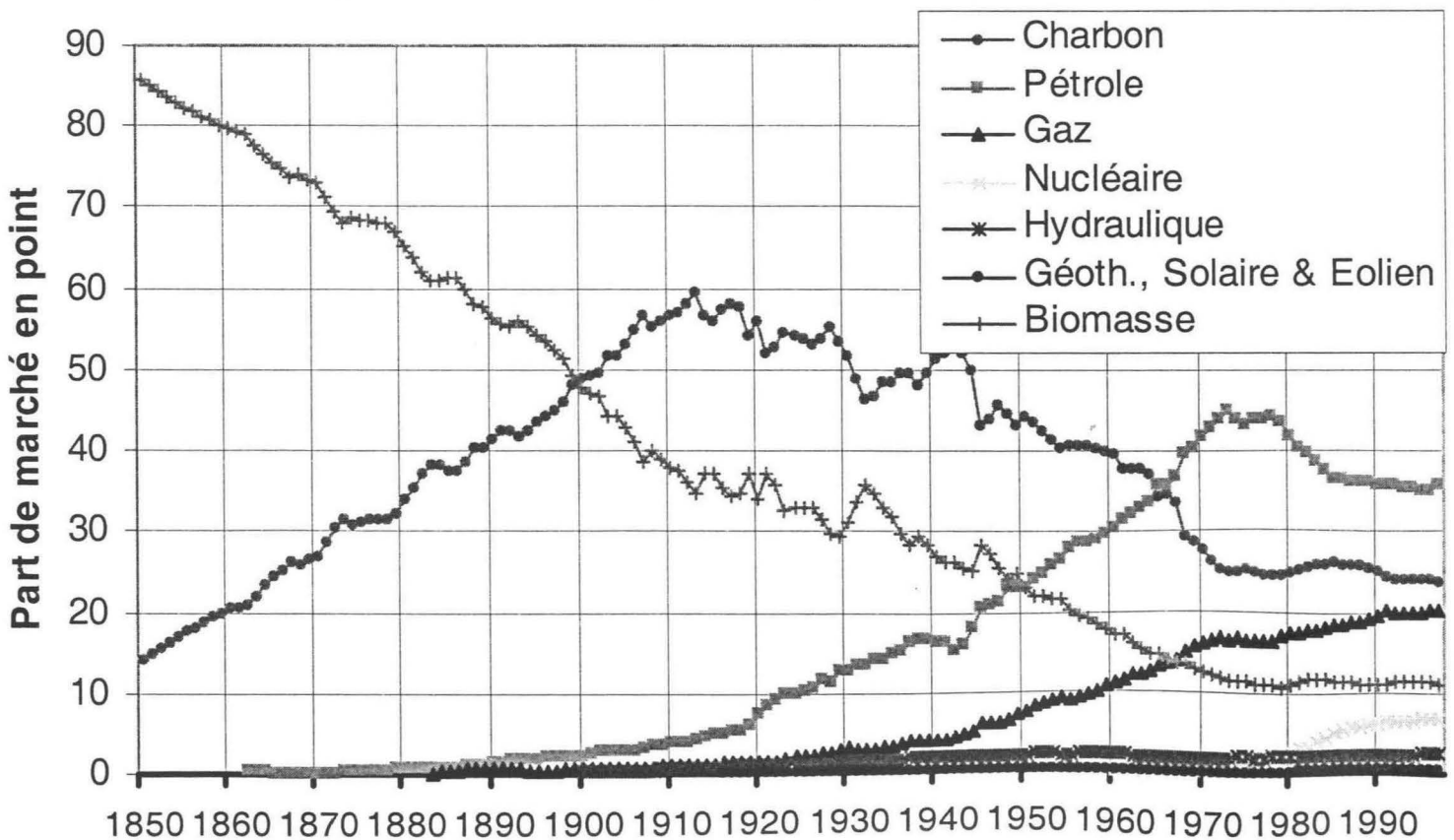


Tableau 1 : données brutes de consommation mondiale des énergies primaires (en Mtep)

	Charbon	Pétrole	Gaz	Nucléaire	Hydraulique	Géothermique	Solaire & éolien	Biomasse	Total
1700	3	-	-	-	-	-	-	144	147
1750	5	-	-	-	-	-	-	180	185
1800	11	-	-	-	-	-	-	217	228
1850	48	-	-	-	-	-	-	288	336
1900	440	20	5	-	2	-	-	429	896
1950	945	492	162	-	41	1	-	495	2137
1997	2255	3409	1911	624	221	37	2	1062	9521

Sources des données : cf. annexe A1.

Nous avons ainsi pensé qu'une tentative d'aboutir à un système de représentation, plus convenable que celui de Marchetti, n'était pas absurde. C'est donc dans le but de bâtir un système de représentation efficace **mais autorisant toute liberté de scénarios**, ce qui n'est pas le cas de l'approche Marchetti, que nous avons entrepris des travaux qui nous amènent aux propositions faites ci-après.

Avant de passer au développement du schéma exposé ci-dessus, nous croyons utile, instruits par l'expérience, de préciser quelques points de vocabulaire :

- les taux de croissance (énergies, PIB, population) s'expriment couramment en % par an : le fait que la référence temporelle soit en général omise ne dispense pas de s'en souvenir
- nous calculons et utilisons une **dynamique** qui est la variation relative de taux (cf. annexe A3). Elle s'exprimera donc aussi en % par an, en faisant attention à ce qu'il s'agit du % par an d'un taux lui-même exprimé en % par an : une dynamique de 10 % par an appliquée à un taux de 1,5 % par an signifie que ce taux passe à 1,65 % par an
- traditionnellement, les parts de marché s'expriment en %. Afin d'éviter toute confusion entre le taux de croissance, en % par an, d'une part de marché, elle-même exprimée en %, nous avons choisi d'exprimer les parts de marché en points, dans une échelle de 0 à 100. Par exemple, une énergie pourra occuper une part de marché de 30 points, avec un taux de croissance de -1 % par an : ceci signifie que la part de marché passe de 30 points à 29,7 points. Bien entendu, ce qui est relatif à la dynamique s'applique de même.

2. Principes de la méthode proposée

Bien que ce qui suit résulte d'un travail approfondi d'analyse, nous pensons logique, puisque le présent article propose une méthode, d'exposer d'abord les principes avant de les illustrer.

2.1 Utilisation de données filtrées

Le mode de représentation des phénomènes étudiés se doit d'être cohérent avec une caractéristique fondamentale des investissements énergétiques, donc des consommations qu'ils sous-tendent : nous sommes dans un domaine de long terme qui implique l'emploi de chroniques remontant loin dans le passé. En d'autres termes prendre un recul suffisant, ce qui ramène en fait au début du siècle, en raison des guerres mondiales, de l'apparition massive du pétrole après 1920, de celle du nucléaire, certes moins massive, après 1950, des chocs pétroliers.

Nous considérons donc que ni les inévitables imperfections statistiques, ni la volatilité des fluctuations, ne masquent les tendances séculaires. Notre analyse repose sur ces tendances, qui constituent ainsi des témoins de la dynamique profonde propre à chaque source d'énergie.

Nous utilisons donc les chroniques classiques mais nous opérons un filtrage a priori. En effet, si les chroniques ne sont pas accompagnées d'intervalle de confiance permettant d'adapter au mieux un traitement statistique, nous pouvons cependant observer que tout modèle économique, tant dans sa phase économétrique de reconstitution du passé que dans la phase de projection, établit de fait un filtrage des données utilisées. Partant, nous avons fait le choix d'opérer sur des données filtrées : nous utilisons pour cela le classique filtre Hodrick-Prescott. On trouvera en annexe A2 quelques précisions sur cette méthode.

2.2 Examen de l'évolution en phase

On trouvera en annexe A3 le principe de la représentation en phase, qui n'est pas nouveau. L'intérêt de cette représentation est de faire apparaître naturellement des éléments liés aux vitesses d'évolution, notamment la **dynamique** qui est la variation relative d'un taux donc, liée à la **courbure** des trajectoires. De cette analyse, on déduit des éléments remarquables pouvant caractériser des scénarios d'évolution ou, formulation équivalente, mettre en évidence quelles valeurs de taux et de dynamique (variation de taux) doivent être retenues pour atteindre un certain objectif dans un certain temps. Les encadrés 1 et 2 (page suivante) illustrent les propriétés de la représentation en phase.

L'intérêt de la représentation en phase appliquée aux évolutions énergétiques réside dans ce que, au-delà du simple usage graphique, cette représentation intègre la dimension économique du développement d'une énergie en synthétisant et illustrant le degré de tension entre offre et demande.

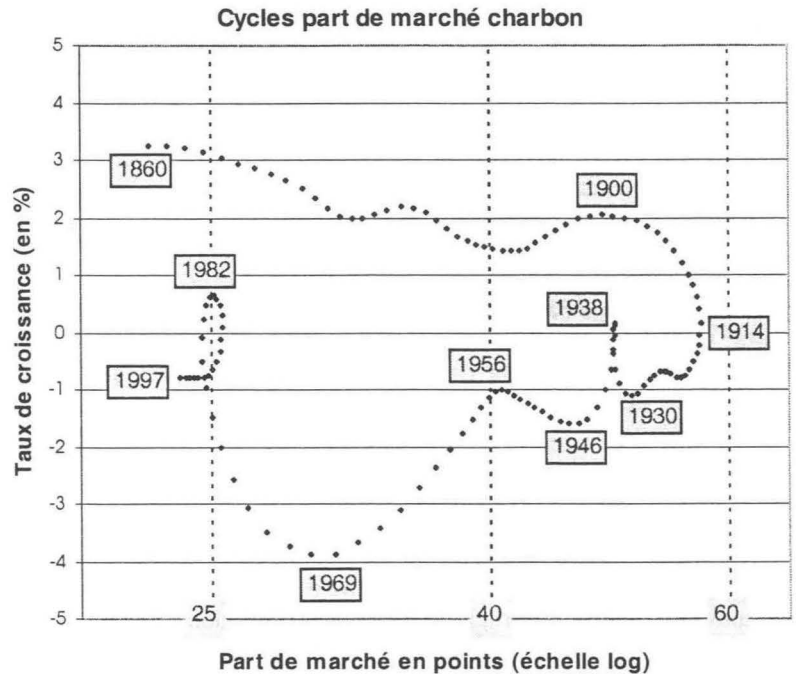
La représentation en phase

Encadré n°1 : exemple de l'évolution de la part de marché du charbon

L'évolution de la part de marché du charbon est représentée dans le plan de phase logarithmique (log part de marché en abscisse, taux de croissance en ordonnée). Faiblement négative pendant 40 ans, la dynamique devient nettement négative à partir de 1900. La trajectoire passe dans le demi-plan inférieur, normalement à l'axe des abscisses, au moment de la première guerre mondiale. Les tentatives de maintien de part de marché sont marquées par les retours de trajectoires vers le haut (1938, 1956 et début des années 80), sans jamais réussir à traverser avec suffisamment d'énergie pour se maintenir en phase de croissance.

Le tableau suivant indique les valeurs de taux de croissance moyens (variations) et de dynamique (vitesses de variations) pour les périodes remarquables de la trajectoire de la part de marché du charbon.

Période	tcam	Dynamique
1860-1900	2,10	-2,45
1900-1913	1,29	-6,89
1914-1930	-0,72	27,39
1946-1956	-1,29	-4,05
1956-1969	-2,45	12,08

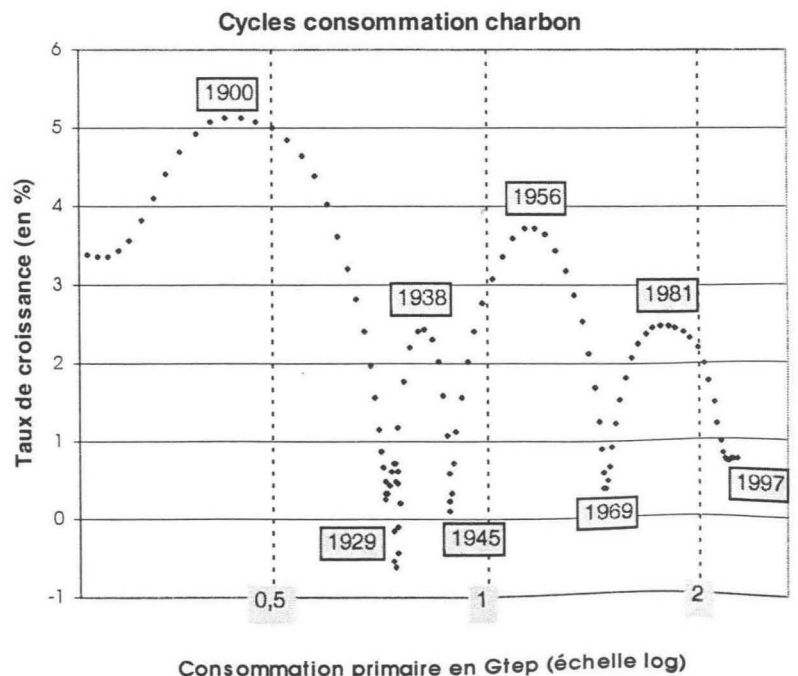


Encadré n°2 : exemple de l'évolution de la consommation de charbon

La consommation de charbon est représentée dans le plan de phase logarithmique (log consommation en abscisse, taux de croissance en ordonnée). La trajectoire fait apparaître différents cycles, pour lesquels les points hauts et bas ont été datés. La structure en pseudo cycloïde est claire. On notera la quasi-symétrie entre phases de croissance et phases de déclin.

Le tableau suivant indique les valeurs de taux de croissance moyens (variations) et de dynamique (vitesses de variations) pour les périodes remarquables de la trajectoire de la consommation de charbon.

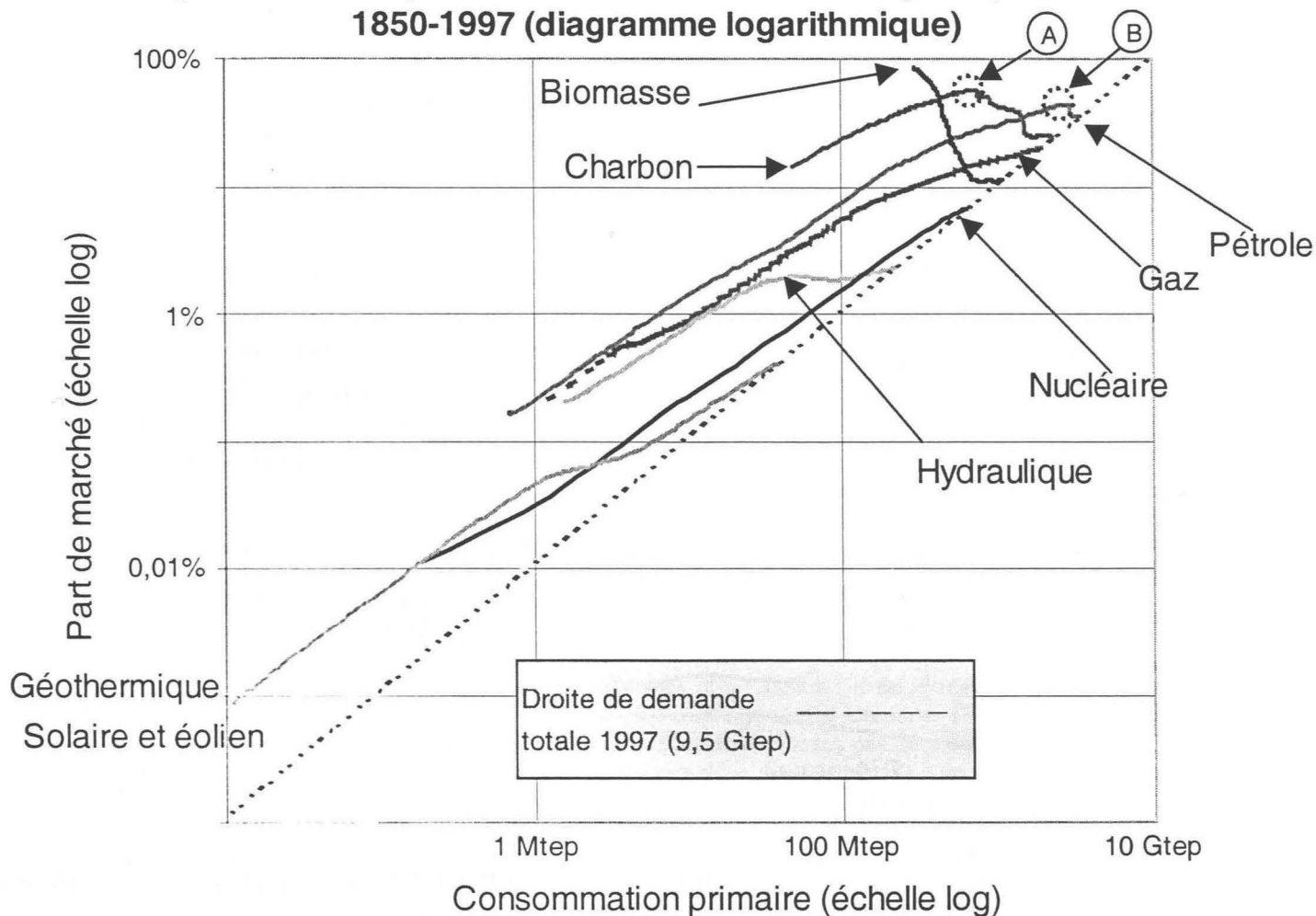
Période	tcam	Dynamique
1900-1927	2,08	-7,38
1945-1956	2,24	47,29
1956-1969	2,05	-8,93
1969-1981	1,73	22,12
1981-1997	1,38	-7,31



2.3 La représentation f/c : parts de marché vs quantités

Les caractéristiques de l'évolution des différentes énergies sont mises en évidence au moyen de la représentation en phase. Comme cet historique met bien en évidence que consommation et part de marché doivent être prises en compte simultanément, nous avons pensé à représenter l'histoire énergétique à travers le croisement de ces deux variables, et ceci bien qu'elles soient liées à travers la consommation totale.

Figure 4a : Représentation f/c des énergies primaires 1850-1997 (diagramme logarithmique)



La propriété de cette représentation est qu'à chaque instant, les points représentatifs des différentes formes d'énergie sont alignés sur une droite, qui est la droite de demande d'énergie⁵. En effet, pour chaque énergie, par définition :

$$f_i = c_i / C, \text{ avec } f_i \text{ part de marché de l'énergie } i, c_i \text{ consommation de l'énergie } i \text{ et } C \text{ consommation totale d'énergie}$$

Ceci montre que, pour un C donné, les points (c_i, f_i) s'alignent. Ceci est vrai que le repère soit logarithmique (figure 4a) ou cartésien (figure 4b). Nous utiliserons le repère logarithmique, car les pentes des trajectoires sont alors liées simplement au rapport des taux de croissance de chaque énergie et de la consommation totale.

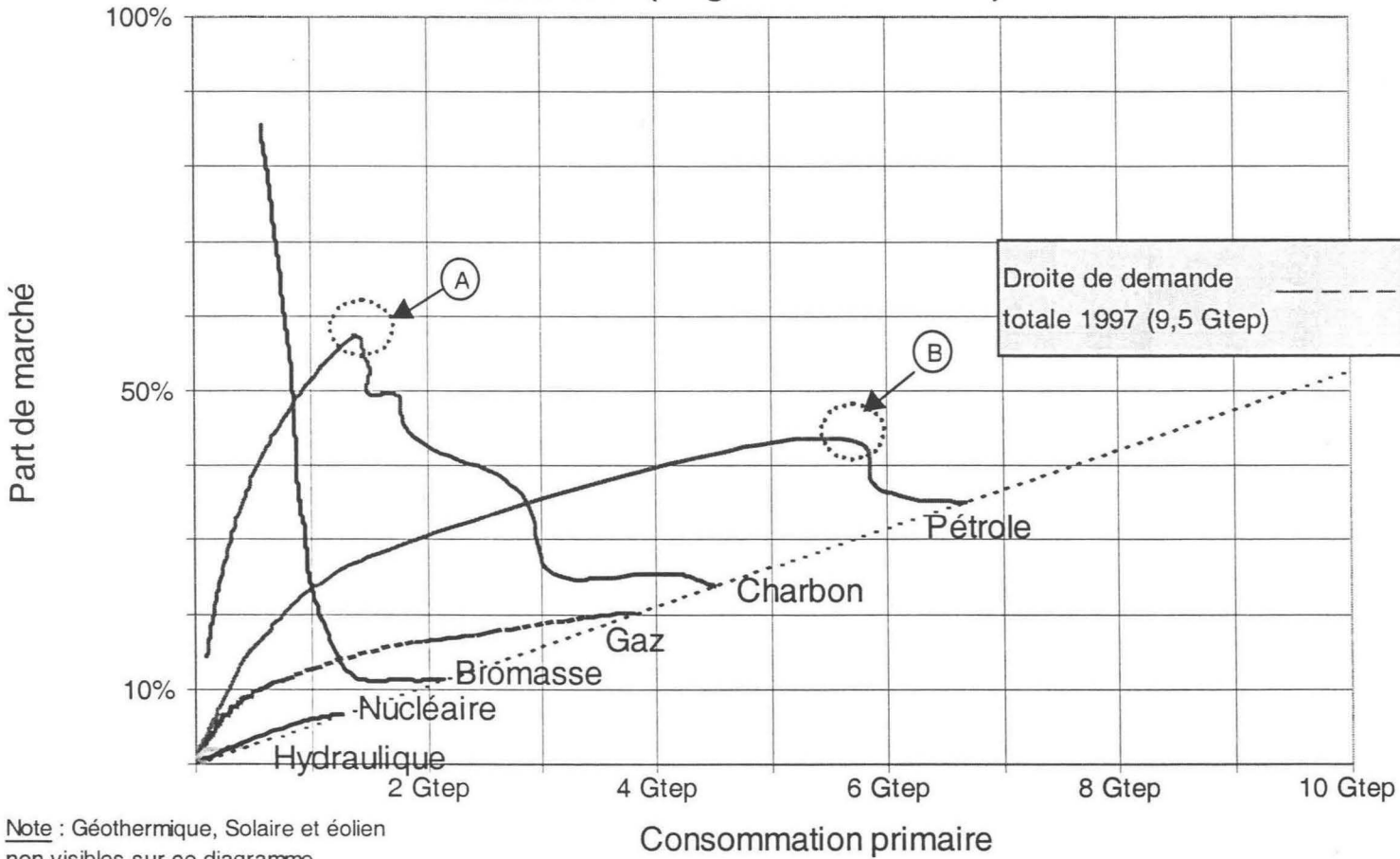
Outre les éléments d'analyse que procure cette représentation et que nous présentons plus loin, nous utilisons ce cadre pour formuler, dans un second temps, des scénarios spécifiques propres à chacune des énergies primaires. Nous appelons scénario spécifique une trajectoire dans le plan f/c. L'évolution énergétique est ainsi représentée par l'ensemble des scénarios spécifiques. Ceci implique que le niveau de consommation totale d'énergie soit

⁵ La conséquence de l'usage de données filtrées est que la somme des séries filtrées de chacune des énergies primaires n'est pas strictement égale à la série filtrée de la consommation totale mais le faible écart constaté n'est pas de nature à remettre en cause les conclusions issues de ce mode de représentation.

considéré comme intrinsèquement exogène. Nous remplaçons ensuite les scénarios spécifiques dans leurs représentations en phase respectives afin d'en évaluer plus précisément les conséquences en terme de vitesse de variation de la consommation et de la part de marché.

Un scénario étant établi dans le plan f/c et évalué dans la représentation en phase, on peut, le cas échéant et à titre d'illustration, revenir aux classiques représentations en chroniques par la décomposition en variable f et en variable c, même si cela ne présente finalement que peu d'intérêt ni dans l'analyse du passé, ni dans la démarche de construction d'un scénario.

**Figure 4b : Représentation f/c des énergies primaires
1850-1997 (diagramme cartésien)**



3. Illustration de la méthode

3.1 Ce qu'enseigne l'historique des consommations

Si l'on représente la chronique des taux de variation des consommations d'énergie, on est frappé par leur variabilité (cf. figures 5 et 6). Si l'on utilise des données lissées (cf. figures 7 et 8), on met alors en évidence un phénomène remarquable qui est l'existence, lors de l'apparition de chaque forme d'énergie, de taux très élevés puis décroissant ensuite assez rapidement. Il n'y a là aucun miracle mais simplement une conséquence des définitions adoptées, comme on va le voir à l'aide d'une approche théorique très simple.

Considérons une économie à une énergie c_1 . La consommation totale est C , et la part de marché est f_1/C . A un instant donné t_i , on se propose d'introduire une nouvelle énergie c_2 :

pour $t < t_i$, $c_1 = C$; pour $t > t_i$, $f_1 = c_1/C$, $f_2 = c_2/C$, et, à l'évidence, $df_1/f_1 = dc_1/c_1 - dC/C$ (resp. 2)

- df_1/f_1 exprime que le taux de croissance de la part de marché f_1 de l'énergie 1 (resp.2) est la différence entre le taux de croissance de la consommation de cette énergie et de la consommation totale d'énergie. Cela pour une énergie déjà dans le marché. On pourrait conclure, à tort, qu'une énergie ne pourrait pas être mise sur le marché à taux faible : en effet, si dc_2/c_2 est $< dC/C$, df_2/f_2 devient négatif. Or, par définition, df_2/f_2 est nul à l'origine et ne peut alors devenir négatif. En fait, on est en présence d'une situation de discontinuité, que l'on peut illustrer comme suit : à l'instant 0, dc_2 passe de 0 à une certaine valeur, par ce qui est une impulsion (une accélération) de la différence seconde : dc_2 apparaît alors comme un saut, dont la dérivée est traduite mathématiquement par un Dirac. Arithmétiquement, toute introduction correspond à un taux de croissance instantané, quasi infini, ce qui permet alors à df_2 d'être positif. La nouvelle énergie verra la croissance de sa part de marché, traduisant simplement le taux élevé de la consommation, se poursuivre tant que ses propriétés intrinsèques ou l'aide qui lui est apportée, seront suffisantes : ce qu'il faut bien comprendre est que l'apparition d'une nouvelle énergie correspond à des taux très élevés sans que cela traduise des qualités miraculeuses.

Cet **effet d'apparition** marque l'ensemble des énergies les plus récentes : il est évidemment atténué par une stratégie de mise au marché très prudente, mais il ne peut disparaître, sauf à reporter l'instant zéro très loin en arrière. Sans développer cette discussion, on conclura que nous ne sommes pas, lors du démarrage de chacune des énergies pour lesquelles on dispose de statistiques convenables, en présence d'un tel processus. On retiendra également que les interférences entre énergies n'apparaissent qu'en fin de phase d'introduction, lorsque la nouvelle venue cherche une part de marché convenable, lui permettant de payer son développement.

Figure 5 : chronique des taux de croissance annuelle des consommations primaires de charbon, pétrole et gaz (séries brutes)

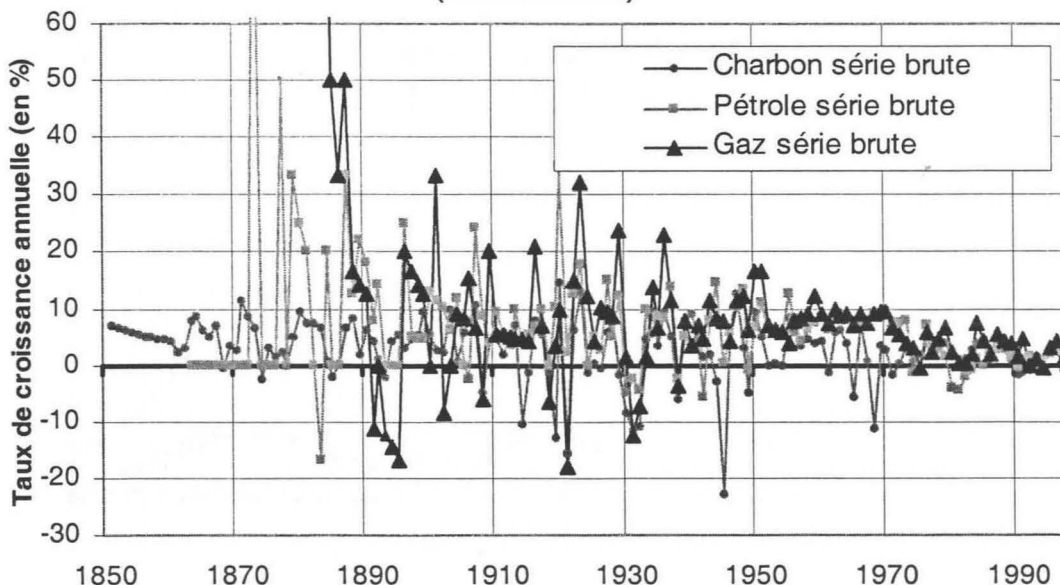


Figure 6 : chronique des taux de croissance annuelle des consommations primaires hydro, nucléaire, géothermique et solaire & éolien (séries brutes)

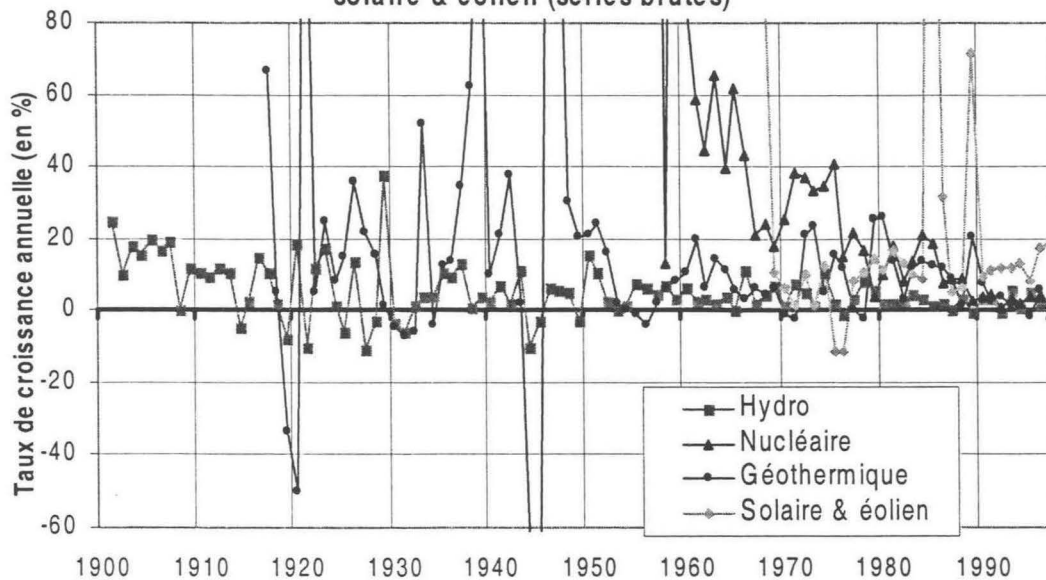


Figure 7 : chronique des taux de croissance annuelle des consommations primaires de charbon, pétrole et gaz (séries lissées)

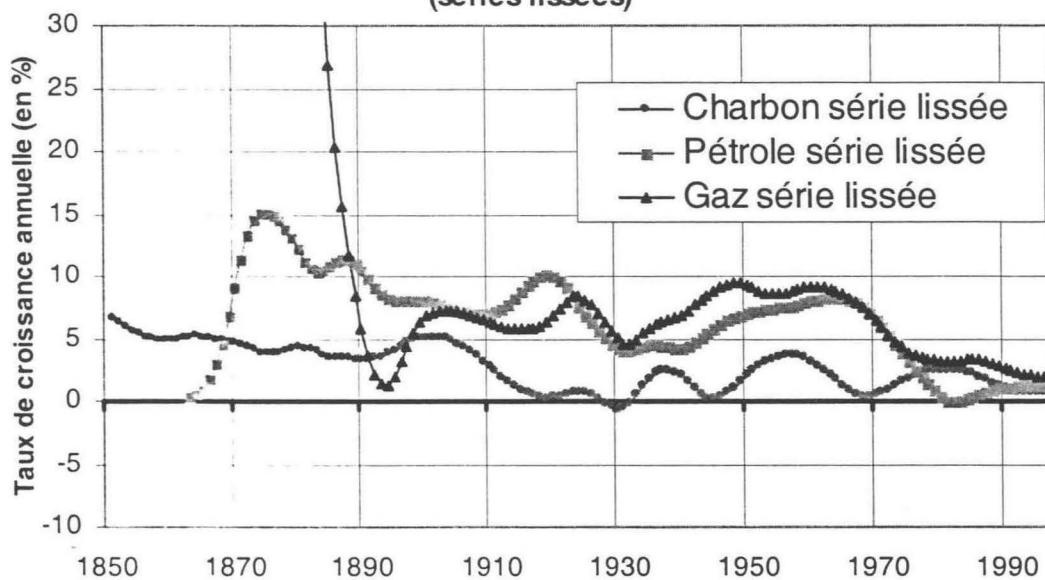
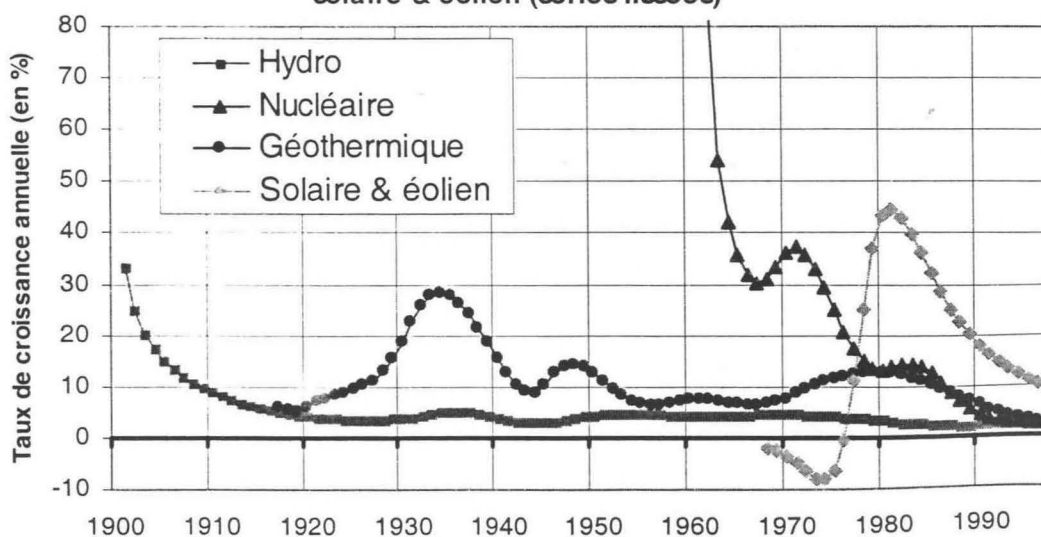


Figure 8 : chronique des taux de croissance annuelle des consommations primaires hydro, nucléaire, géothermique et solaire & éolien (séries lissées)



Nous allons maintenant examiner l'évolution de chaque énergie :

- charbon (cf. figure 9a) : la dynamique est actuellement (1997) très légèrement positive, à la limite des erreurs de mesure et les taux récents demeurent faibles : inférieurs à 1 %/an. Le taux maximum atteint en 1980 est de 2,5 %/an, à une époque favorable au charbon (prix du pétrole au maximum historique, aucune considération d'effet de serre).
- pétrole (cf. figure 9a) : triomphant jusqu'en 1969, le pétrole a connu depuis un changement de statut, qui a vu son taux passer de 8 %/an avant 1969, à zéro en 1982 ; depuis, une dynamique, certes positive mais constamment décroissante, limite le pétrole vers 1,5 %/an et ne permet pas d'exclure un retour vers zéro d'ici une vingtaine d'années.
- gaz naturel (cf. figure 9a) : la dynamique, négative depuis le milieu des années 60, semble devenir nulle aujourd'hui, et pourrait même redevenir positive, si on tient compte des réserves de gaz, de leur bonne répartition géographique, et de la popularité écologique du produit, qui peut par ailleurs, s'agissant de la production d'électricité, s'appuyer sur les remarquables progrès des cycles combinés à turbines à gaz. Il n'est donc pas déraisonnable de penser que le gaz pourrait connaître une remontée de son taux : on est ici dans un des domaines offrant un nombre élevé de degrés de liberté pour l'établissement de scénarios futurs.
- nucléaire (cf. figure 9b) : on peut considérer que le nucléaire a terminé son effet d'introduction mais n'a pas encore trouvé une place solide dans le concert énergétique. Ici aussi, nous sommes dans un domaine à scénarios divers.
- hydraulique (cf. figure 9b) : dynamique fluctuante, autour de 0, pour un taux évidemment à peu près constant, de 2 %/an, mais ayant connu de beaux jours depuis les années 50, ce qui permet de ne pas exclure des taux un peu meilleurs en longue période.
- biomasse (cf. figure 9b) : la dynamique de la consommation est négative, le taux étant quasi identique à celui de la demande globale. Cela est peut être dû à une insuffisance statistique, mais nous le considérerons néanmoins. On note qu'historiquement, une légère reprise de consommation dans les années 80 a conduit le taux à seulement 2 %/an : cela marque bien qu'on ne peut s'attendre à des révolutions dans ce domaine.
- autres renouvelables : géothermie, solaire et éolien (cf. figure 9b) : la trajectoire de la géothermie, après un rebond à la fin des années 70, a repris la tendance de long terme qui montre l'essoufflement de la consommation. Dans le cas des énergies solaire et éolienne, nous nous bornons à retenir que le taux de croissance actuel reste le plus élevé des différentes énergies. Toutefois, les quantités sont si faibles que l'on ne peut vraiment tirer de conclusion définitive quant à l'orientation de la trajectoire, eu égard à la difficulté d'apprécier la qualité des statistiques que nous donnons sans y attacher d'importance majeure.

Pour résumer, on peut retenir le tableau suivant (taux en %/an) :

Tableau 2 : taux de croissance annuelle des consommations des énergies primaires (séries lissées, en pourcentage)

	Charbon	Pétrole	Gaz	Nucléaire	Hydraulique	Géothermique	Solaire & éolien	Biomasse	Total
1900	5,1	8,1	6,8	-	-	-	-	0,5	3,0
1930	-0,6	4,2	5,0	-	4,0	18,8	-	0,3	0,5
1950	2,0	7,0	9,3	-	4,5	12,6	-	0,8	3,4
1960	3,2	8,0	9,2	-	4,3	7,5	-	1,4	5,0
1970	0,5	6,5	6,5	36,2	4,6	7,7	-3,5	1,5	4,2
1985	2,2	0,3	3,3	12,6	2,4	10,3	32,4	2,0	2,0
1997	0,7	1,3	1,9	2,1	2,2	2,8	9,5	1,5	1,4

On note des taux très différents dans le lointain, se rapprochant aujourd'hui, ce qui traduit une convergence autour de faibles vitesses de variation de part de marché, situation instable. Le cas particulier du nucléaire ressort nettement : il perd en 25 ans tout son effet d'introduction. On retiendra de cette brève présentation de l'histoire des consommations que **sauf effet d'introduction renouvelé, toujours possible sur intervention extérieure**, les dynamiques **normales** des énergies ne peuvent espérer pouvoir prétendre à des valeurs très fortes, retrouvant ainsi leur jeunesse pour les besoins de quelque scénario.

Figure 9a : plan de phase des consommations primaires
charbon, pétrole et gaz (séries lissées)

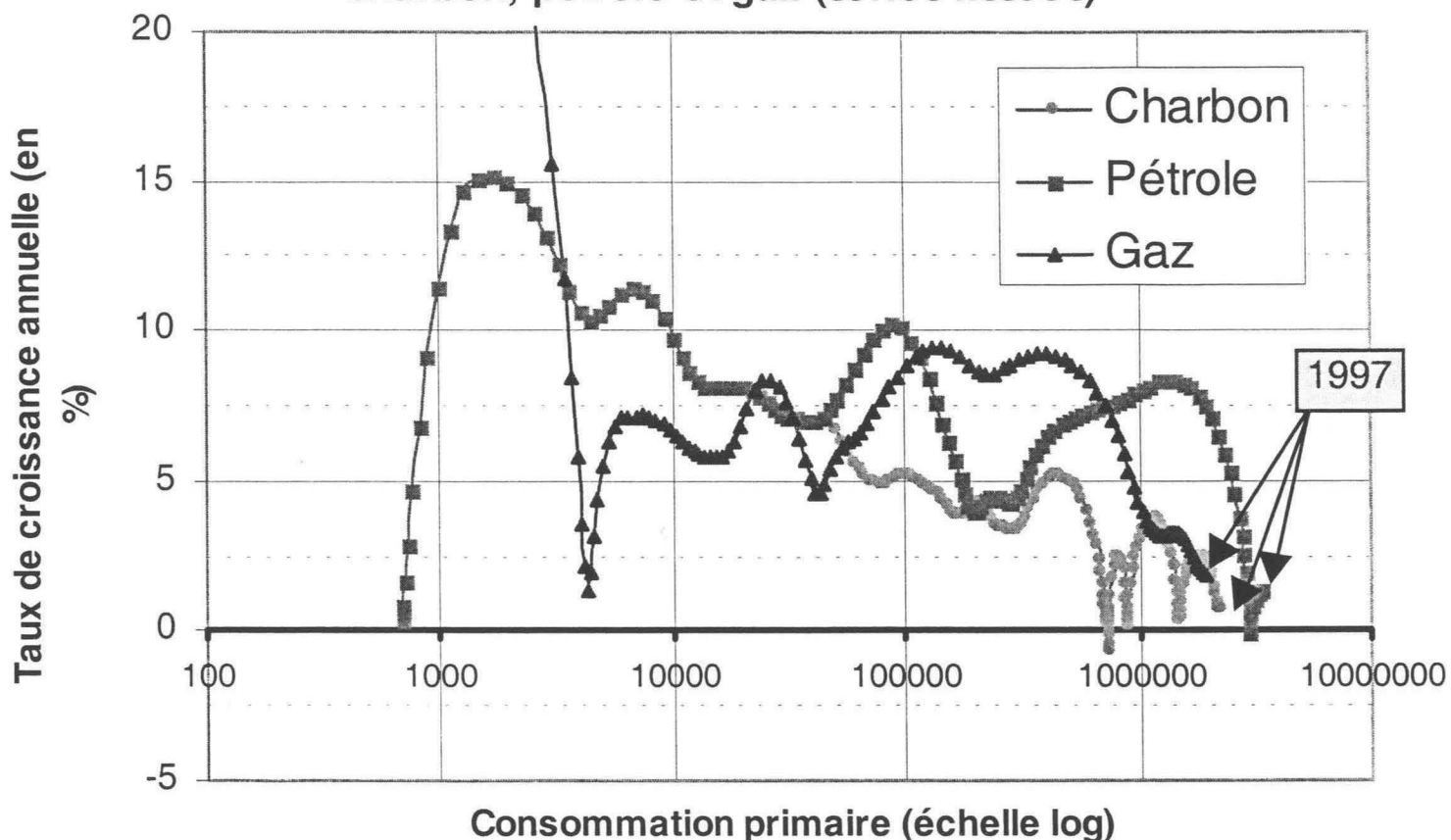
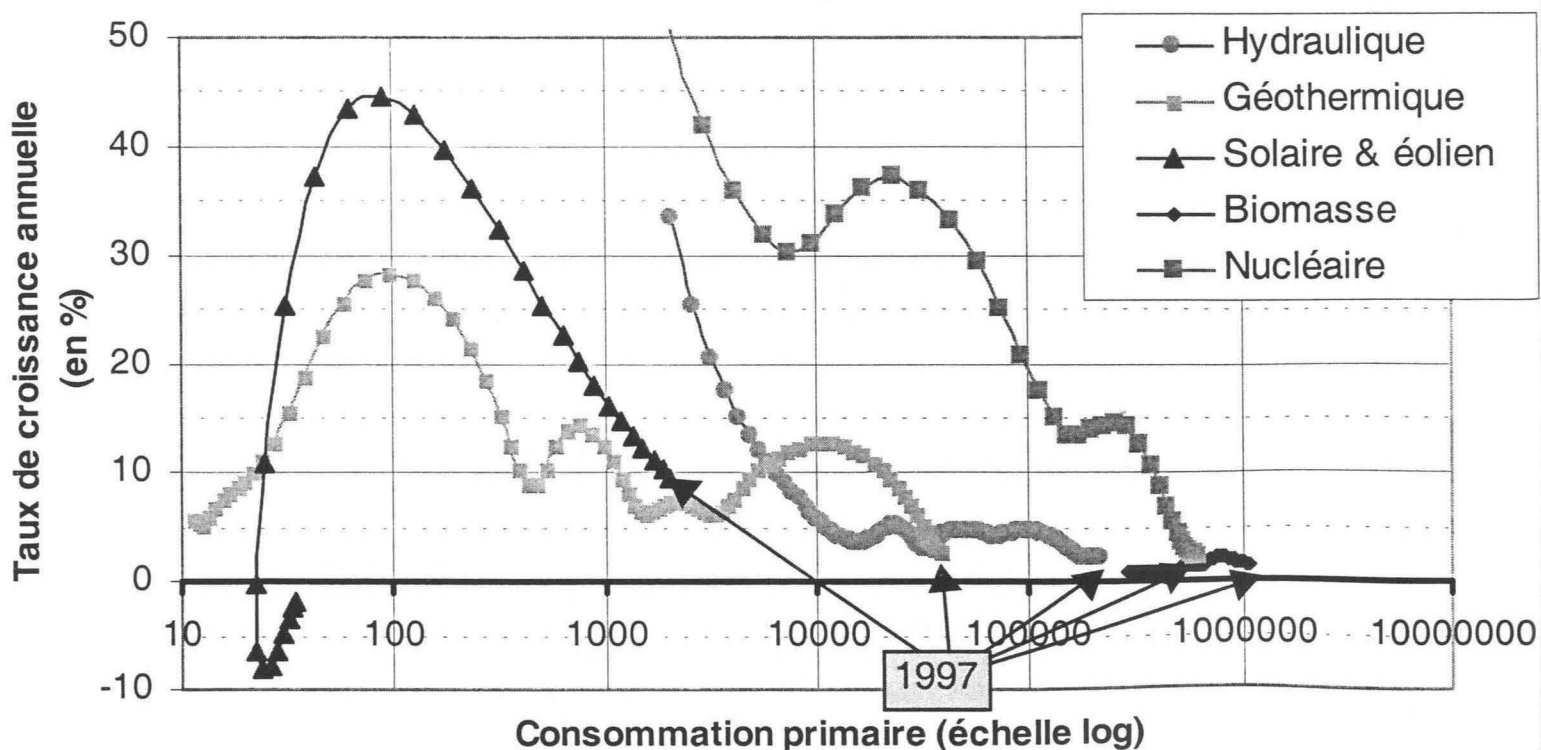


Figure 9b : plan de phase des consommations primaires
hydraulique, géothermique, solaire & éolien, nucléaire (séries
lissées)



3.2 Ce qu'enseigne l'historique des parts de marché

Nous utilisons ici aussi la représentation en phase :

- charbon (cf. figure 10a) : décline rapidement, tente une stabilisation à 25 points, puis reprend un déclin faible, mais à peu près constant, compris entre $-0,5$ et -1 %/an.
- pétrole (cf. figure 10a) : déclin avec une dynamique négative très forte à la suite de chocs, puis reprend une dynamique positive à la suite du contre choc de 1986. Le diagramme de phase suggère une possibilité de reprise de parts de marché au-dessus de 35 points, avec une bifurcation possible : soit reconquête du marché, mais il faudrait alors un taux de croissance que ne confirme pas l'historique des consommations (cf. supra), soit une tentative de stabilisation, peut-être comme le charbon (légère reprise, puis déclin lent).
- gaz naturel (cf. figure 10a) : les taux de croissance de cette énergie à la mode ne sont cependant pas très élevés et la dynamique est fluctuante. Amener le gaz à une part de marché mondiale supérieure aux 25 points que laisse présager une extrapolation simple du courant actuel demandera un effort que l'on sous estime peut-être aujourd'hui. Le gaz est en tous cas un élément essentiel des scénarios futurs. Nous retiendrons qu'il a « tenu » par le passé un taux de croissance de $3,5$ %/an, qui représente une sorte de taux maximum long terme.
- nucléaire (cf. figure 10b) : dynamique négative, amenant le nucléaire, encore faiblement en croissance de part de marché, dans une situation en phase critique, puisque voisine du passage de la zone de croissance à la zone de déclin.
- hydraulique (cf. figure 10b) : demeure en situation de croissance de part de marché, à taux faible (entre $+0,5$ et 1 %/an). Au plan mondial, on est dans des parts de marché de l'ordre de 2 points, ce qui interdit un rôle majeur.
- biomasse (cf. figure 10b) : un déclin se ralentissant progressivement conduit aujourd'hui la biomasse à se stabiliser vers 11 points.
- autres renouvelables : géothermie, solaire et éolien (cf. figure 10b) : la part de marché de la géothermie suit une trajectoire très similaire à celle de la consommation. Il apparaît que seul un choc extérieur, comme dans les années 70, serait de nature à redynamiser la force de pénétration de cette énergie. Dans le cas des énergies solaire et éolienne, les parts de marché sont, comme les consommations, si faibles, que cela appelle un traitement distinct de celui des autres énergies.

Pour résumer, on peut retenir le tableau suivant (taux en %/an) :

Tableau 3 : taux de croissance annuelle des parts de marché des énergies primaires (séries lissées)

	Charbon	Pétrole	Gaz	Nucléaire	Hydraulique	Géothermique	Solaire & éolien	Biomasse
1900	2,0	4,9	3,5	-	-	-	-	-2,3
1930	-1,1	3,8	4,7	-	3,4	16,7	-	-0,2
1950	-1,4	3,4	5,7	-	1,0	9,3	-	-2,4
1960	-1,5	2,7	3,8	-	-0,5	2,3	-	-3,4
1970	-3,7	2,4	2,4	28,4	0,3	3,1	-3,3	-2,7
1985	0,3	-1,8	1,2	9,8	0,4	8,1	29,0	0,0
1997	-0,8	-0,1	0,5	0,5	0,8	1,6	8,7	0,0

Figure 10a : plan de phase des parts de marché
charbon, pétrole et gaz (séries lissées)

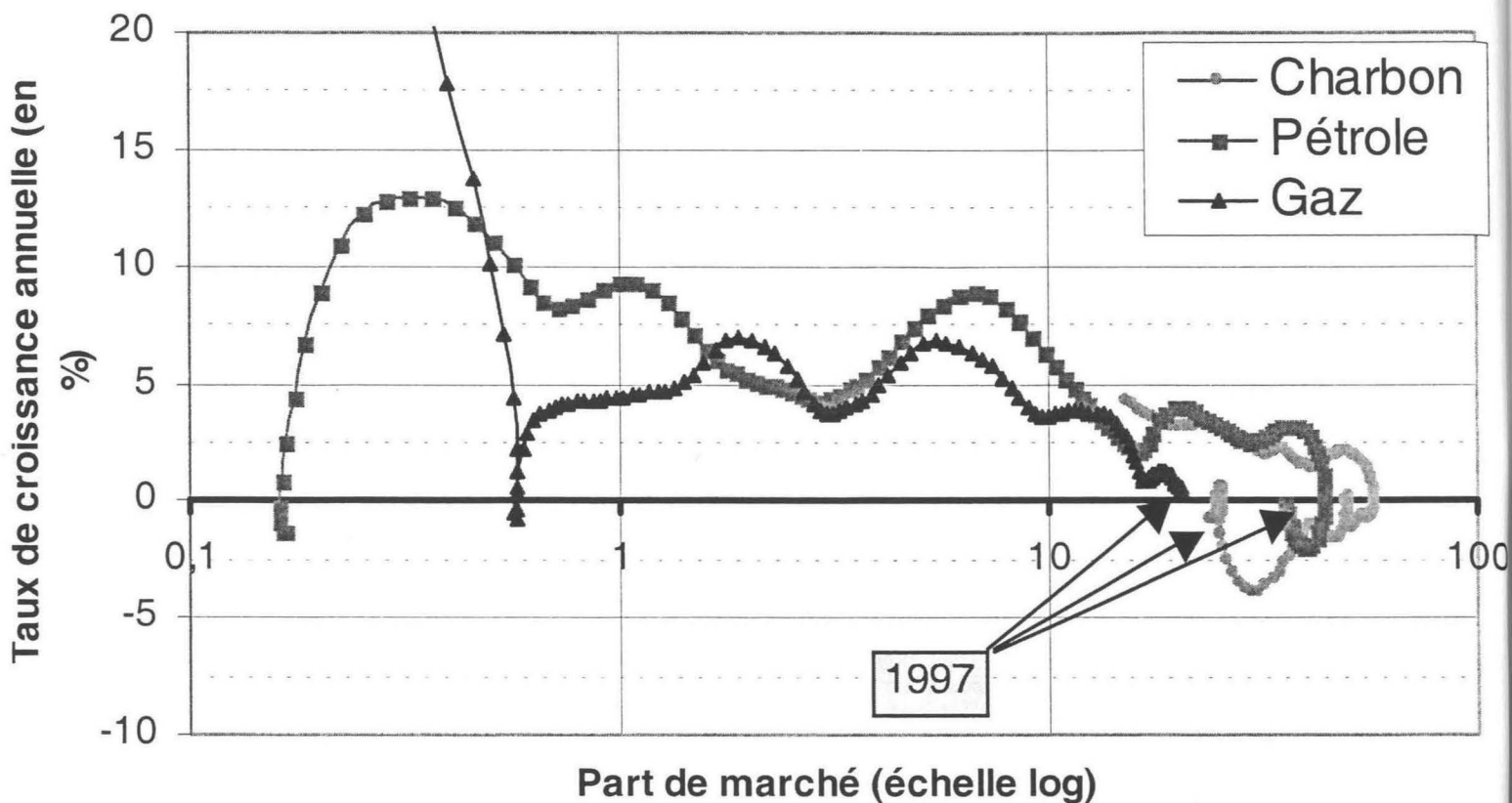
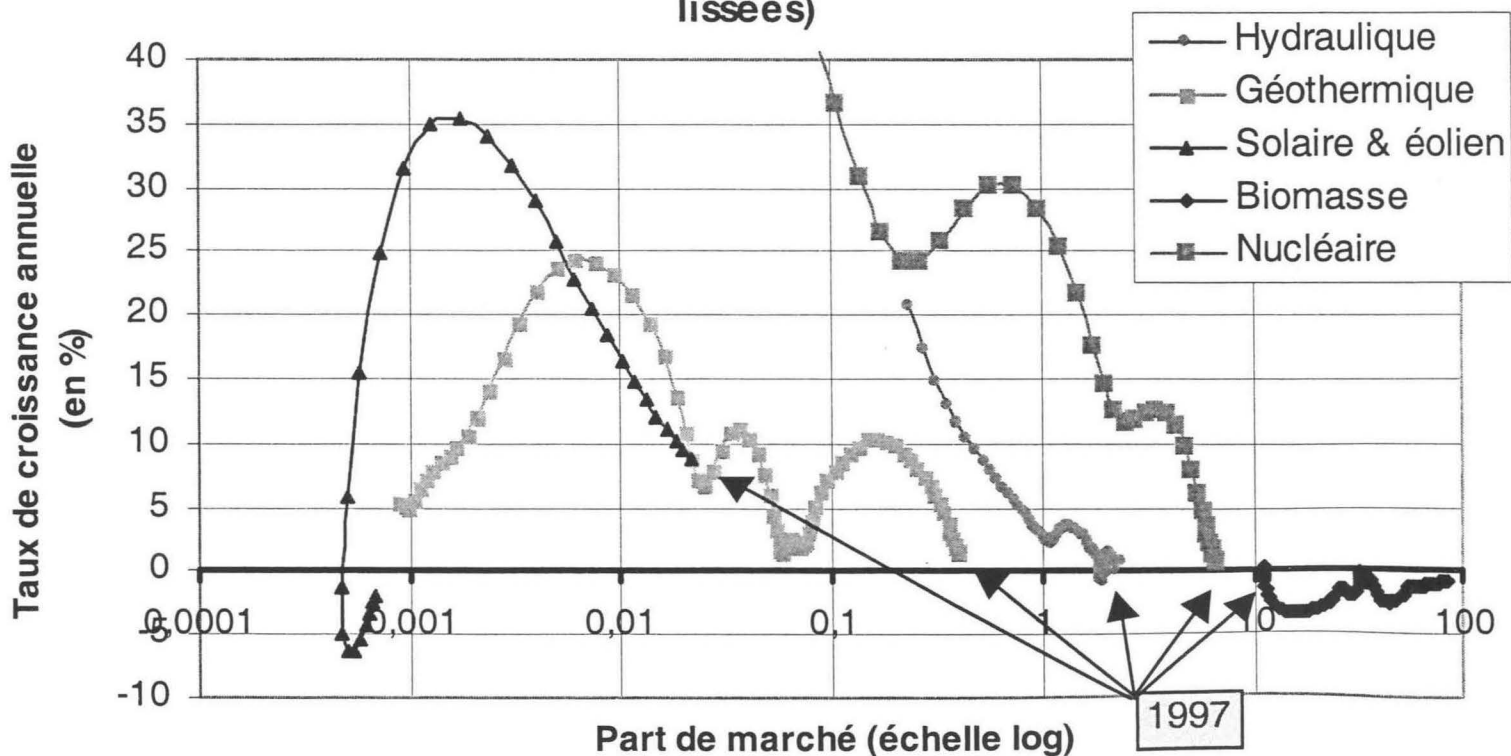


Figure 10b : plan de phase des parts de marché
hydraulique, géothermique, solaire & éolien, nucléaire (séries
lissées)



3.3 La représentation f/c

A la lumière des grandes tendances, en quantité et part de marché, propres à chacune des énergies primaires, la figure 4a fait apparaître une configuration pour le moins intéressante, qui permet d'identifier deux grandes familles d'énergies *selon leur stade de développement* : les énergies indépendantes et en concurrence.

3.3.1 Energies indépendantes et effet d'apparition

Tant que consommation et part de marché sont assez faibles, il existe une relation quasi linéaire entre le logarithme de la part de marché et celui de la consommation, la pente étant indépendante de l'énergie considérée, eu égard à la précision des données. Ceci se conçoit bien :

- ▶ tant que dc/c (énergie primaire) est très supérieur à dC/C (consommation totale), on doit obtenir une relation telle que celle représentée figure 4a. En effet, si dc/c est très supérieur à dC/C , on peut supposer que cette dernière quantité est constante. Alors l'intégration donne $\log f = \log c -$ (un terme linéaire en temps), qui explique l'écart croissant (puisque la pente est inférieure à 1) constaté entre $\log f$ et $\log c$. On a, expérimentalement, $\log f = a \log c + b$ (avec f part de marché, c consommation, a et b constantes). Si on introduit C , consommation totale d'énergie, alors $f = c/C$, et on peut écrire :

$$(1-a)\log c = \log C + b, \text{ et enfin : } dc/c = (1/1-a)*dC/C$$

Cette relation exprime que la mise sur le marché d'une nouvelle forme d'énergie se fait avec un taux constant, fraction $1/(1-a)$ du taux de croissance du marché énergétique : **ceci traduit l'effet d'apparition que nous avons mis en évidence** et explique les parallélismes mis en évidence par Marchetti. Les valeurs de « a », mesurées, sont les suivantes :

Tableau 4 : mesure de l'effet d'apparition des énergies primaires (valeur de « a » sur séries lissées)

Charbon	Pétrole	Gaz	Nucléaire	Hydraulique	Géothermique	Solaire & éolien
0,79	0,79	0,73	0,84	0,70	0,75	0,86

Ces valeurs peuvent être considérées comme quasi identiques, compte tenu de la précision des mesures. Leur intérêt est de fournir, dans la représentation f/c un repère de départ commun à l'ensemble des énergies, qui se différencieront ainsi plus convenablement. **Tout se passe, à peu près, lors de leur apparition, comme si le développement des énergies était indépendant de l'existence des autres énergies, en se situant dans une zone spécifique du plan f/c. Nous retiendrons l'appellation d'énergies indépendantes pour celles d'entre elles qui sont encore dans cette zone du plan f/c : ce sont aussi les énergies renouvelables.**

3.3.2 Energies en concurrence

Pour des valeurs notables de part de marché et de consommation, supérieures à 100 Mtep et environ 2 points de part de marché, les trajectoires énergétiques s'infléchissent et traduisent des comportements de réactions inter énergies : ces comportements sont très différenciés. **Nous sommes en zone de concurrence.** On est alors conduit à une différenciation complémentaire :

- ▶ part de marché : en croissance (gaz), stagnation (pétrole, hydraulique, biomasse) ou décroissance (charbon)
- ▶ consommation : en croissance ou décroissance

Même si aujourd'hui aucune consommation ne décroît (mais notre série s'interrompt en 1997), il est raisonnable de prévoir un tel cas de figure, qui est retenu dans certains scénarios (cf. 4 infra). Si l'on se reporte au diagramme f/c, on constate que ces configurations correspondent à des trajectoires de formes bien différenciées.

3.3.3 Le cycle de vie énergétique

Les considérations précédentes incitent à proposer la notion de **cycle de vie énergétique**. Nous prendrons en compte deux groupes d'éléments : la courbure des trajectoires dans le plan logarithmique f/c et les évolutions des consommations et des parts de marché. Cette approche, très simple, permet de distinguer les époques présentées ci-après :

Phase du cycle de vie énergétique	Evolution de la consommation	Evolution de la part de marché	Courbure de la trajectoire dans le repère f/c
<i>Apparition</i>	croissance	croissance	très faible
<i>Maturité</i>	croissance	croissance	sensible
<i>Retrait</i>	croissance ralentie	stable	très sensible
<i>Déclin</i>	décroissance	décroissance	très faible (sens inversé)
<i>Noyau dur</i>	faible croissance	stable	nulle

La phase de « *noyau dur* » correspond à une part de marché résiduelle de nature technologique ou sectorielle susceptible d'apparaître à l'issue de la phase de « *déclin* » ou de « *retrait* ».

Les énergies géothermie et solaire sont en apparition, le gaz naturel et le nucléaire en maturité. Charbon et pétrole ont connu des pertes de parts de marché et des baisses de consommation : le retrait est indiscutable, alors que la biomasse est en noyau dur. L'hydraulique est quelque part entre maturité et retrait. Ce classement n'a rien d'irréversible, sauf l'effet d'apparition : ce que l'on peut dire est que l'allure des plans de phase charbon et pétrole les distingue clairement des autres, car ils sont passés, dans le plan de phase des parts de marché (figure 10a), dans le demi-plan inférieur qui est l'espace du retrait (la biomasse y figurant de toujours, mais s'accrochant à son actuelle part de marché) alors que les autres formes d'énergie sont dans le demi-plan supérieur.

3.4 Conclusion : savoir d'où l'on vient

Au plan quantitatif, on peut retenir, en complément des tableaux 2 et 3 :

Tableau 5 : résumé de l'historique (gains et pertes de parts de marché en points par an)

Consommation* Énergétique Mondiale	Charbon	Pétrole	Gaz	Nucléaire	Hydrau- lique	Géo- thermique	Solaire & éolien	Biomasse
De 1850 à 1914/18 Croissance de 2 % par an Dynamique modérée.	Gains croissants de 0,6 à 1	Gains continus de 0,1 au maximum	Gains croissants faibles < 0,05	-	Gains réguliers de l'ordre de 0,04	-	-	Pertes de l'ordre de -0,8
De 1914/18 au début des années 30. Croissance proche de 1 % par an. Dynamique faible.	Pertes de -0,4	Gains de l'ordre de 0,5	Gains de l'ordre de 0,1	-	Gains réguliers de l'ordre de 0,03	Gains faibles	-	Pertes de l'ordre de -0,2
Du milieu des années 30 à l'après 2 ^{ème} guerre mondiale. Croissance proche de 2 % par an. Dynamique perturbée.	Stabilité puis pertes croissantes jusqu'à -0,7	Gains croissants de 0,3 à 0,8	Gains croissants de 0,1 à 0,4	-	Gains décroissants de 0,5 à 0,2	Gains faibles	-	Pertes de l'ordre de -0,5
De la fin des années 40 au début des années 60. Croissance supérieure à 4 % par an. Dynamique forte.	Pertes de l'ordre de -0,6	Gains de l'ordre de 0,8	Gains de l'ordre de 0,4	-	Gains faibles décroissants jusqu'à la stabilité	Gains faibles	-	Pertes de l'ordre de -0,6
Du début des années 60 au début des années 80. Croissance proche de 3 % par an. Dynamique négative.	Pertes croissantes jusqu'à -1,2 puis retour à la stabilité	Gains rapides jusqu'à 1,2 puis fortes pertes jusqu'à -0,8	Erosion des gains de 0,4 à 0,2	Gains rapides de 0 à 0,4	Gains faibles < 0,05	Gains faibles mais rapides jusqu'à 0,02	non significatif	Erosion des pertes de -0,6 jusqu'à la stabilité
Du début des années 80 à la fin des années 90. Croissance proche de 2 % par an. Dynamique négative faible.	Gains décroissants puis pertes croissantes jusqu'à -0,2	Erosion des pertes de -0,8 à -0,1 Tendance à la stabilité	Légère érosion des gains de 0,2 à 0,1	Rapide érosion des gains de 0,4 à moins de 0,1	Gains très faibles < 0,01	Erosion des gains (très faibles) jusqu'à la stabilité	Gains très faibles	Stabilité

* Rappel : une dynamique positive traduit une accélération, une dynamique négative un ralentissement.

Nous avons décrit le modèle que nous proposons pour représenter l'évolution du système énergétique. Ce modèle repose sur l'examen, suivant la même méthode, des consommations et des parts de marché, puis sur la représentation des phénomènes d'évolution dans le système de coordonnées défini par ces variables (f/c). L'expérience passée fait apparaître deux domaines distincts : celui marqué par l'effet d'introduction, dans lequel la concurrence ne joue pratiquement pas, d'où le terme de zone d'indépendance dans la représentation f/c , et celui de la compétition entre énergies.

Le fait majeur issu de ce regard porté sur les tendances passées réside dans l'observation de limites à l'évolution des énergies. Quelle que soit la situation de l'énergie considérée, indépendante ou en concurrence, il apparaît a posteriori que même au cours de la période qui lui aura été la plus favorable, les variations de part de marché n'atteignent, en tendance, que très exceptionnellement 1 point par an et que les taux de croissance des consommations des énergies en concurrence ne deviennent que difficilement très différents du taux de croissance de la demande globale. Sans constituer un dogme, les conclusions que l'on peut tirer de ces observations sont de nature à préciser le degré de vraisemblance des scénarios énergétiques : sous quelles conditions ce qui n'a jamais été observé au cours de l'histoire le serait-il dans un futur relativement proche de 10 à 20 ans ?

4. Application à l'élaboration de scénarios énergétiques

Nous allons nous placer dans un cas simple : une demande mondiale étant retenue, comment la satisfaire ? Dans notre représentation, cela revient à déterminer quelles trajectoires sont raisonnablement possibles, c'est à dire sans faire appel à des taux de variation, de consommation et de part de marché, en fait peu plausibles, même si l'on peut imaginer n'importe quoi. Dans le passé, on n'a pas fait mieux que le premier choc pétrolier pour modifier une consommation : certes le pétrole a accusé le coup mais il a assez vite maintenu une place considérable, avant même que les errements de l'OPEP ne lui rendent sa prééminence et ne servent de leçon.

Nous choisissons donc deux repères de consommation d'énergie mondiale : le premier à 12 Gtep car il semble présenter une forte probabilité d'occurrence à l'horizon 2020, le second à 14 Gtep car il permet de placer une limite à notre cadre de référence dans le sens où nous pensons qu'un tel niveau de consommation ne sera probablement pas atteint en 2020. On pourrait retenir d'autres valeurs, mais, à présenter une méthode, tant vaut-il l'illustrer par un exemple réaliste. Nous ne faisons aucune hypothèse sur la dynamique de croissance de la demande globale.

4.1 Première approche par des scénarios tendanciels linéaires

En première approche, nous allons nous borner à des scénarios tendanciels **par extrapolation linéaire dans le repère logarithmique f/c** : dans ce repère, cela revient à établir un scénario de base, **celui du maintien des tendances assez longues**, donc à ne pas remettre en cause la position de chaque énergie dans le schéma du cycle de vie puisque nous supposons que les trajectoires ne poursuivent pas leur infléchissement naturel. Nous allons considérer nos deux cas de référence : sur le graphe de la figure 4a, nous superposons deux droites parallèles à la première bissectrice et à la droite de demande de 1997 (9,47 Gtep) représentant les demandes de 12 et 14 Gtep et recherchons, par extrapolation linéaire, où devraient se situer les contributions absolues (Gtep) et relatives (part de marché) des différentes énergies (cf. figures 11a et 11b, respectivement énergies renouvelables et fossiles, page suivante). Nous bouclons sur le nucléaire dont la tendance n'est pas aisément extrapolable, en raison d'un très net début de courbure et des incertitudes propres.

Les coordonnées du point d'intersection de la droite de demande totale et de la trajectoire d'une énergie primaire dépendent de la période que nous retenons pour extrapoler linéairement cette dernière. Comme le montrent les figures 11a et 11b, chaque énergie constitue un cas particulier que nous traitons comme tel :

- le charbon présente, en dépit de la progression de sa consommation, une phase de déclin continu de sa part de marché depuis 1913. La période sur laquelle nous basons le calcul de tendance linéaire est donc la période 1913-1997 (cf. figure 11b – point 1).
- la trajectoire du pétrole subit une forte dépression depuis 1975, proche en apparence de celle que l'on observe pour le charbon au début du siècle. La période de référence est 1975-1997 (cf. figure 11b – point 2).
- au contraire du charbon et du pétrole, la trajectoire du gaz ne présente pas de point de retournement. Nous observons néanmoins l'accentuation de la courbure. La période de référence est 1971-1997 (cf. figure 11b – point 3).
- l'énergie hydraulique parvient à maintenir et à accroître légèrement sa part de marché depuis plusieurs décennies mais son potentiel de croissance semble à présent épuisé. La période de référence est 1951-1997 (cf. figure 11a – point 4).
- l'énergie géothermique semble avoir retrouvé un certain dynamisme comme en témoigne le point d'inflexion au milieu de la trajectoire. La période de référence est 1974-1997 (cf. figure 11a – point 5).
- les énergies solaire et éolienne présentent une trajectoire caractéristique d'une « nouvelle » énergie : la trajectoire rectiligne traduit l'effet d'apparition, les gains de part de marché étant quasi proportionnels à la progression de la consommation dans les premiers temps. La période de référence est 1976-1997 (cf. figure 11a – point 6).
- le cas de la biomasse est traité en faisant l'hypothèse, simpliste mais non dénuée de sens au vu de la trajectoire des 20 dernières années, que sa part de marché reste stable : ceci revient à fixer sa consommation.

L'équation de la droite de régression, que nous calculons sur chacune des périodes de référence, fournit par intersection avec la droite de demande totale parallèle à la première bissectrice (dans notre cas 12 et 14 Gtep), la consommation (en Gtep) et la part de marché qui correspondent à la contribution de l'énergie considérée (cf. tableaux 6 et 7). Les figures 12a à 12f (page 26) illustrent les trajectoires de chaque énergie dans le repère f/c en tenant compte des phases d'accélération / décélération (selon le cas) qu'elles impliquent à l'horizon 2020.

Figure 11a : Positions f/c des énergies renouvelables dans les scénarios 2020 - 12 et 14 Gtep

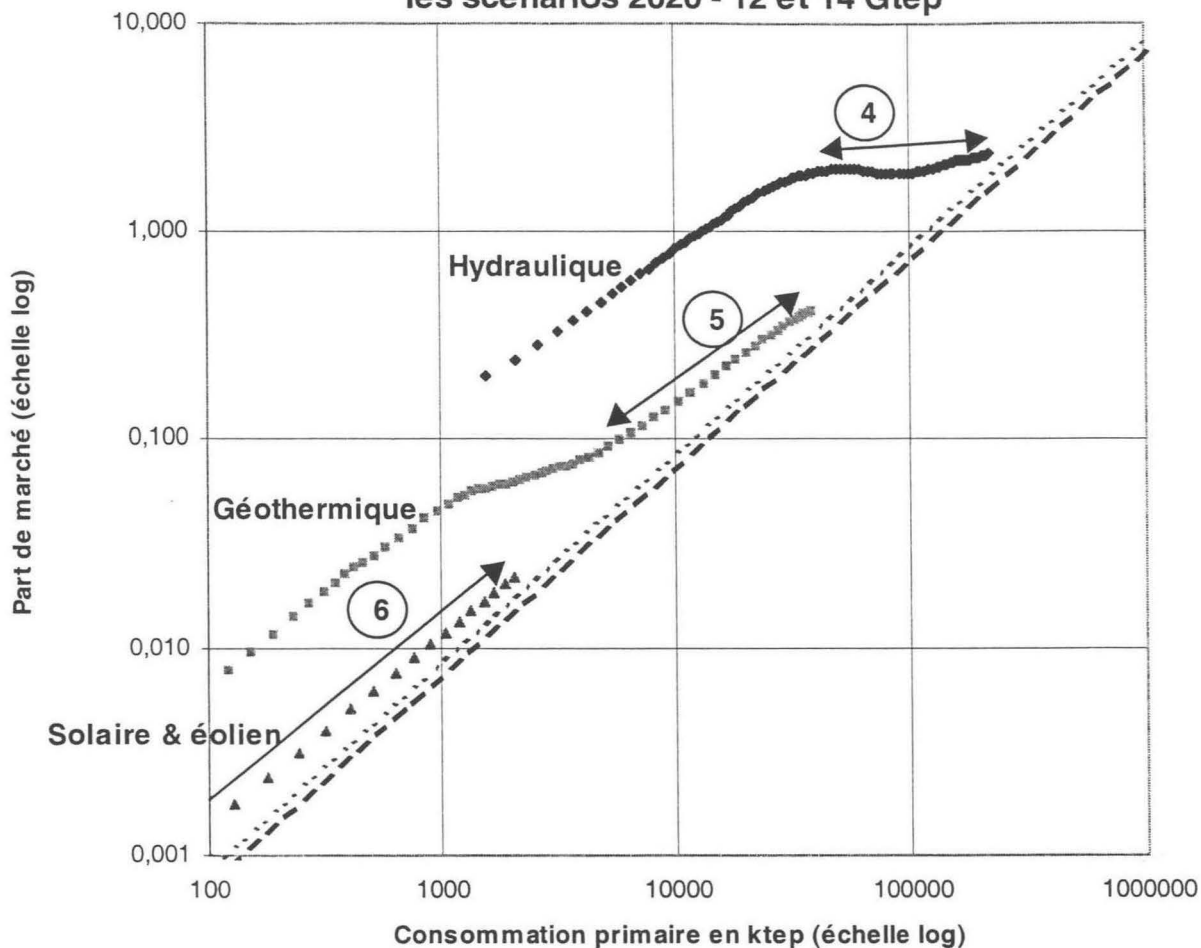
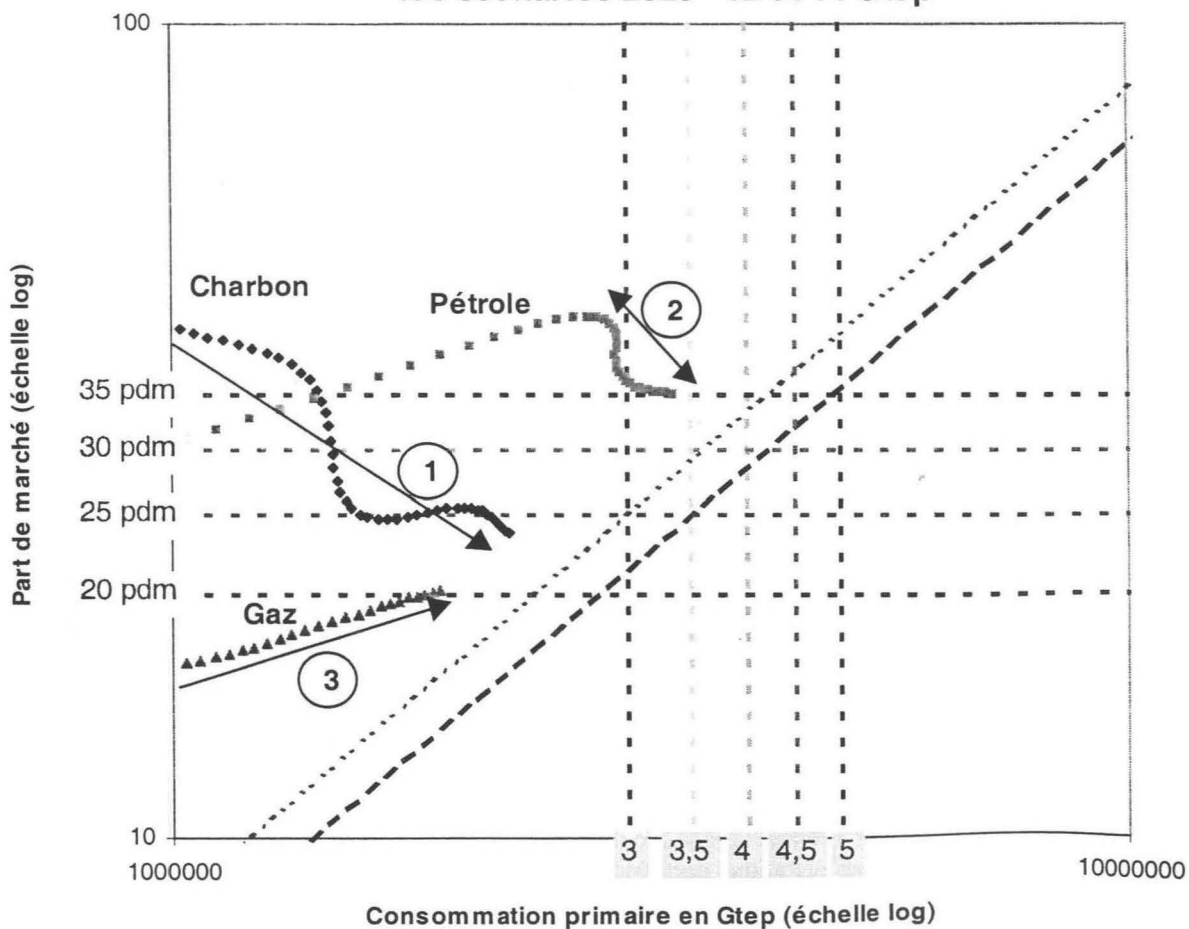


Figure 11b : Positions f/c des énergies fossiles dans les scénarios 2020 - 12 et 14 Gtep



Les intersections relatives à la géothermie et au solaire / éolien sont évidemment peu précises, du fait des pentes voisines de 1 des droites traduisant ici les scénarios tendanciel linéaires. L'intérêt du calcul est de fournir un ordre de grandeur non arbitraire.

Tableau 6 : contribution des énergies primaires à une consommation mondiale de 12 Gtep par scénario tendanciel linéaire

	Charbon	Pétrole	Gaz	Hydraulique	Géothermique	Solaire	Biomasse
Consommation en Gtep	2,50	3,63	2,73	0,27	0,13	0,01	1,34
Part de marché (en points)	20,85	30,22	22,77	2,24	1,11	0,08	11,2

Tableau 7 : contribution des énergies primaires à une consommation mondiale de 14 Gtep par scénario tendanciel linéaire

	Charbon	Pétrole	Gaz	Hydraulique	Géothermique	Solaire	Biomasse
Consommation en Gtep	2,73	3,85	3,43	0,32	0,27	0,03	1,57
Part de marché (en points)	19,50	27,50	24,53	2,29	1,93	0,21	11,2

Dans les deux cas d'une consommation mondiale de 12 Gtep et 14 Gtep, la somme des contributions des sept énergies primaires que nous avons passées en revue s'élève respectivement à 10,62 et 12,20 Gtep. En faisant abstraction du nucléaire, le déficit d'approvisionnement serait de 1,38 Gtep dans le cas d'une demande de 12 Gtep et de 1,80 Gtep dans le cas d'une demande de 14 Gtep.

Ce modèle très simple présente l'avantage de quantifier, si l'on peut dire, plusieurs interrogations classiques, mais souvent entachées de passion :

- peut-on techniquement envisager que les énergies à CO₂ poursuivent une progression à près de 10 Gtep contre 6,7 Gtep actuellement ?
- la rupture dans la trajectoire du pétrole est-elle annonciatrice d'un déclin similaire à celui frappant le charbon depuis le début du siècle ? Devons-nous par conséquent retenir pour le calcul de la tendance linéaire la période commençant en 1975 ou bien à une date antérieure ? La contribution potentielle du pétrole serait dans le cas présent nettement sous-estimée.
- la trajectoire du gaz naturel subit un infléchissement : le futur sera-t-il celui d'un prolongement sans heurt ou bien d'un décrochage brutal tel que l'ont connu le charbon et, peut-être, le pétrole (cf. figure 4a – points A et B) ?
- la contribution des énergies renouvelables hors biomasse est-elle condamnée, à l'horizon de temps que nous retenons, à ne représenter que moins de 5 % de la consommation mondiale ?
- peut-on envisager que le nucléaire triple, d'ici 20 ans, sa contribution actuelle de 0,6 Gtep à près de 2 Gtep ?

Pour aller plus loin, il convient de bien mettre en évidence le contenu implicite de l'extrapolation linéaire dans le plan logarithmique f/c. **L'extrapolation linéaire dans le plan logarithmique f/c équivaut à supposer que le rapport du taux de croissance de l'énergie considérée au taux de croissance de la demande globale est constant :**

en effet, si $\log f_i = k_i \cdot \log c_i + \text{constante}$,

alors $df_i/f_i = k_i \cdot dc_i/c_i$

et comme $df_i/f_i = dc_i/c_i - dC/C$, il vient : $k_i = 1 - (dC/C)/(dc_i/c_i)$

L'extrapolation considère le ratio moyen sur la période de référence et le projette vers la demande globale retenue. Or nous n'avons fait aucune hypothèse sur le taux de croissance de la demande globale : l'extrapolation linéaire revient ainsi à considérer que le taux relatif à une certaine énergie sera, vers le futur, dans le même rapport que ce qu'il fut dans la période de référence. Pour cela, il n'est effectivement pas nécessaire de connaître le taux de la demande globale : seule intervient la position de la droite de demande.

L'usage de la linéarité est cependant discutable à deux niveaux, malgré sa commodité :

- au premier niveau, correspondant à la tendance de long terme, le mode de représentation f/c montre qu'une évolution quasi linéaire ne correspond qu'à la phase très particulière et temporaire d'apparition d'une énergie. A l'exception de ce segment, la trajectoire présente une courbure plus ou moins prononcée selon le cas, négligeable dans le futur proche mais incontournable pour l'horizon de temps

Figure 12a : Scénarios f/c Hydraulique 2020

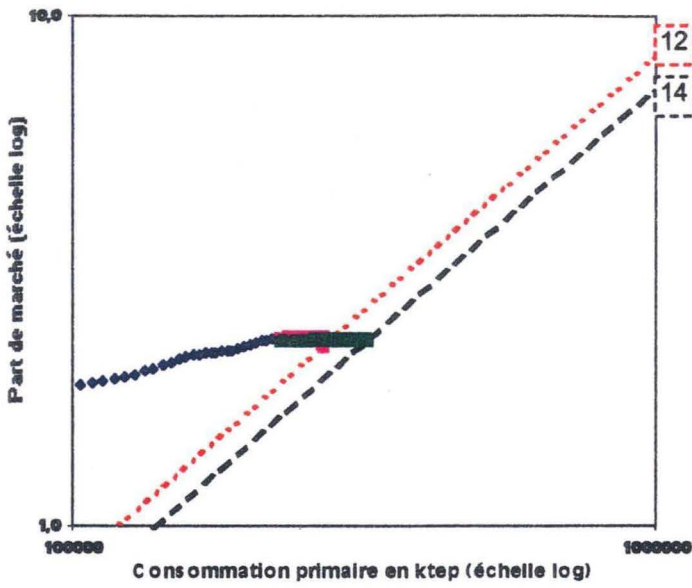


Figure 12c : Scénarios f/c Solaire & éolien 2020

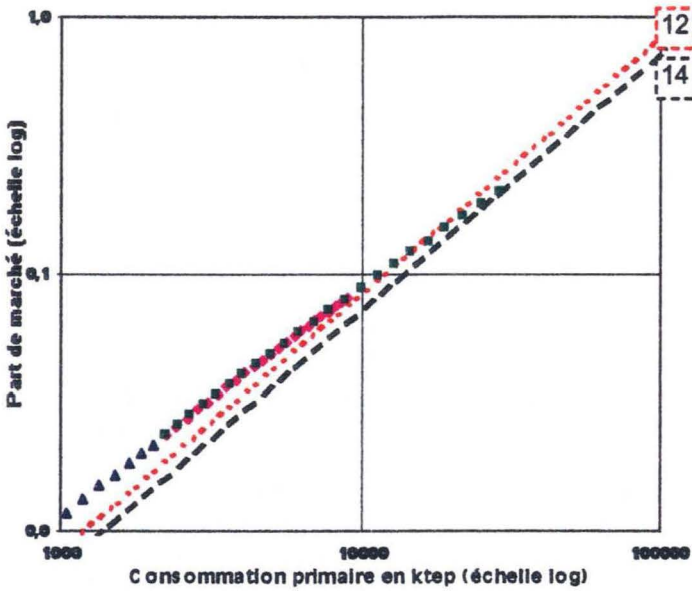


Figure 12e : Scénarios f/c Pétrole 2020

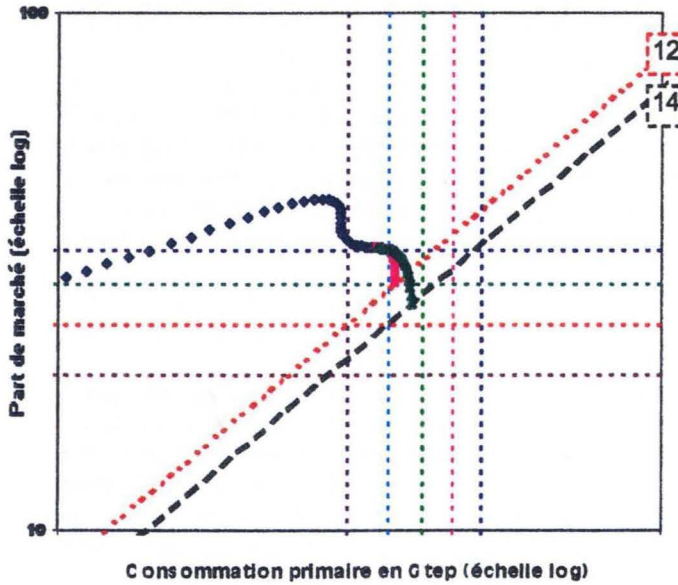


Figure 12b : Scénarios f/c Géothermique 2020

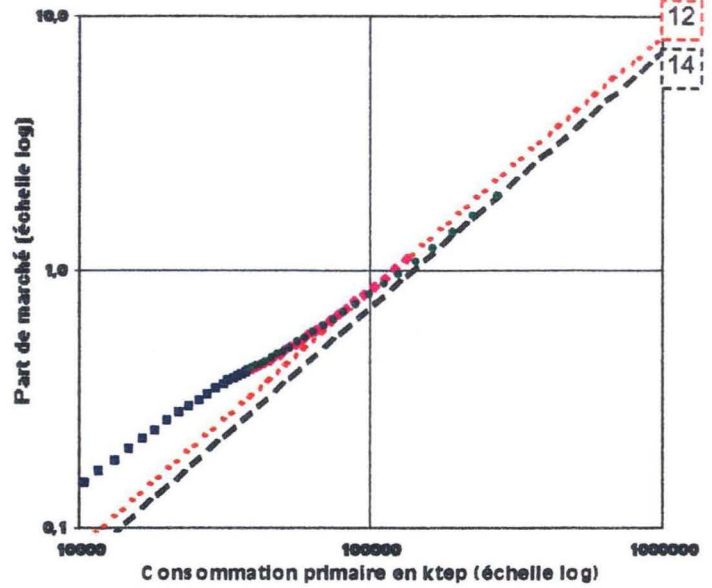


Figure 12d : Scénarios f/c Charbon 2020

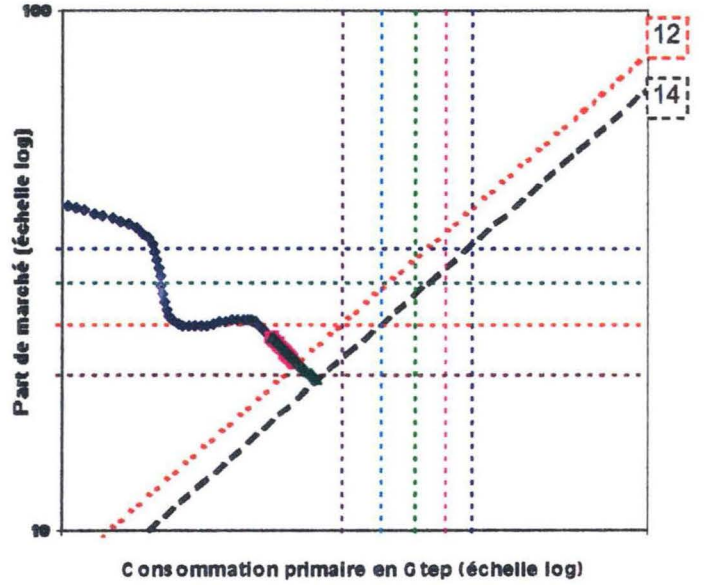
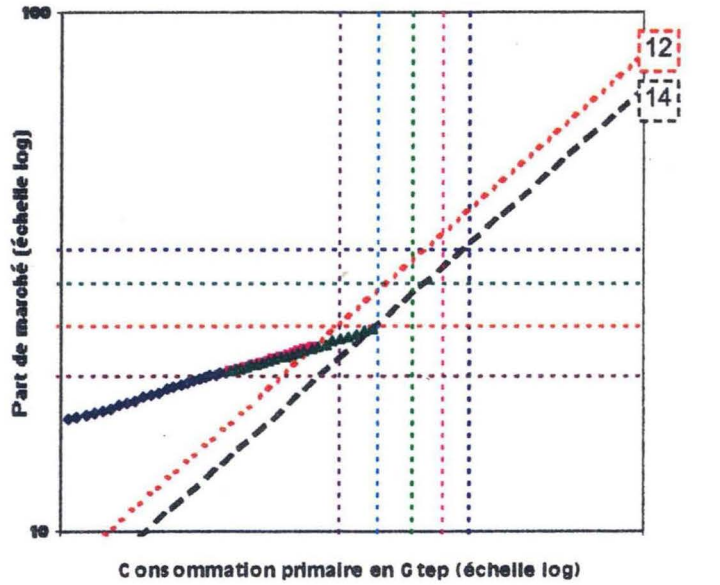


Figure 12f : Scénarios f/c Gaz 2020



Note : courbe rose = scénario 12 Gtep ; courbe verte = scénario 14 Gtep.

qui nous intéresse, les trajectoires étant amenées à se courber plus qu'aujourd'hui, comme nous le verrons ci-dessous. L'extrapolation linéaire ne peut ici être satisfaisante que si l'univers énergétique est peu « courbé », c'est-à-dire à court terme.

- au second niveau portant sur la tendance de court/moyen terme, l'extrapolation linéaire doit être complétée du fait de l'existence de phases de dynamique variable (croissance/décroissance en accélération/décélération), relatives aux évolutions en tonnages et en parts de marché, dont la caractéristique première est d'échapper à toute linéarité⁶.

Toutefois, en première approximation, du fait de la prise en compte simultanée des deux dimensions que sont les tonnages et les parts de marché, l'usage de scénarios tendanciels linéaires peut fournir des éléments d'interrogations, quant aux demandes énergétiques, notamment en ce qui concerne le point majeur du déficit apparent des approvisionnements énergétiques qui semble devoir s'élever à un minimum proche de 1 Gtep à l'horizon 2020. Le problème qui émerge est alors de déterminer à quelles conditions économiques et/ou technologiques ce déficit peut être comblé et, ultérieurement, quelles seraient les conséquences s'il ne devait pas l'être : les scénarios linéaires permettent ainsi de se poser des questions fondamentales sous tendues par quelques éléments quantitatifs.

4.2 L'espace des scénarios

Notre problème méthodologique - comment améliorer l'élaboration des scénarios ? - demande à l'évidence de disposer de plus de paramètres que la simple extrapolation log-linéaire. Cela revient à proposer des trajectoires relatives à chaque énergie.

Pour ce faire, tout en restant simple, le premier élément à considérer est la dynamique (ce que ne permet pas l'extrapolation linéaire). Mais ce degré de liberté nous impose de ne pas proposer des évolutions que l'analyse du passé nous aurait montrées peu réalistes. Enfin, pour les vieilles substances énergétiques, pétrole, charbon, gaz naturel, il semble naturel de fixer des limites aux valeurs des consommations, limites liées à ce que l'on sait des réserves et des contraintes qu'elles supportent.

Il conviendra, de plus, s'agissant des trajectoires dans les plans de phase, de se rappeler qu'un scénario ne peut être traduit par une droite, pour rester simple, sans omettre ce qui se passe ensuite, puisque, dans cet espace particulier, les trajectoires doivent revenir vers l'axe horizontal.

Comme il n'est pas contestable que les trajectoires des énergies s'infléchissent lentement (cf. figure 4a), il est donc finalement clair que le problème des scénarios, hors l'extrapolation linéaire, est celui de l'espace autorisé aux évolutions de trajectoires, compte tenu des contraintes de vitesse, de dynamique, que nous avons mises en évidence en première partie.

Plus concrètement, le canevas de départ est constitué de la représentation logarithmique « quantité c / part de marché f », sur lequel on dispose des historiques des énergies et des **droites de demande** de 12 et 14 Gtep (cf. figures 11a : énergies renouvelables et 11b : énergies fossiles). Nous ajoutons des **frontières**, limites supposées de production (de 3 à 5 Gtep) et de part de marché (de 20 à 35 points) pour charbon, pétrole et gaz, car il n'est pas aberrant de concevoir que ces énergies fossiles seront un jour **limitées**, soit par **difficultés géologiques**, soit par **contraintes** (émission de CO₂, cartellisation). Les droites de demande et les frontières sont en quelque sorte les paramètres d'encadrement des différents scénarios. Les scénarios eux-mêmes sont les trajectoires retenues pour les différentes formes d'énergie. **L'espace des scénarios** est la zone du plan qui paraît devoir marquer les limites d'évolution de la trajectoire.

L'établissement des scénarios passe par la représentation en phase, étant donnée la nécessité de prendre en compte les éléments dynamiques (vitesse, dynamique) autant que quantitatifs (quantité, parts de marché).

L'objectif final de nos propositions réside dans une évaluation plus précise du déficit minimum d'approvisionnements énergétiques dans le cadre de référence que nous retenons comme très vraisemblable à l'horizon 2020, soit une consommation mondiale de 12 à 14 Gtep. Nous procédons en traitant dans un premier temps le cas des énergies renouvelables puis celui des énergies fossiles, étant entendu que nous bouclons encore sur le nucléaire : ce choix est justifié par le fait que les incertitudes relatives à cette énergie ne sont pas de nature à permettre un traitement rationnel de son cas.

⁶ P. Alba et O. Rech, Revue de l'énergie, n° 514, février 2000.

4.2.1 Evaluation des contributions des énergies renouvelables

La biomasse, première des énergies renouvelables par la contribution à la consommation totale, agrège les usages traditionnels comme les usages les plus sophistiqués de valorisation des déchets industriels, végétaux et animaux. La prépondérance des usages traditionnels ainsi que l'absence de données complètes sur les filières modernes nous incitent à traiter l'ensemble sans distinction et à formuler une hypothèse fondée sur la stabilité de la part de marché sur les 20 dernières années (environ 11 points).

Les énergies hydraulique, géothermique, solaire et éolienne présentent des profils contrastés lorsque l'on considère les trajectoires de long terme (cf. figure 4a) : d'une part les énergies géothermique, solaire et éolienne dont la trajectoire de long terme promet un potentiel de croissance, d'autre part l'énergie hydraulique à présent dans une phase de maturité, l'effet d'apparition étant épuisé. Dans ce dernier cas, cela signifie que l'énergie hydraulique ne paraît pas en mesure de s'écarter de façon significative du rythme de croissance de la consommation totale, ceci étant par ailleurs lié à une très longue durée de vie des équipements.

La trajectoire naturelle dans le repère f/c montre clairement que les gains de parts de marché sont moins que proportionnels à la croissance de la consommation au fur et à mesure que l'énergie considérée rentre dans la zone de concurrence avec les énergies que nous qualifions d'installées. L'histoire des énergies renouvelables laisse apparaître deux exceptions à cette règle, au demeurant de natures différentes :

- la trajectoire de l'énergie géothermique présente un fléchissement entre le début des années 50 et la fin des années 60 avant de revenir de façon durable à une pente caractéristique d'une énergie « nouvelle ». Ce phénomène est la traduction graphique de l'intérêt suscité par les énergies renouvelables à partir du premier choc pétrolier.
- la trajectoire de l'énergie hydraulique témoigne certes du passage de la phase d'apparition à la phase de maturité à partir des années 50, mais la période des chocs pétroliers a été, comme dans le cas de l'énergie géothermique, à l'origine d'une nouvelle dynamique.

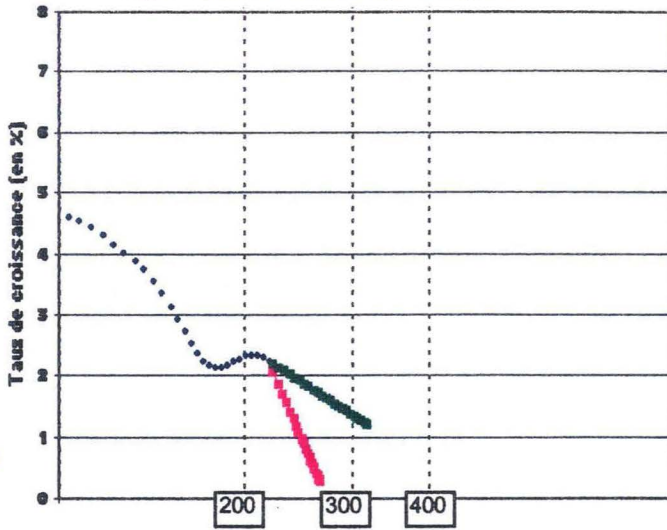
L'approche linéaire peut ainsi conduire à sous-estimer ponctuellement la contribution de certaines énergies dans des circonstances particulières. Même si nous retenons ces deux exceptions, nous bâtissons nos propositions en nous appuyant sur le cycle de vie énergétique (décrit au § 3.3.3 Le cycle de vie énergétique). Les figures 13a à 13c et 14a à 14c projettent dans la représentation en phase les contributions et les parts de marché des différentes énergies renouvelables à l'horizon 2020.

Energie hydraulique

A ce stade, il convient de distinguer et d'insister sur la nature des deux périodes de référence caractérisant la trajectoire de l'énergie hydraulique : la période 1951-1997 fait référence au cycle de vie énergétique (évolution conjointe de la consommation et de la part de marché) alors que la période 1970-1997 marque le mouvement de décélération continue de la croissance de la consommation (dynamique négative) à l'exception d'un très bref retournement de tendance entre 1989 et 1994. La contribution que nous avons calculée par extrapolation linéaire de la période 1951-1997 repose sur une dynamique de croissance de la consommation proche de la tendance historique 1970-1997 (cas du scénario 12 Gtep) ou inférieure (cas du scénario 14 Gtep) (cf. figure 13a). Cette trajectoire se traduit toutefois par un effondrement de la dynamique de progression de la part de marché qui diminue en valeur absolue dans les deux cas (de 2,32 pdm en 1997 à 2,24 pdm dans le scénario 12 Gtep et 2,29 pdm dans le scénario 14 Gtep) : nous ne pouvons représenter cette trajectoire sur la figure 14a en raison de notre approche en variation relative (pourcentage) par opposition à une approche en variation absolue (cf. annexe A3 La représentation en phase) sauf à choisir de façon totalement arbitraire les coordonnées de l'intersection de la trajectoire en phase et de l'axe des abscisses.

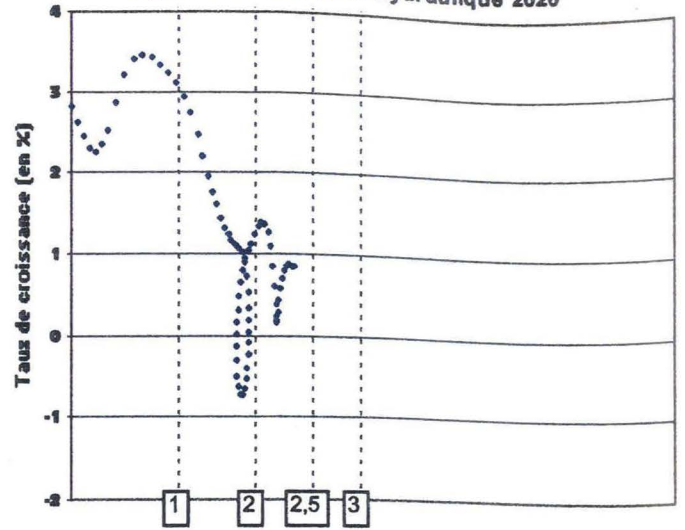
La vraisemblance de la trajectoire de la consommation associée au bouleversement affectant celle de la part de marché ouvre deux possibilités : soit la dynamique de part de marché est très sous-estimée, ce qui amène à réviser également à la hausse la dynamique de la consommation, soit la dynamique de l'énergie hydraulique est définitivement épuisée même si cela ne débouche pas nécessairement sur le scénario extrêmement pessimiste d'un recul immédiat et continu de la part de marché. Notre objectif étant de déterminer une contribution maximale « raisonnable », nous formulons l'hypothèse volontariste, certainement au-delà de ce que l'on peut attendre, que la progression de la part de marché de l'énergie hydraulique se maintient à 0,02 pdm / an pour atteindre 2,78 pdm en 2020, soit 334 Mtep dans le cas du scénario 12 Gtep et 389 Mtep dans le cas du scénario 14 Gtep.

Figure 13a : scénarios Hydraulique 2020



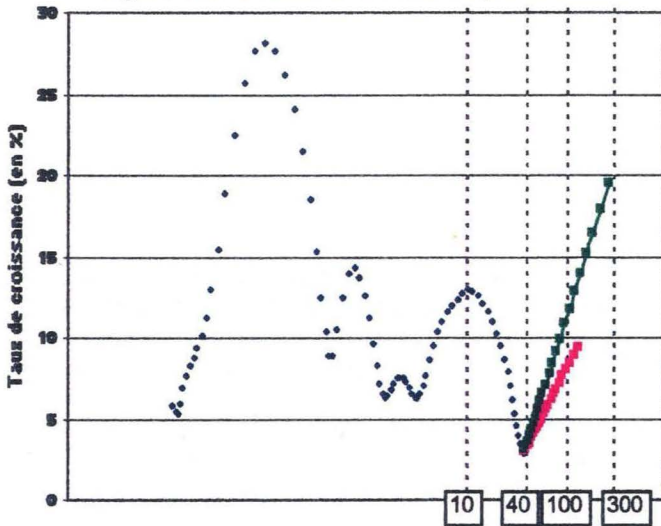
Consommation primaire en M tep (échelle log)

Figure 14a : scénarios Hydraulique 2020



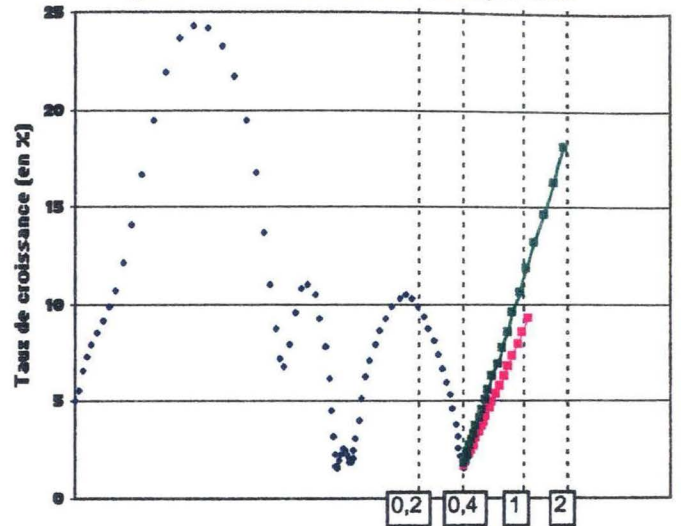
Part de marché en points (échelle log)

Figure 13b : scénarios Géothermique 2020



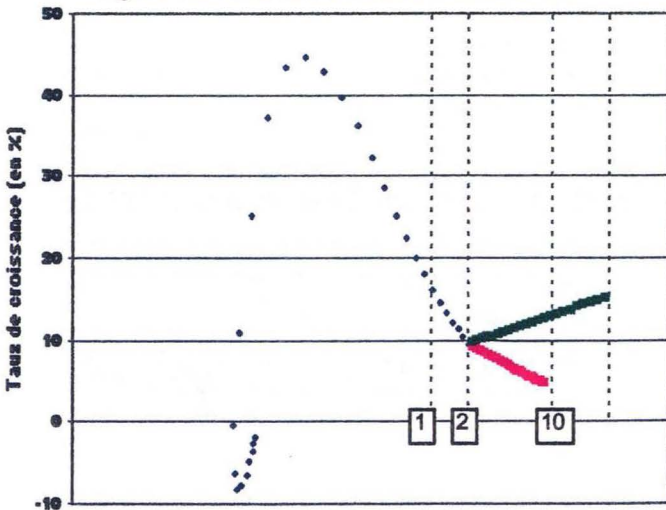
Consommation primaire en M tep (échelle log)

Figure 14b : scénarios Géothermique 2020



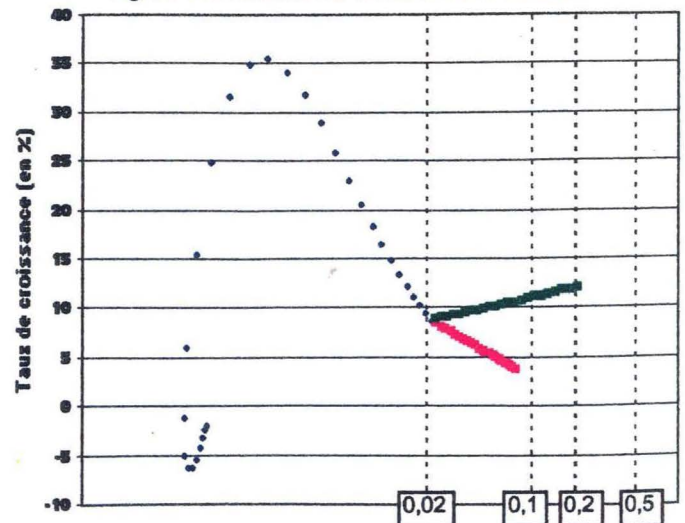
Part de marché en points (échelle log)

Figure 13c : scénarios Solaire & éolien 2020



Consommation primaire en M tep (échelle log)

Figure 14c : scénarios Solaire & éolien 2020



Part de marché en points (échelle log)

Note : courbe rose = scénario 12 Gtep ; courbe verte = scénario 14 Gtep.

Energie géothermique

La contribution de l'énergie géothermique de 0,13 Gtep à une consommation mondiale de 12 Gtep ou de 0,27 Gtep à 14 Gtep à l'horizon 2020 apparaît surestimée : cette trajectoire nécessite un retournement brutal des dynamiques de croissance et de part de marché jusqu'à atteindre un niveau supérieur à ce que l'on peut observer sur les cinquante dernières années, soit la période comprenant le fléchissement évoqué précédemment mais également les années de chocs pétroliers particulièrement favorables aux énergies renouvelables (cf. figures 13b et 14b). Toutefois, nous formulons l'hypothèse résolument optimiste que ce retournement de tendance atteint son apogée en 2020 au niveau maximum du cycle de croissance précédent (10 %), soit une part de marché de 1,17 pdm équivalente à une contribution de 140 Mtep dans le cas du scénario à 12 Gtep et de 164 Mtep à 14 Gtep.

Energies solaire et éolienne

Parmi les énergies renouvelables, on attribue les perspectives les plus prometteuses aux énergies solaire et éolienne. En raison de leur développement très récent, tout au moins dans leur forme « moderne », et des approximations statistiques qui leur sont associées, notre méthode de croisement de la trajectoire de cycle de vie énergétique et de la dynamique de moyen terme ne permet de donner qu'une très approximative estimation de leur contribution future.

La représentation dans le repère f/c ne laisse entrevoir aucun fléchissement de la trajectoire. La dynamique de consommation se traduit par des gains de part de marché quasi proportionnels. Dès lors, toute la question de l'avenir des énergies solaire et éolienne réside dans la dynamique de moyen terme. La représentation en phase fournit à cet égard une trajectoire manifestement perturbée par la volte face des principaux pays consommateurs au milieu des années 80 en matière de recherche et de soutien à ces énergies puisque, en dépit de taux de croissance proche de 10 %, la dynamique s'inscrit à la baisse.

Notre extrapolation linéaire dans le repère f/c se traduit par une contribution de 9 Mtep dans le cas du scénario 12 Gtep et de 29 Mtep à 14 Gtep, soit respectivement la continuation de la décélération (9 Mtep) et un léger retournement de tendance de la dynamique (29 Mtep) (cf. figures 13c et 14c). Nous retenons l'hypothèse haute de retournement de la dynamique de la part de marché qui amène la croissance à un niveau que nous fixons arbitrairement à 20 % en 2020, soit l'hypothèse la plus volontariste que l'on puisse envisager sur une période de 20 ans. Nous obtenons ainsi une contribution de 51 Mtep dans le cas du scénario 12 Gtep et de 60 Mtep à 14 Gtep. Anticiper une contribution supérieure ne paraît pas « raisonnable » eu égard à l'accélération continue de la croissance nécessaire pour atteindre ce niveau. Force est de constater que les énergies solaire et éolienne ne contribueront toujours que très modestement au bilan énergétique mondial à l'horizon 2020. Si d'aventure notre méthode nous avait amenés à sous-estimer cette contribution future, la révision à la hausse ne porterait tout au plus que sur quelques Mtep.

Le tableau 8 résume les hypothèses de contribution des énergies renouvelables que nous formulons après analyse et correction des scénarios tendanciels linéaires dans le repère f/c. Ces hypothèses sont délibérément optimistes, très certainement au-delà de ce que peut fournir le développement « naturel » de chacune de ces énergies. Seules des circonstances exceptionnelles telles que les chocs pétroliers permettraient de dépasser les valeurs que nous retenons.

Tableau 8 : estimation de la contribution des énergies renouvelables en 2020

	Hydraulique		Géothermique		Solaire & éolien	
	Part marché en pdm	Contribution en Mtep	Part marché en pdm	Contribution en Mtep	Part marché en pdm	Contribution en Mtep
Scénario 12 Gtep	2,78	334	1,17	140	0,43	51
Scénario 14 Gtep	2,78	389	1,17	164	0,43	60

4.2.2 Evaluation des contributions des énergies fossiles

Nous appliquons à présent notre approche, consistant donc en un examen simultané des trajectoires dans le repère f/c (cycle de vie énergétique) et dans la représentation en phase (dynamiques de croissance de consommation et de part de marché), aux énergies fossiles : charbon, pétrole et gaz naturel.

Charbon

La situation du charbon est caractérisée par les éléments suivants : une trajectoire dans le repère f/c en déclin depuis plusieurs décennies (cf. figure 4b), une dynamique de croissance de la consommation composée de cycles successifs dont les apogées sont décroissantes (cf. figure 13d – points a, b et c) et une forte dynamique de décroissance de la part de marché qui, en dépit d'un passage de la trajectoire au voisinage de la zone de stagnation (axe des abscisses) au cours des 20 dernières années (cf. figure 14d), semble devoir maintenir durablement le charbon dans une situation déprimée.

La simple extrapolation de la trajectoire dans le repère f/c (cf. figure 12d) se traduit par un retournement limité de la dynamique de consommation dans le cas du scénario 14 Gtep et la continuation du cycle actuel de ralentissement de la croissance jusqu'à un niveau très faible (inférieur à 0,5% par an) dans le cas du scénario 12 Gtep (cf. figure 13d). Le plan de phase de la part de marché indique que, même porté par un scénario à 14 Gtep, le charbon continuera de perdre du terrain sur les autres énergies (cf. figure 14d). Seul un retournement de tendance de la consommation similaire aux cycles précédents serait de nature à interrompre les pertes de part de marché. Il convient de rappeler que ces cycles correspondent à deux périodes favorables au charbon : l'immédiat après-guerre et la période des chocs pétroliers. A priori, nous pouvons légitimement douter qu'un tel cycle se renouèle en l'absence de circonstances équivalentes.

Nous poussons délibérément l'optimisme jusqu'à supposer que l'extrapolation linéaire f/c sous-estime le potentiel du charbon et formulons l'hypothèse que l'apogée d'un prochain cycle atteindra le seuil de croissance de 2% / an en 2020, soit une contribution de 3036 Mtep (cf. figure 13d – point d). L'inévitable phase descendante du cycle, à peu près symétrique à la phase ascendante, n'amènerait la consommation de charbon vers les 4 Gtep que dans un délai supplémentaire d'environ 20 ans : nous maintenons donc notre diagnostic et notre jugement quant au caractère irréaliste de la plupart des scénarios publiés (AIE, CME, voire Shell) qui accordent au charbon des perspectives de consommation de l'ordre de 4 Gtep, soit un quasi doublement au cours des 20 prochaines années.

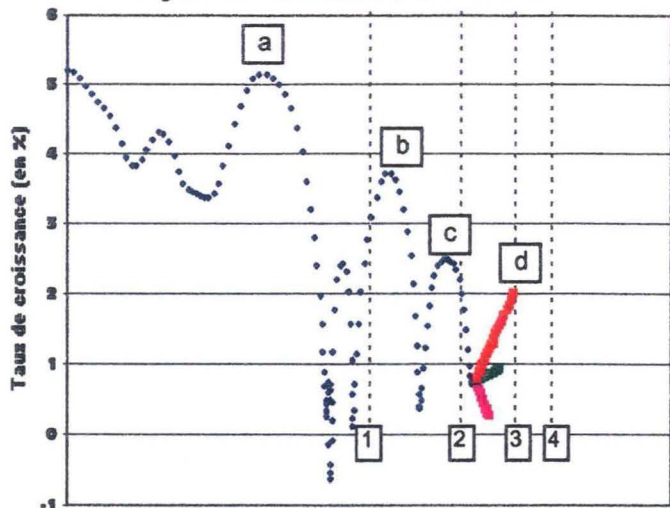
Pétrole

Le diagnostic que l'on peut établir pour le pétrole à partir de la figure 12e, extrapolation linéaire de la trajectoire dans le repère f/c, consiste en la confirmation du déclin initié à l'époque des chocs. L'inquiétante courbure vers le bas de la trajectoire peut paraître exagérée : le potentiel du pétrole serait-il largement sous-estimé par notre approche ?

L'examen des plans de phase consommation et part de marché apporte des éléments de réponse. La consommation semble à présent à l'apogée d'un cycle de croissance commencé à l'époque du contre-choc (cf. figure 13e – point a) : la traduction en phase des extrapolations linéaires montre que la trajectoire s'oriente effectivement à la baisse, que la consommation totale d'énergie s'établisse à 12 ou 14 Gtep. Si la phase descendante du cycle apparaît assez brutale dans le cas du scénario 12 Gtep, nous constatons que dans le cas du scénario 14 Gtep, la consommation pétrolière n'atteint pas les 4 Gtep (3,85). En terme de part de marché, la situation apparaît clairement (cf. figure 14e) : la trajectoire ne franchit pas l'axe des abscisses, synonyme de nouvelle ère de croissance, mais repart sans équivoque dans une nouvelle phase descendante.

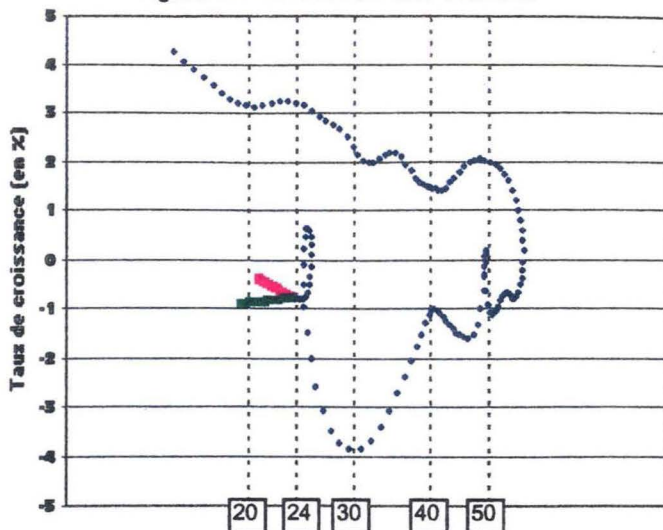
A la question de la sous-estimation de la contribution du pétrole calculée par extrapolation linéaire f/c, nous répondons donc « peut-être » mais il ne nous apparaît pas contestable que cette contribution ne saurait aller significativement au-delà de la frontière des 4 Gtep en 2020 (soit 90 mb/j environ). Par la suite, le futur du pétrole devrait de nouveau prendre l'apparence d'un cycle de croissance d'amplitude réduite par rapport au cycle actuel. Rappelons une caractéristique commune à la dynamique de croissance de toutes les énergies et particulièrement les énergies dominantes : **le rythme de croissance n'est jamais constant mais suit des variations cycliques et les cycles successifs tendent à diminuer en amplitude**. Un rebond limité de la croissance de la consommation pétrolière après 2020 serait ainsi parfaitement cohérent avec la trajectoire de la part de marché qui, si elle s'engage actuellement sur la voie de l'accélération de la décroissance, finira également par atteindre un maximum pour s'engager dans la phase suivante de décélération de la décroissance (traduction du nouveau cycle de croissance de la consommation).

Figure 13d : scénarios Charbon 2020



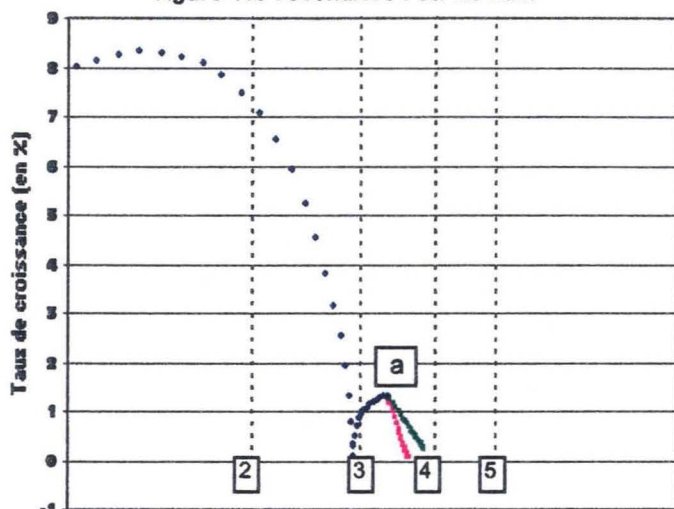
Consommation primaire en G tep (échelle log)

Figure 14d : scénarios Charbon 2020



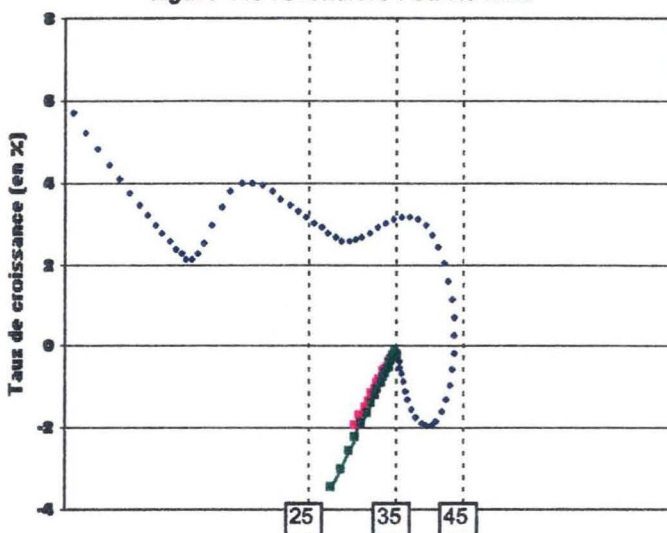
Part de marché en points (échelle log)

Figure 13e : scénarios Pétrole 2020



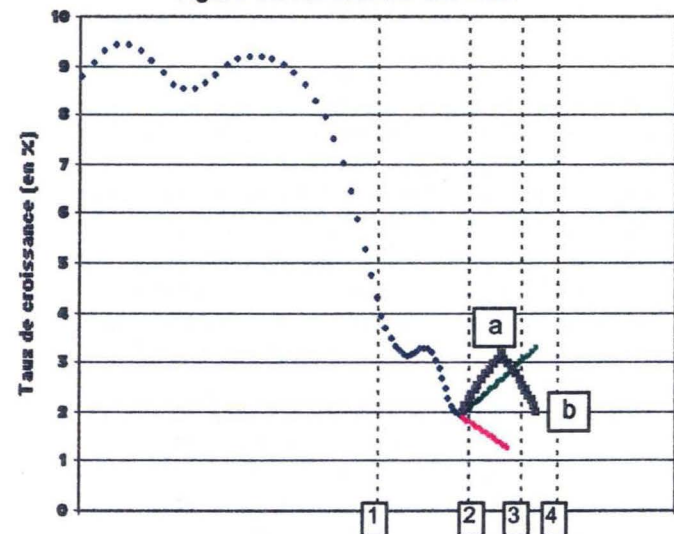
Consommation primaire en G tep (échelle log)

Figure 14e : scénarios Pétrole 2020



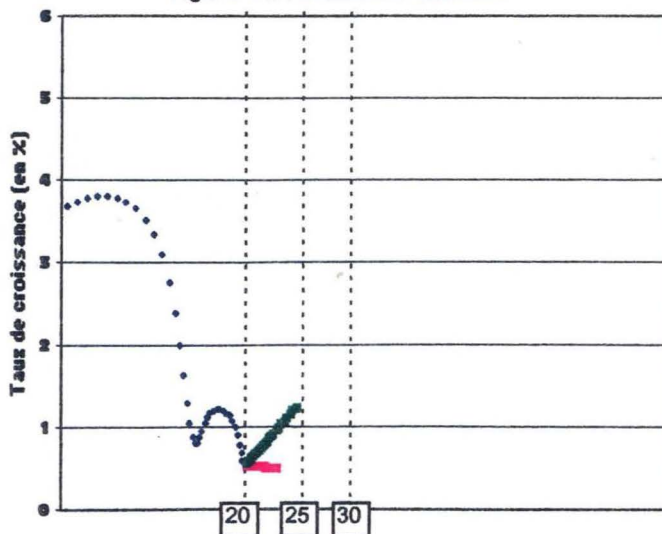
Part de marché en points (échelle log)

Figure 13f : scénarios Gaz 2020



Consommation primaire en G tep (échelle log)

Figure 14f : scénarios Gaz 2020



Part de marché en points (échelle log)

Note : courbe rose = scénario 12 Gtep ; courbe verte = scénario 14 Gtep ; courbe grise : scénario "maximaliste".

Gaz naturel

L'évaluation de la contribution du gaz à la consommation totale constitue certainement un sujet de controverse à la mesure des espoirs de développement de la consommation de cette énergie dans quasiment toutes les régions du monde. Notre propos n'en demeure pas moins de porter un regard sans a priori sur les caractéristiques de toutes les énergies afin de délimiter au mieux l'espace des différentes représentations graphiques utilisées, à l'intérieur duquel les trajectoires sont susceptibles d'évoluer avec le maximum de vraisemblance.

Au contraire du pétrole et du charbon, l'extrapolation linéaire f/c de la trajectoire du gaz laisse augurer d'une poursuite de sa progression dans le bilan énergétique mondial (cf. figure 12f) et reflète en cela la nature même de cette approche : l'hypothèse de cessation de l'infléchissement de la trajectoire dans le repère f/c est-elle vraisemblable sur une période d'environ 20 ans alors que, sans reprendre la thèse extrême de Marchetti évoquée plus haut, cet infléchissement est un élément crucial des tendances de long terme ?

Les plans de phase apportent de nouveaux éléments d'appréciation : la consommation de gaz s'élève à 2730 Mtep dans le scénario 12 Gtep et 3430 Mtep dans le scénario 14 Gtep. La figure 13f montre que la différence entre ces deux valeurs ne se réduit pas simplement à l'écart de 700 Mtep mais délimite le champ du possible :

- le gaz atteindra sans aucun doute au moins 2730 Mtep en 2020 car cela ne nécessite aucune déviation de sa trajectoire de long terme et ne remet pas en cause son orientation au ralentissement de la croissance
- une consommation de 3430 Mtep nécessite au contraire un retournement immédiat de cette trajectoire, soit une accélération continue du rythme de croissance qui n'a pas été observée par le passé sauf, bien sûr, lors de la phase d'apparition de l'énergie lorsque les taux de croissance sont aussi élevés que les quantités sont faibles. Si l'on revient à la figure 12f, cela consiste à considérer que la trajectoire du gaz dans le repère f/c ne s'infléchit pas du tout (cas de notre extrapolation linéaire) sur une période de plus de 20 ans, ce que contredit l'histoire énergétique. Comme pour le charbon, nous confirmons notre diagnostic d'une consommation nécessairement inférieure à 3,5 Gtep en 2020 et maintenons nos critiques concernant les scénarios faisant la part belle au gaz jusqu'à anticiper des consommations supérieures à 3,5 voire 4 Gtep.

La figure 14f confirme ces conclusions : la trajectoire de part de marché est similaire à celle de la consommation. Nous notons toutefois que les 2730 Mtep dans le scénario 12 Gtep signifient l'interruption du cycle actuel pour rentrer dans une phase de stabilité de croissance de la part de marché. **Or, l'ensemble de nos observations met clairement en évidence qu'une telle trajectoire rectiligne est invraisemblable : toute évolution est définitivement courbe.** La trajectoire la plus vraisemblable consiste en un nouveau cycle composé d'une phase ascendante d'accélération de la croissance (consommation et part de marché), d'un apogée puis d'une phase descendante de décélération de la croissance, les deux phases successives étant à peu près symétriques.

Si nous supposons que la valeur maximale qu'il est possible de retenir, soit 3430 Mtep, est atteinte en 2020 à l'apogée du cycle, la phase descendante de croissance au cours des 15 à 20 années suivantes amènerait inévitablement la consommation à des niveaux difficilement imaginables, proches de 6000 Mtep. L'hypothèse « maximaliste » que nous formulons est que la valeur de 3430 Mtep est atteinte à la fin du cycle complet, la clé du problème résidant alors dans le niveau de l'apogée que nous plaçons en milieu de cycle, soit en 2009 : dans ce cas, la trajectoire de la consommation doit s'inverser immédiatement, atteindre son apogée au seuil de 3,17 % de croissance en 2009 (cf. figure 13f – point a) puis décélérer pour revenir en bas de cycle à une valeur de croissance annuelle identique à celle de 1997 (cf. figure 13f – point b). Nous conservons ce scénario dans notre optique de calculer un éventuel « déficit » minimum d'approvisionnements même si nous le considérons peu probable car il suppose que :

- la trajectoire s'inverse immédiatement et de façon durable, ce qui nécessite une forte impulsion,
- l'apogée de ce cycle atteint le niveau du cycle précédent (3,2 %), ce qui n'est jamais le cas (phénomène de diminution progressive de l'amplitude des cycles),
- la phase descendante reste supérieure, en son point le plus bas, au seuil de 2 % (niveau actuel de la croissance de la consommation).

À l'issue de nos observations et de notre analyse, il est acquis que toutes les énergies, fossiles plus encore que les renouvelables, passent au cours de leur histoire par une phase de maturité puis de déclin. La trajectoire du gaz n'échappe pas à la règle et devra inévitablement s'infléchir. Si la trajectoire devait peu ou ne pas s'infléchir du

tout au cours des prochaines années, la perspective d'un décrochage brutal tel que l'ont connu le charbon et le pétrole (cf. figure 4a – points A et B) devrait alors être prise en compte et contribuer à orienter l'analyse sur les déterminants et conséquences économiques du passage du gaz naturel à une phase de retrait/déclin. Cette hypothèse prend un relief particulier, eu égard aux espoirs considérables placés dans le développement de cette énergie.

L'ensemble des contributions des énergies fossiles aux scénarios de consommation totale de 12 et 14 Gtep sont résumées dans le tableau 9. Nous retenons volontairement des valeurs de consommation identiques dans les deux scénarios car nous les considérons comme des maxima qui ne sauraient être dépassés à l'horizon 2020.

Tableau 9 : estimation de la contribution des énergies fossiles en 2020

	Charbon		Pétrole		Gaz	
	Part marché en pdm	Contribution en Mtep	Part marché en pdm	Contribution en Mtep	Part marché en pdm	Contribution en Mtep
Scénario 12 Gtep	25,3	3036	33,3	4000	28,6	3430
Scénario 14 Gtep	21,7	3036	28,6	4000	24,5	3430

4.3 Perspectives énergétiques mondiales à 2020

Notre méthode d'évaluation des contributions futures des énergies primaires permet de donner une estimation du possible excédent ou déficit des approvisionnements par rapport à un niveau de demande donné.

Tableau 10 : contribution des énergies primaires à une consommation mondiale de 12 Gtep

	Charbon	Pétrole	Gaz	Hydraulique	Géothermique	Solaire	Biomasse	Bilan
Consommation en Gtep	3,04	4,00	3,43	0,33	0,14	0,05	1,34	+0,33

Dans le cadre du scénario 12 Gtep, la somme des contributions de toutes les énergies hors nucléaire s'élève à 12,33 Gtep. Dans l'hypothèse conservatrice où la contribution de l'énergie nucléaire demeure à son niveau actuel de 0,6 Gtep, le risque d'une tension sur les approvisionnements semble écarté. Il convient de rappeler que l'excédent apparent de près de 1 Gtep (0,33 + 0,60) résulte de scénarios très optimistes concernant notamment les énergies renouvelables et le gaz. La prise en compte de scénarios plus « mesurés » ou moins « volontaristes » réduirait nécessairement cet excédent à un niveau moins confortable.

Tableau 11 : contribution des énergies primaires à une consommation mondiale de 14 Gtep

	Charbon	Pétrole	Gaz	Hydraulique	Géothermique	Solaire	Biomasse	Bilan
Consommation en Gtep	3,04	4,00	3,43	0,39	0,16	0,06	1,34	-1,58

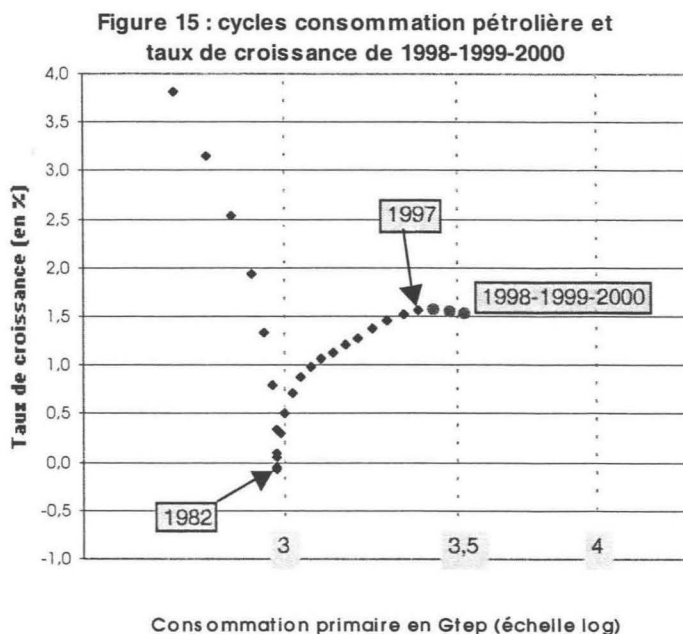
Dans le cadre du scénario 14 Gtep, nous obtenons un résultat opposé : la somme des contributions présente un déficit de près de 1,6 Gtep hors nucléaire, soit un déficit net de 1 Gtep sur la base, identique à celle du scénario à 12 Gtep, d'une contribution de 0,6 Gtep de l'énergie nucléaire. La même remarque que précédemment quant à la nature « minimale » de ce déficit s'impose : l'inévitable tension sur les approvisionnements qui découlerait d'un tel niveau de consommation totale pourrait être d'autant plus sous-estimée que, à l'exception peut-être du charbon et, dans une moindre mesure, du pétrole, nous considérons les autres énergies au maximum de leur contribution en 2020, probablement au-delà pour certaines.

5. Evolutions récentes et conclusions

5.1 Court terme et long terme : un éclairage mutuel

Nos travaux portent sur la période 1850-1997. Nous disposons à présent de statistiques plus récentes à même d'éclairer d'une part les tendances que nous avons mises en évidence, d'autre part nos conclusions relatives au potentiel de croissance des énergies primaires. Ainsi, le scénario pétrolier que nous formulons s'inscrit à contre-courant des ordres de grandeur généralement admis pour la consommation mondiale, illustrés par les scénarios de l'AIE et du DOE américain, soit 115 mb/j environ en 2020. Encore pourrait-on citer certains jugements d'experts anticipant un niveau de consommation encore plus élevé.

Nous concluons l'exposé de notre méthode d'analyse et de nos résultats en mettant en perspective les taux de croissance de la consommation pétrolière enregistrés en 1998, 1999 et 2000 : respectivement 0,56 %, 2,30 % et 0,74 % (variations sur séries brutes). Nous projetons sur la figure 15 les années 1998 à 2000 après filtrage des données. Il apparaît que le cycle de croissance entamé au début des années 80 (dynamique positive), dont nous prévoyions l'apogée prochain avant d'amorcer une phase de décélération, s'oriente effectivement dans la direction que nous anticipions : la dynamique proche de zéro (apogée) semble basculer vers une valeur négative, annonciatrice d'une phase de croissance en net ralentissement. Même si nous devons rester prudents en la matière, nous observons par ailleurs que la plupart des prévisions actuelles de consommation pétrolière pour les années 2001 (+0,1 mb/j) et 2002 (+0,7 mb/j), lourdement affectée par la quasi-récession économique mondiale, confirment (en variation brute) cette tendance.



Nos deux commentaires clés à l'issue de ces travaux doivent contribuer à dépasser le débat concernant le seul niveau de consommation d'énergie qui serait, ou ne serait pas, atteint à une date donnée :

- toute évolution est courbe dans la représentation en phase par la succession de phases d'accélération et de décélération. Le seul usage de taux de croissance moyens pour décrire le passé, et a fortiori le futur, ignore ces successions de phases et n'est donc pas adapté, aux risques d'un diagnostic erroné et de projections irréalistes.
- une projection énergétique se doit de mentionner, à l'appui de toute valeur proposée dans le cadre d'un scénario à une date donnée, le taux de croissance associé à cette valeur. En d'autres termes, il est plus important de préciser le signe de la dynamique et l'état du cycle au terme de la période de projection qu'une unique valeur absolue de consommation (ou de part de marché) qui ne sera que la résultante de ces deux éléments. Les tableaux 10 et 11 (contributions des énergies primaires à une consommation de 12 et 14 Gtep) ne mentionnent pas ces éléments étant donné que nous n'avons pas formulé d'hypothèse de dynamique de la demande globale.

5.2 Conclusions générales

1° Nous n'avons pas traité des insuffisances statistiques. Cette importante question, notamment en ce qui concerne les équivalences, ne remet pas en cause ce que nous présentons ici, mais nous ne pouvons qu'insister pour qu'un effort soit entrepris, sans être entaché de considérations faisant passer l'esprit scientifique au second plan.

2° Notre travail concerne la possibilité d'améliorer les prévisions énergétiques. Un premier cahier, édité en mai 2000 esquissait une méthodologie que nous approfondissons aujourd'hui. Le point essentiel est la prise en considération d'éléments dynamiques d'une part, d'éléments relationnels entre les variables considérées d'autre part :

- éléments dynamiques, en considérant les vitesses de variation des consommations et des parts de marché, indépendamment des consommations et des parts de marché,
- éléments relationnels, en utilisant l'espace des phases pour associer naturellement les variables et leurs variations et l'espace parts de marché / consommations (espace f/c) pour présenter les relations entre les énergies.

Les propriétés de ces espaces sont détaillées en annexes. Ce qui est important est que l'usage de ces espaces permet alors, du seul fait de considérations de morphologie de trajectoires possibles, d'encadrer les prévisions, en limitant les zones d'évolution permises. Cela ne limite pas la construction de modèles d'évolution, mais fournit ainsi des frontières que les solutions ne doivent pas franchir.

3° Nous avons tenté un exemple d'application sur un cas simple, concernant deux hypothèses de demande mondiale (12 et 14 Gtep en 2020). On peut alors montrer que les évolutions énergétiques sont suffisamment limitées, au sens des espaces utilisés, pour fournir des scénarios énergétiques réalistes. Afin de compléter notre travail, accompli sur des données limitées à 1997, nous fournissons, dans le cas du pétrole, les graphes obtenus avec adjonction des données 1998, 1999 et 2000, les séries étant filtrées : les points obtenus montrent bien qu'aucune modification profonde de la dynamique ne se fait jour.

4° Au-delà de nos premiers résultats, la construction de scénarios pour chacune des énergies primaires impose de formuler une hypothèse de dynamique de la demande globale. Notre travail va maintenant se développer vers la prise en compte d'éléments économiques généraux et tenter d'intégrer les aspects géographiques. En effet, le resserrement des fourchettes de prévision, qui est au cœur de notre approche, nous semble requérir l'usage d'éléments fondamentaux, que nous avons volontairement laissé de côté (démographie, production). Cela ne doit cependant pas laisser croire que les évolutions des différentes énergies peuvent s'affranchir des contraintes que nous avons mises en évidence et qui demeureront en tous cas.

Annexes

A1 Sources statistiques

- Période 1971-97 : Bilans et statistiques des pays non-membres, OCDE / AIE, 1999
Période 1950-70 : Etemad & Luciani, "La production mondiale d'énergie 1800-1985", CNRS et CHEI, 1991
World Energy Supplies, ONU, 1976
Période 1850-1950 : Etemad & Luciani, "La production mondiale d'énergie 1800-1985", CNRS et CHEI, 1991
Marchetti & Nakicenovic, "The dynamics of energy systems and the logistic substitution model", IIASA, 1978
Données JM Martin (biomasse en 1850 et 1900, charbon en 1850)

A2 Filtrage

Notre choix se porte sur le filtre Hodrick-Prescott, qui est devenu d'un usage courant dans l'analyse des propriétés cycliques des grandeurs économiques. Cette technique repose sur l'idée qu'une tendance doit être suffisamment lisse pour ne pas suivre toutes les inflexions de la série, sans pour autant trop s'écarter des mouvements de la série initiale. La méthode consiste à rechercher un filtre tel que la série filtrée soit solution du problème suivant :

$$\text{Min } \sum [y_t - \mu_t]^2 + \lambda \sum [(\mu_{t+1} - \mu_t) - (\mu_t - \mu_{t-1})]^2$$

où μ_t est la composante tendancielle, $y_t - \mu_t = c_t$ la composante cyclique. Le premier terme mesure l'ajustement de c sur y tandis que le second indique le degré de variabilité de la tendance. Le paramètre λ représente le poids accordé au deuxième objectif relativement au premier. Plus ce paramètre est grand, plus la tendance est lisse. Pour λ infini, on obtient un trend linéaire. Hodrick et Prescott suggèrent de fixer la valeur du paramètre λ à 100 pour une série annuelle.

A3 Représentation en phase, dynamique et cycles : éléments mathématiques et remarques fondamentales

Nota : les exemples illustrant le texte ci-après sont fournis sous forme des encadrés 1 et 2 accompagnant le texte principal.

A3.1 On considère une fonction positive, continue et dérivable. La représentation en phase repose sur un système de coordonnées dans lequel la fonction figure en abscisse et sa dérivée première en ordonnée. Le terme de représentation en phase dérive de l'espace des phases de la mécanique des particules, dans lequel on considère les positions et les quantités de mouvement (produit des vitesses par la masse).

Une telle représentation présente diverses propriétés :

1. dans le plan y, y' , la pente de la courbe représentative de y est dy'/dy , soit encore y''/y' . Ceci montre qu'au voisinage d'un extremum ($y'=0$), la pente devient non définie, et que la trajectoire est gouvernée par la dérivée seconde, ou d'ordre supérieur. Sauf exception (cf. infra), les trajectoires sont normales aux abscisses, soit avec méplat (traversée), soit avec rebroussement.
2. Un cas particulier est lié à $y'' = 0$, c'est à dire à un phénomène à incrément constant (puisque alors y' est une constante). Dans ce cas, la trajectoire est une parallèle aux abscisses en représentation linéaire et une exponentielle décroissante, asymptote aux abscisses, en représentation logarithmique.
3. le plan y, y' est orienté, puisque le sens de variation de la fonction impose le signe de la dérivée.
4. si l'on utilise une représentation logy, dy/y (représentation en phase logarithmique), la **pente de la courbe représentative est égale à la dynamique**, c'est à dire à la variation relative du taux (dénomination courante en économie de dy/y).
5. si une économie est cyclique, son taux de croissance doit faire apparaître une composante à peu près constante, à laquelle s'ajoute un terme périodique. On écrira donc, en se bornant à un modèle simple :

$$dy/y = k (1 + a \sin bt),$$

soit encore $\log y = kt - (ak/b) \cos bt + \text{constante}$.

En représentation en phase logarithmique, ces équations définissent des courbes de trois types, selon que a est $>, =, <$ que 1. On obtient notamment une cycloïde pour $a = 1$: en pratique, on doit rencontrer des points de rebroussement, plus généralement de retournement, au voisinage de l'axe des abscisses. Ces retournements

marquent ainsi les points bas du cycle si l'on est en phase de croissance ($k>0$), et les points hauts si l'on est en phase déclin. On notera que la représentation en phase amplifie le signal du cycle (point bas ou point haut).

A3.2 Intérêt de la représentation en phase et dynamique

La simple observation des chroniques, même avant tout filtrage, montre que les taux ne sont jamais constants et présentent de fortes variations. Le filtrage élimine une partie des fluctuations et laisse subsister les mouvements importants, tout en atténuant leur « brusquerie ». Ce qui apparaît est donc que les taux varient, et qu'il est indispensable de prendre en compte cet aspect des phénomènes étudiés. **La représentation en phase, par la possibilité qu'elle offre de présenter clairement les variations de taux, est ainsi l'outil mathématique adapté à l'usage de la dynamique.** La dynamique est la variation relative du taux : on l'exprime mathématiquement par $(d(dy/y))/(dy/y)$, soit encore $(y''/y') - (y'/y)$.

A3.3 Les limites de l'usage de la dynamique

La prise en compte des variations de dynamique à travers les trajectoires de long terme constitue un progrès par rapport à la simple projection des vitesses (taux de croissance annuels moyens) observées sur le passé. On notera que le calcul numérique impose de considérer des intervalles ne traversant pas les abscisses, en raison des discontinuités, ni même un bas de cycle (si le taux est >0), pour la même raison. En bref, on veillera à calculer la dynamique sur des intervalles où son signe ne change pas.

Il est donc indispensable d'associer à la notion de dynamique l'examen de la trajectoire historique sur longue période. La réflexion doit se nourrir plus de l'analyse des points de retournement de la trajectoire, qui constituent des repères forts, que de celle de la vitesse d'évolution, dissimulant des variations subtiles mais essentielles sur le long terme. L'argumentation de l'économiste dans un tel cadre consiste alors à prendre position sur la valeur de la dynamique et sur l'existence future de possibles points de retournement.

Le calcul de la dynamique comporte enfin une part d'arbitraire résidant dans la force du lissage appliqué à la série brute dans le sens où l'adoption d'un paramètre plus ou moins fort modifie la valeur de la dynamique.

A3.4 Le problème du filtrage

Le filtrage permet de passer des chroniques observées à des séries permettant de calculer au moins des différences premières et de faire apparaître des éléments liés à la non monotonie des systèmes étudiés. Le filtrage est ainsi indispensable à l'emploi de la représentation en phase, au calcul de la dynamique et à la mise en évidence des cycles. On doit donc s'interroger sur l'effet du filtrage. Nous avons travaillé avec $\lambda=100$, mais une analyse complémentaire reste à faire pour déterminer, dans chaque cas, le bon paramètre λ , qui ne soit pas à l'origine d'artefacts statistiques et graphiques et permette ainsi une lecture claire des phénomènes.

A titre indicatif, le tableau suivant indique les différentes valeurs de la dynamique pour la consommation globale d'énergie sur la période 1961-1997 (phase homogène de croissance en ralentissement c'est-à-dire de dynamique négative) en fonction des valeurs suivantes pour le paramètre λ : 25, 50, 75, 100, 125, 150 (série peu filtrée à très filtrée).

Paramètre λ	25	50	75	100	125	150
Dynamique	-3,33	-3,35	-3,37	-3,38	-3,38	-3,39

Le taux de croissance moyen sur la période 1961-1997 est de 2,80 % / an. Pour le paramètre $\lambda=100$, la dynamique négative indique que ce taux est tendanciellement décroissant à raison de -3,38 % / an. Nous observons, sans toutefois que cela constitue une réelle démonstration, que la valeur du paramètre λ ne modifie pas significativement la valeur de la dynamique : la conclusion demeure que la croissance de la consommation globale est nettement orientée au ralentissement depuis le début des années 60. Nous pouvons ainsi affirmer que le phénomène ainsi mis en évidence n'est pas un artefact né du traitement statistique de filtrage de la série brute.

A4 Substitutions énergétiques et modèle logistique.

On doit à Marchetti une intéressante tentative de représentation des évolutions énergétiques par ajustement à une équation de diffusion. Ce modèle conduit à une relation linéaire entre $\log(f/1-f)$ et le temps, la relation étant différente en phase de croissance de la part de marché et en déclin. Malgré son élégance (ce qui n'est jamais négligeable), un examen plus précis fait apparaître diverses insuffisances :

- l'ajustement logistique n'est pas satisfaisant, comme le montre une représentation en phase linéaire. En effet, l'équation logistique est $df/dt = A f(1-f)$, ce qui définit une parabole. Le déclin des énergies fait ainsi l'hypothèse implicite que chacune disparaît totalement : c'est là une erreur fondamentale, car on peut raisonnablement supposer que des parts de marché irréductibles (« noyaux durs ») subsisteront pour chaque énergie. Dans ces conditions, la variable reliée au temps n'est plus $f/1-f$, mais $f/fl-f$, avec fl part de marché limite. fl étant caractéristique de chaque énergie, il n'existe alors plus de représentation unique possible.
- le modèle est quasi déterministe, ce qui constitue une sorte de péché contre l'esprit économique.

Le même reproche peut d'ailleurs être adressé aux travaux de King Hubert qui utilise l'ajustement sur une courbe logistique pour prédire un extremum. Ce genre de travaux postule une symétrie croissance / déclin (des productions de substances naturelles) qui ne repose sur rien et ignore toute considération économique.