

Peut-on améliorer les prévisions énergétiques ?

Paul Alba, Olivier Rech

► **To cite this version:**

Paul Alba, Olivier Rech. Peut-on améliorer les prévisions énergétiques ? : Cahiers du CEG, n° 37. 2000. hal-02437400

HAL Id: hal-02437400

<https://hal-ifp.archives-ouvertes.fr/hal-02437400>

Submitted on 13 Jan 2020

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.

Centre Économie et Gestion

Peut-on améliorer les prévisions énergétiques ?

Paul ALBA
Olivier RECH

Mai 2000

Cahiers du CEG - n° 37

Série Synthèses et Analyses

ÉCOLE DU PÉTROLE ET DES MOTEURS

Centre Économie et Gestion
228-232, avenue Napoléon Bonaparte
92852 RUEIL-MALMAISON CEDEX
téléphone : 01 47 52 66 87 - télécopieur : 01 47 52 70 66

La collection "Cahiers du CEG" est un recueil de présentations de travaux réalisés au Centre Économie et Gestion de l'École du Pétrole et des Moteurs, Institut Français du Pétrole, travaux de recherche ou notes de synthèse. Elle a été mise en place pour permettre la diffusion de ces travaux, parfois sous une forme encore provisoire, afin de susciter des échanges de points de vue sur les sujets abordés.

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 du Pétrole et des Moteurs ou de l'IFP.

Pour toute information complémentaire, prière de contacter :

Valérie SAINT-ANTONIN *tél. : 01 47 52 66 87*

The "Cahiers du CEG" is a collection of articles carried out at the Center for Economics and Management of the IFP School, Institut Français du Pétrole. It is designed to promote an exchange of ideas on the topics covered.

The opinions expressed are the sole responsibility of the author(s) and do not necessarily reflect the views of the IFP School or IFP.

For any additional information, please contact :

Valérie SAINT-ANTONIN *Phone : + 33 1 47 52 66 87*

Résumé

Dans le contexte énergétique actuel, caractérisé par le décalage entre orientations du court terme et enjeux du long terme, les travaux de prospective revêtent un intérêt particulier. Notre étude porte sur une évaluation des résultats de quelques-uns de ces travaux à long (2020) et très long terme (2050). Nous limitons notre analyse au plan mondial en dépit des limites inhérentes à un tel niveau d'agrégation.

L'approche que nous développons consiste à privilégier la dynamique des phénomènes. Nous mettons ainsi en évidence un phénomène de ralentissement simultané des croissances démographique, économique et énergétique depuis les années soixante. La croissance du revenu par tête et de la consommation d'énergie par tête n'échappent pas à cette tendance. Parallèlement, l'intensité énergétique suit une trajectoire solidement orientée à la baisse. Notre méthode fait apparaître en outre un phénomène commun à toutes les énergies, qu'elles soient dominantes ou non : la croissance de leur consommation est affectée par un fort ralentissement. L'ensemble du système énergétique semble ainsi tendre vers une zone de stabilité.

Dans l'ensemble, les travaux de prospective se situent en rupture, plus ou moins prononcée, par rapport à ces évolutions. Dans la plupart des scénarios, les rythmes anticipés de croissance économique et de consommation d'énergie sous-entendent un prochain et brutal retournement de la dynamique actuelle. Nous observons que l'emploi du seul taux de croissance annuel moyen est insuffisant à rendre clairement compte des tendances de long terme qui suivent des trajectoires courbes et non linéaires. Des erreurs de diagnostic dans l'analyse du passé sont alors susceptibles d'alimenter les modèles de projections en hypothèses dont les dynamiques implicites ne sont pas pleinement appréhendées.

Avant-propos

Bien que toute prévision ait vocation à être démentie, réfléchir aux méthodes utilisées n'est pas inutile, pour au moins tenter d'éviter d'introduire dans les modèles des imprécisions que l'on pourrait éviter.

Le propos de cette étude est de tenter d'éclairer l'analyse des évolutions démographique, économique et énergétique sur longue période, à la lumière d'une approche privilégiant les dynamiques de variation. La première partie est consacrée à la demande globale d'énergie, et conduit à une première série de propositions ; en deuxième partie, nous abordons le cas des différentes formes d'énergie, ce qui nous permet, in fine, de proposer un cadre de référence qui nous semblerait pouvoir conduire à de meilleures visions du futur qui ne peut que rester flou. Nous avons choisi de traiter d'une part la demande globale, d'autre part les demandes spécifiques des différentes formes d'énergie, car l'expérience des prévisions, de toutes natures, montre que ce qui est constaté globalement est souvent, pour ne pas dire toujours, très différent de la somme des prévisions élémentaires.

Première partie : la demande globale d'énergie.

Pour cet examen global, nous référerons les travaux de divers auteurs à ce qui est advenu, au plan mondial, depuis 1950, pour trois chroniques essentielles : population, PIB, énergie. La date de référence est assez lointaine pour assurer un recul convenable et permet de s'appuyer sur les travaux de l'OCDE (cf. figures 1, 2 et 3).

1. Remarques préliminaires

Une première et évidente remarque doit être formulée : la précision des mesures (les données économiques et démographiques résultent d'un processus de mesure parfois indirect) n'est pas fournie. Ce n'est pourtant pas faire injure aux statisticiens, qui savent bien combien souvent hasardeuses sont les données de base, et cela éviterait, face aux fluctuations que l'on constate, de se demander si l'on est en présence d'un artefact ou d'un phénomène réel sans bien entendu méconnaître l'existence des cycles courts. L'examen des chroniques utilisées montre que les fluctuations ne sont pas négligeables (cf. figures 4, 5 et 6) : en admettant que tout cela est bien réel (une dizaine de cycles en cinquante ans pour PIB et énergie), on conclura que toute prévision à moins de cinq ans est susceptible d'être fortement altérée, et qu'il convient donc, par prudence, de se placer au-delà de 10 ans, ce qui conduit à utiliser des séries filtrées (cf. annexe 1). Le court terme, marqué ici par l'excellent synchronisme des fluctuations PIB et énergie (cf. figures 5 et 6), relève des conjoncturistes classiques.

Les données relatives à l'énergie, filtrées ou non, font en outre apparaître deux problèmes :

- les équivalences. Bien que la physique permette de tout ramener au pouvoir calorifique, c'est en pratique au prix de simplifications et de conventions, inévitables, mais demandant à être révisées périodiquement (rendement des centrales thermiques, pouvoir calorifique des pétroles et des charbons, équivalence gaz, équivalence hydraulique,... pour ne citer que les plus évidents). On ne peut que gagner à tenter d'être plus précis, ne serait ce que comme école de rigueur !
- le problème de la biomasse. Les évaluations de PIB ne comprennent que la biomasse marchande, qui n'est pas toute la biomasse. Les évaluations énergétiques, quant à elles, n'apparaissent pas des plus précises, alors qu'il y a un certain paradoxe à comptabiliser de l'hydraulique et du nucléaire qui représentent, au plan mondial, moins ! Il conviendrait, enfin, pour fournir au public

une meilleure information, de rappeler, dans les classifications, qu'hydraulique et biomasse sont des énergies renouvelables, et, au fond, du solaire.

Ces remarques étant faites, nous utiliserons dans ce qui suit des données filtrées, et, pour l'énergie, incluant hydraulique, nucléaire et biomasse. Les données publiées sur la biomasse étant limitées à la période 1971-97, nous en avons estimé la consommation primaire sur la période 1950-70 (cf. annexe 3).

La représentation des évolutions

Afin de mettre en évidence le caractère dynamique des phénomènes étudiés, nous ferons appel à la représentation en phase (cf. annexe 2). Les figures (cf. figures 13 à 18) présentent, dans ce référentiel (y, y') les chroniques utilisées. Bien que nous nous soyons limités, pour des raisons graphiques, à la représentation au premier ordre, et du fait que la courbure des trajectoires joue un rôle important, nous avons calculé les dérivées secondes moyennes sur les intervalles de temps, soit du passé, soit des valeurs retenues par les auteurs des scénarios. Comme on le verra, les résultats donnent à penser.

2. Examen dynamique des données de l'économie mondiale

2.1. Démographie et Produit Brut (converti aux parités de pouvoir d'achat)

Au plan mondial, la croissance de la population s'établit en moyenne à 1,8% sur la période 1950-97. L'examen graphique de la chronique suggère que cette tendance ininterrompue à la hausse soit encore loin de toucher un maximum (cf. figure 1). La représentation en phase indique au contraire un ralentissement notable. L'accroissement annuel absolu décline depuis 1990 et l'accroissement annuel relatif a marqué un maximum dans les années 1968, 1969 et 1970 à environ 2% (cf. figure 13). Le ralentissement de la croissance de la population mondiale, établie actuellement à environ 1,4% l'an, semble devoir se confirmer, comme attestent les récentes révisions à la baisse des projections démographiques des Nations Unies.

Le PIB (PPA) mondial est en hausse constante sur la période étudiée. Au contraire de la représentation en chronique, le plan de phase nous permet d'identifier les grandes phases de croissance économique forte et de ralentissement (cf. figures 2 et 14). L'évolution en variations relatives présente trois phases : ralentissement entre le début de la période étudiée et 1957-58, croissance soutenue jusqu'en 1965-66, ralentissement jusqu'à ce jour à l'exception d'un bref regain de dynamisme sur la période 1982-86. L'évolution du PIB mondial sur l'ensemble de la période 1950-97 tend ainsi de façon évidente au ralentissement.

Le revenu par tête au plan mondial est passé de 2100 à 5800 \$ (prix et PPA de 1990) entre 1950 et 1997. La représentation en phase nous permet d'identifier quatre phases principales : croissance en ralentissement sur 1950-57, reprise d'une croissance soutenue sur 1958-65, fort ralentissement sur 1966-82 puis une croissance stabilisée sur 1983-97 caractérisée par une succession de cycles courts (cf. figures 7 et 16).

Sans ignorer les développements contemporains de l'analyse des fluctuations économiques, l'étude des variations du PIB sur longue période amène à évoquer les cycles Kondratieff. Le dixième cycle observable depuis le XVIème siècle aurait débuté à l'époque de la seconde guerre mondiale¹. Mesurée par la production, la période de hausse ou Kondratieff de hausse s'étend de 1933 à 1973, de 1940 à 1980 si celle-ci est mesurée par les prix (la variable prix étant subséquente à la variable production).

¹ Goldstein Joshua S., "Long cycles : prosperity and war in the modern age", New Haven et Londres, Yale University Press, 1988 cité dans "Le cycle Kondratieff dans tous ses états", Problèmes économiques, n° 2599, 13 janvier 1999, pp. 27-32.

Nous semblons nous situer ainsi depuis 1973 dans un Kondratieff de baisse essentiellement caractérisé par une diminution du taux de croissance. Il paraît raisonnable d'envisager le retournement à la hausse au début du siècle prochain, "*le vieillissement des infrastructures et des biens d'équipement devant entraîner à terme une reprise spontanée de l'investissement de remplacement indispensable pour assurer la satisfaction des besoins incompressibles des populations*"². Dans le cas des États-Unis, la forte croissance récente des investissements ne concerne en effet que la rationalisation (informatisation) et non pas le remplacement et l'extension de l'outil de production. Le prochain Kondratieff de hausse pourrait en outre bénéficier d'une dynamique particulière grâce au potentiel de croissance des nouveaux pays industrialisés. Les cycles Kondratieff n'ont été observables au fil des siècles que dans les économies occidentales et plus récemment en ex-URSS mais la pleine intégration des économies asiatiques pourrait alimenter la prochaine phase de hausse. Il convient cependant de noter que le profil des fluctuations conjoncturelles à l'intérieur des cycles Kondratieff a changé, particulièrement depuis la seconde guerre mondiale : les fluctuations sont tout à la fois moins nombreuses et moins volatiles. La mise en parallèle de ces deux phénomènes et de notre représentation en phase du PIB mondial laisse suggérer que l'économie mondiale est proche d'un seuil crucial : le ralentissement que nous connaissons va-t-il continuer jusqu'à atteindre la zone critique de stagnation ou bien donner lieu à un rebond synonyme de nouvelle ère de prospérité ?

Le phénomène de ralentissement simultané de la population et de la croissance économique au plan mondial est particulièrement lisible dans le mode de représentation associant les variations relatives de la population et les variations relatives du PIB dans un premier temps, les variations relatives du PIB par tête dans un second temps. En utilisant les séries lissées, nous observons que les trajectoires de variations de la population d'une part et de variations de la richesse, totale comme individuelle, d'autre part sont extrêmement proches (cf. figures 19 et 20). Ces représentations suggèrent le caractère central de la dynamique démographique dans l'évolution de la croissance économique : une croissance en accélération comme en décélération de la population est accompagnée d'un mouvement identique du PIB (cf. figure 20). Nous observons un lien de même nature entre population et revenu par tête (cf. figure 19). L'intensité du ralentissement du revenu par tête apparaît en outre supérieure à celle de la population. Nous notons cependant dans les dernières années de la période étudiée une phase de croissance stable du revenu par tête. Cette modification de la tendance n'est-elle que temporaire ou annonce-t-elle une période d'accélération de la croissance du revenu par tête alors même que l'évolution de la population mondiale semble durablement orientée au ralentissement ?

2.2. Consommation totale d'énergie, consommation par tête et intensité énergétique

La consommation totale d'énergie au plan mondial est passée de 2,14 Gtep en 1950 à 9,52 Gtep en 1997. Cette croissance, forte jusque dans les années 60, connaît un ralentissement sensible par la suite. L'examen graphique du plan de phase de la série lissée révèle que les variations relatives sont fortes et stables au voisinage d'un taux de croissance annuel de 5,5 à 6% sur les années 50, ceci jusqu'en 1963. Une phase de net ralentissement s'engage alors jusqu'au seuil d'une croissance annuelle proche de 2% atteint en 1982. La période 1982-86 ne marque qu'une brève stabilisation temporaire car le ralentissement se confirme après 1986 à un taux de croissance annuel inférieur à 2% (cf. figures 3 et 15).

La consommation d'énergie par tête atteint un maximum absolu en 1963 et relatif en 1960-61 puis un minimum en 1982, relatif et absolu, proche de la zone de stagnation. La trajectoire sort brièvement de cette zone par un rebond d'amplitude modeste pour entamer une nouvelle phase de ralentissement puis de décroissance dont le maximum est atteint en 1993-94. La trajectoire de la consommation mondiale d'énergie par tête reste au voisinage de la zone de stagnation, se stabilisant à environ 1,65 tep depuis le début des années 80 (cf. figures 8 et 17).

² "Le cycle Kondratieff dans tous ses états", Problèmes économiques, n° 2599, 13 janvier 1999, pp. 27-32.

L'intensité énergétique du PIB mondial a diminué d'environ 25% sur la période 1950-97 (cf. figure 9). Les années 50 ont vu l'intensité énergétique suivre une phase de montée en puissance, brutalement interrompue en 1959. La phase de ralentissement puis de décroissance jusqu'en 1967 laisse à penser que l'intensité énergétique tend à varier autour d'une valeur proche de 0,4 tep par millier de dollars (PPA de 1990). Mais la trajectoire s'écarte de la zone de stagnation vers la fin des années 60 pour amorcer une phase de déclin ininterrompue, brièvement ralentie entre 1982 et 1986 (cf. figure 18).

Sur la période 1950-97, nous constatons une tendance continue à la décroissance de l'intensité énergétique, dans la continuité de l'évolution de très long terme mise en évidence par les travaux de Jean-Marie Martin. L'analyse de ce phénomène retient généralement des facteurs structurels et conjoncturels. Parmi les facteurs structurels, la propagation de technologies aux performances croissantes, la substitution d'énergies par nature plus efficaces et notamment l'électricité, le passage à une ère post industrielle s'avèrent prépondérants. Les facteurs conjoncturels font référence aux variations brutales de la croissance économique (ex. : forte croissance en Chine) et aux événements de rupture, au moins apparente, comme les chocs et contre-choc pétroliers. Si notre approche dynamique du lien entre activité économique et consommation d'énergie n'apparaît pas contradictoire avec les facteurs structurels, l'influence attribuée aux facteurs conjoncturels semble devoir être relativisée. Les années 1973, 1979 et 1986 ne se trouvent pas à l'origine d'indiscutables renversements de tendances : **le ralentissement de la croissance de la consommation totale d'énergie s'est ainsi manifesté plusieurs années avant le premier choc pétrolier**, le second choc a été suivi d'un regain de dynamisme de la consommation et le contre-choc d'une nouvelle période de ralentissement. La décroissance de l'intensité énergétique s'est accélérée dès le milieu des années 60. Les chocs et contre-choc pétroliers semblent dans la plupart des cas n'avoir fait que confirmer une tendance antérieure sans créer de réelle rupture. **Cela conduit à l'hypothèse selon laquelle le rôle des prix comme facteur d'évolution de la consommation d'énergie doit être fortement relativisé et ne saurait constituer un élément clé sur le long terme.**

Nous observons que, depuis 1965, toute accélération et tout ralentissement de la croissance du revenu par tête se traduit par une variation d'intensité de même signe de la croissance de la consommation d'énergie par tête. Les variations de la consommation d'énergie par tête demeurent inférieures à celles du revenu par tête. Sur la période 1965-97, l'élasticité de la consommation d'énergie par tête au revenu par tête apparaît structurellement inférieure à 1 (cf. figure 21).

La dynamique démographique apparaît ainsi comme une variable explicative incontournable de la trajectoire future de la consommation totale d'énergie, conditionnant simultanément :

- la dynamique du PIB (une croissance économique soutenue liée à une population vieillissante est-elle envisageable ?),
- la dynamique plus mécanique du revenu par tête (le ralentissement démographique étant plus prononcé que celui de la croissance économique),
- l'effet "quantité" associé à la consommation d'énergie par tête (la consommation totale d'énergie étant le résultat de la consommation par tête et du nombre d'habitants).

3. Mise en perspective des travaux de projection

3.1. Panel des travaux de projections

Les travaux auxquels nous nous référons sont les suivants :

- . "World Energy Outlook", Agence Internationale de l'Energie, OCDE, 1998.
- . "Global Energy Perspectives", International Institute for Applied Systems Analysis & Conseil Mondial de l'Énergie, Cambridge University Press, 1998.
- . "Evolution of the world's energy system 1860-2060", Shell, 1997.
- . Modélisation Sheffield, Oak Ridge Laboratory, 1997.
- . "La dynamique du marché mondial de l'énergie", S. Nachtet, thèse, 1996.

Le scénario Sheffield propose les résultats sous forme d'une fourchette de consommation totale d'énergie. Nous ferons référence aux deux extrêmes et au milieu de la fourchette sous les noms de scénarios Low, Medium et High.

3.1.1. Les hypothèses des scénarios

Les hypothèses sous-jacentes aux travaux de projections concernent essentiellement les croissances démographique et économique. Les évolutions anticipées, quel que soit l'horizon des projections, sont toujours exprimées par un taux de croissance annuel moyen pour le PIB, par un taux de croissance annuel moyen ou une valeur pour la population. Dans le cas où les travaux ne mentionnent pas d'année de référence (Sheffield, Nachtet), nous avons calculé le taux de croissance annuel moyen ou la valeur de la population mondiale à l'horizon de la projection à partir des données publiées par l'AIE³

Tableau 1 : Population

	AIE	IIASA-CME	IIASA-CME	Shell	Sheffield	Nachtet
Année référence	1995	1990	1990	1990	-	-
Pop. Mondiale	5529	5260	5260	5200	-	-
Horizon	2020	2020	2050	2060	2100	2010
Pop. Mondiale	7466	7920	10060	10000	10000	6758
Tcam	1,21	<i>1,37</i>	<i>1,09</i>	<i>0,96</i>	<i>0,55</i>	1,35

Note : tcam = taux de croissance annuel moyen ; en italique et gras les taux de croissance annuels moyens et les valeurs que nous avons calculés.

Tableau 2 : Produit Mondial Brut

	AIE Scénario Low	AIE Scénario BAU	AIE Scénario High	Shell *	Nachtet
Année référence	1995	1995	1995	1990	-
PIB G\$ PPA 1990	30,34	30,34	30,34	-	-
Horizon	2020	2020	2020	2060	2010
PIB G\$ PPA 1990	<i>57,64</i>	<i>65,09</i>	<i>77,08</i>	<i>204,55</i>	<i>46,59</i>
Tcam	2,6	3,1	3,8	2,96	2,9

³ "Statistiques et bilans énergétiques des pays non-membres, 1996-97", AIE - OCDE, 1999 (données originales Banque Mondiale et CEPII).

Tableau 2 : Produit Mondial Brut (suite)

	IIASA-CME Scénario A	IIASA-CME Scénario B	IIASA-CME Scénario C	IIASA-CME Scénario A	IIASA-CME Scénario B	IIASA-CME Scénario C
Année référence	1990	1990	1990	1990	1990	1990
PIB \$ PPA 1990	25,70	25,70	25,70	25,70	25,70	25,70
Horizon	2020	2020	2020	2050	2050	2050
PIB \$ PPA 1990	56,80	49,30	50,80	115,0	87,80	91,30
Tcam	2,68	2,20	2,30	2,53	2,07	2,14

Notes : tcam = taux de croissance annuel moyen ; en italique et gras les taux de croissance annuels moyens et les valeurs que nous avons calculés.

* Les projections de PIB du scénario Shell sont calculées sur la base des projections de revenu par tête et de croissance démographique.

Nous calculons, à partir des hypothèses d'évolutions démographique et économique, les séries correspondantes de revenu par tête. Ce ratio nous paraît en effet crucial à la lumière des éléments de dynamique de la consommation d'énergie mis en évidence précédemment. Les valeurs de revenu par tête que nous donnons dans le tableau ci-dessous sont issues du raccordement sur l'année 1997 des séries lissées population et PIB de chacun des scénarios aux séries "Monde".

Tableau 3 : Revenu par tête

	AIE Scénario Low	AIE Scénario BAU	AIE Scénario High	Shell *	Nachet
Horizon	2020	2020	2020	2060	2010
\$ PPA 1990 par tête	7769	8688	10151	19564	6915
Tcam	1,36	1,86	2,55	1,98	1,51

	IIASA-CME Scénario A	IIASA-CME Scénario B	IIASA-CME Scénario C	IIASA-CME Scénario A	IIASA-CME Scénario B	IIASA-CME Scénario C
Horizon	2020	2020	2020	2050	2050	2050
\$ PPA 1990 par tête	7619	6835	6994	12029	9476	9811
Tcam	1,28	0,80	0,90	1,42	0,97	1,03

Notes : tcam = taux de croissance annuel moyen ; en italique et gras les taux de croissance annuels moyens et les valeurs que nous avons calculés.

* Les projections de revenu par tête du scénario Shell sont calculées sur la base des projections de PIB et de croissance démographique raccordées à l'année 1997 des séries lissées ; elles diffèrent des projections originales : 17000 \$ par tête en 2060 contre 4300 \$ en 1990, soit un taux de croissance annuel moyen de 1,98%.

3.1.2. Les résultats des scénarios

Tableau 4 : Consommation totale d'énergie (y compris biomasse non commerciale)

	AIE Sc. BAU	Shell * Sc. D	Shell * Sc. SG	Sheffield Sc. Low	Sheffield Sc. Med.	Sheffield Sc. High	Nachet
Année référence	1995	-	-	-	-	-	1995
Mtep	9147	-	-	-	-	-	8718
Horizon	2020	2060	2060	2050	2050	2050	2010
Mtep	14995	19269	32115	14960	16300	17640	11810
Tcam	2,00	1,13	1,95	0,89	1,05	1,19	2,04

	IIASA-CME Scénario A	IIASA-CME Scénario B	IIASA-CME Scénario C	IIASA-CME Scénario A	IIASA-CME Scénario B	IIASA-CME Scénario C
Année référence	1990	1990	1990	1990	1990	1990
Mtep	8980	8980	8980	8980	8980	8980
Horizon	2020	2020	2020	2050	2050	2050
Mtep	15370	13550	11430	24800	19830	14250
Tcam	1,81	1,38	0,81	1,71	1,33	0,77

Notes : tcam = taux de croissance annuel moyen ; Scénario AIE BAU = Business As Usual, Shell SG = Sustained Growth, Shell D = Dematerialisation ; en italique et gras les taux de croissance annuels moyens que nous avons calculés.

* Les données de consommation d'énergie des scénarios Shell sont calculées sur la base des projections de la consommation par tête et de la croissance démographique et raccordées à l'année 1997 des séries lissées..

Bien que les évolutions de consommation d'énergie par tête et d'intensité énergétique du PIB doivent être considérées comme des hypothèses à la base des scénarios, nous sommes amenés à présenter ces ratios comme des résultats, leurs évolutions anticipées *a priori* n'étant que rarement mentionnées dans les différents travaux de projections. Les valeurs que nous donnons dans les tableaux ci-dessous sont calculées à partir des données de consommation d'énergie, de population et de PIB raccordées sur l'année 1997 (séries lissées), à laquelle la consommation d'énergie par tête est de 1,67 tep et l'intensité énergétique de 0,292 tep pour 1000 \$ PPA 1990, en tenant compte de la biomasse non commerciale.

Tableau 5 : Consommation d'énergie par tête

	AIE Sc. BAU	Shell * Sc. D	Shell * Sc. SG	Sheffield Sc. Low	Sheffield Sc. Med.	Sheffield Sc. High	Nachet
Horizon	2020	2060	2060	2050	2050	2050	2010
Tep par tête	<i>1,99</i>	<i>1,86</i>	<i>3,09</i>	<i>1,73</i>	<i>1,88</i>	<i>2,03</i>	<i>1,82</i>
Tcam	<i>0,77</i>	<i>0,17</i>	<i>0,98</i>	<i>0,07</i>	<i>0,22</i>	<i>0,37</i>	<i>0,66</i>

	IIASA-CME Scénario A	IIASA-CME Scénario B	IIASA-CME Scénario C	IIASA-CME Scénario A	IIASA-CME Scénario B	IIASA-CME Scénario C
Horizon	2020	2020	2020	2050	2050	2050
Tep par tête	<i>1,84</i>	<i>1,67</i>	<i>1,47</i>	<i>2,30</i>	<i>1,89</i>	<i>1,41</i>
Tcam	<i>0,42</i>	<i>0,00</i>	<i>-0,55</i>	<i>0,61</i>	<i>0,23</i>	<i>-0,32</i>

Notes : tcam = taux de croissance annuel moyen ; Scénario BAU = Business As Usual, Shell SG = Sustained Growth, Shell D = Dematerialisation ; en italique et gras les taux de croissance annuels moyens que nous avons calculés.

Tableau 6 : Intensité énergétique du PIB PPA

	AIE Scénario BAU	Shell * Sc. D	Shell * Sc. SG	Nachet
Horizon	2020	2060	2060	2010
Tep / 1000 \$ 1990 PPA	<i>0,229</i>	<i>0,095</i>	<i>0,178</i>	<i>0,264</i>
Tcam	<i>-1,05</i>	<i>-1,77</i>	<i>-0,78</i>	<i>-0,77</i>

	IIASA-CME Scénario A	IIASA-CME Scénario B	IIASA-CME Scénario C	IIASA-CME Scénario A	IIASA-CME Scénario B	IIASA-CME Scénario C
Horizon	2020	2020	2020	2050	2050	2050
Tep / 1000 \$ 1990 PPA	<i>0,242</i>	<i>0,244</i>	<i>0,210</i>	<i>0,192</i>	<i>0,200</i>	<i>0,144</i>
Tcam	<i>-0,81</i>	<i>-0,78</i>	<i>-1,42</i>	<i>-0,79</i>	<i>-0,71</i>	<i>-1,33</i>

Notes : tcam = taux de croissance annuel moyen ; Scénario BAU = Business As Usual, Shell SG = Sustained Growth, Shell D = Dematerialisation ; en italique et gras les taux de croissance annuels moyens et les valeurs que nous avons calculés.

L'inventaire des hypothèses et résultats amène deux constats : d'une part **la diversité des sources et des années de référence des séries rend difficile sinon impossible la comparaison des différents travaux** ; d'autre part les hypothèses d'évolution sont systématiquement exprimées en taux de croissance annuel moyen, à l'exception toutefois des prévisions démographiques pour lesquelles certains travaux retiennent une valeur symbolique, telle que le seuil symbolique des dix milliards d'habitants, les divergences relatives au rythme de croissance portant dans ce cas sur l'année à laquelle cette valeur est atteinte.

Certains scénarios contiennent des remarques relatives à la dynamique d'évolution démographique, les auteurs ayant conscience que la population mondiale ne peut pas doubler régulièrement comme cela a été le cas au cours du XX^{ème} siècle. Le ralentissement de la croissance de la population est traduit par des taux de croissance annuels moyens plus faibles pour les horizons postérieurs à 2020. Si l'aspect dynamique de l'évolution n'est apparemment pas ignoré, il n'est que très imparfaitement traduit par une succession de taux de croissance annuels moyens décroissants sur plusieurs périodes successives. Par ailleurs, alors qu'un phénomène de ralentissement est perçu en matière démographique, il semble ne pas en être de même en matière économique et énergétique. Sauf exception, la plupart des taux de croissance annoncés se situent dans la continuité ou sont supérieurs à ceux observables en moyenne sur les vingt dernières années.

3.2. Évaluation des scénarios

Notre évaluation des scénarios repose sur la mise en évidence des dynamiques implicites associées aux différentes hypothèses par le calcul d'une dérivée seconde moyenne. La comparaison des intensités d'évolution entre la période de projection et celle de référence dépend du choix de la date marquant le début de cette dernière. Nous pourrions considérer que la dérivée seconde doit être calculée sur l'ensemble des données historiques dont nous disposons, soit la période 1950-97. Nous préférons nous baser sur la dernière phase d'intensité homogène. Dans le cas de la population mondiale, la trajectoire du plan de phase en variations relatives fait apparaître une variation maximale en 1969, prélude à la phase de ralentissement de la croissance. La dérivée seconde est ainsi calculée sur la période 1970-97. **Cette approche est justifiée par l'idée que l'évolution future sera d'avantage conditionnée par la dernière phase d'intensité homogène que par une succession de phases d'intensités variables et contradictoires sur une période**, en l'occurrence 1950-97, déterminée arbitrairement (disponibilité des données par exemple).

3.2.1. Hypothèses démographiques

Nous évaluons la cohérence des différentes hypothèses à la lumière de l'évolution démographique sur la période 1970-97.

Tableau 7 : caractéristiques de la dynamique démographique entre 1970 et 1997 (série lissée)

Population mondiale en 1970 (en millions)	Taux de croissance 1970 / 1969	Population mondiale en 1997 (en millions)	Taux de croissance 1997 / 1996	Dérivée 2 nd e moyenne sur 1970-97
3600	2,02	5687	1,41	-1,22

Le tableau 8 indique les valeurs des dérivées secondes moyennes associées aux différentes hypothèses de croissance démographique. Les valeurs de la population mondiale sont issues du raccordement des projections à la série lissée des données historiques et peuvent différer des valeurs originales présentées dans le tableau 1.

Tableau 8 : évaluation des hypothèses de croissance démographique

Scénarios	Horizon de la projection	Population mondiale (en millions)	tcam	Dérivée 2 nd e moyenne
AIE	2020	7499	1,21	-1,30
IIASA-CME	2020	7783	1,37	-0,22
IIASA-CME	2050	10084	1,09	-1,00
Shell	2060	10356	0,96	-1,29
Sheffield	2100	10000	0,55	-2,18
Nachet	2010	6770	1,35	-0,62

Notes : tcam = taux de croissance annuel moyen entre 1997 et l'horizon de la projection.

La comparaison des dérivées secondes moyennes des différents scénarios à la dérivée seconde moyenne de la période 1970-97, marquée par le ralentissement de la croissance, nous permet de **distinguer les scénarios anticipant une accentuation du ralentissement** (AIE, Shell, Sheffield) de ceux **anticipant un regain de dynamisme de la croissance démographique** (IIASA, Nachet). La projection Sheffield prévoit que le seuil symbolique des dix milliards d'habitants ne sera atteint qu'en 2100. La dérivée seconde moyenne associée à cette hypothèse est ainsi près de deux fois inférieure à celle de la période 1970-97 (-2,18 contre -1,22%). Un tel ralentissement aboutit à la quasi-stagnation de la population mondiale. La représentation graphique en plan de phase fait que nous ne pouvons accepter une telle perspective sans nous refuser à envisager la possibilité d'un phénomène jusqu'alors inconnu : la décroissance en valeur absolue de la population mondiale.

3.2.2. Hypothèses économiques

Nous avons vu que le plan de phase du PIB (PPA) met en évidence un ralentissement de la croissance économique depuis 1951 à l'exception de la période entre 1958 et 1966. Nous pouvons ainsi choisir de comparer les scénarios aux périodes 1951-97 ou 1967-97. L'intensité du ralentissement sur la période 1951-97 est inférieure (dérivée seconde moyenne de -1,42%) à celle de la période 1967-97 (dérivée seconde moyenne de -2,53%). Se référer à la période la plus longue présente l'avantage de prendre en compte les cycles de croissance soutenue et "molle" que l'on observe sur long terme. Même si l'amplitude des cycles tend apparemment à diminuer, nous pouvons formuler l'hypothèse raisonnable que l'évolution future du PIB mondial conserve cette trajectoire cyclique. Choisir la période 1967-97 comme référence n'est toutefois pas dénué de sens. Nous observons en effet que l'actuelle phase de ralentissement de la croissance économique est parallèle à celle du ralentissement démographique, les deux phases débutant quasi simultanément à la fin des années 60. En formulant l'hypothèse que le ralentissement de la croissance économique soit à présent intimement lié au ralentissement démographique, se référer à l'intensité des variations du PIB sur la période 1967-97 pourrait s'avérer plus justifié du fait que le ralentissement démographique est significativement et durablement engagé et d'ores et déjà pris en compte dans les hypothèses démographiques.

Tableau 9 : caractéristiques de la dynamique de la croissance économique entre 1967 et 1997 (série lissée)

PIB mondial en 1967 (en milliards \$ PPA 1990)	Taux de croissance 1967 / 1966	PIB mondial en 1997 (en milliards \$ PPA 1990)	Taux de croissance 1997 / 1996	Dérivée 2 nd e moyenne sur 1967-97
11564	5,06	32284	2,89	-2,53

Tableau 10 : caractéristiques de la dynamique de la croissance économique entre 1951 et 1997 (série lissée)

PIB mondial en 1951 (en milliards \$ PPA 1990)	Taux de croissance 1951 / 1950	PIB mondial en 1997 (en milliards \$ PPA 1990)	Taux de croissance 1997 / 1996	Dérivée 2 nd e moyenne sur 1951-97
5487	5,40	32284	2,89	-1,42

Le tableau 11 indique les valeurs des dérivées secondes moyennes associées aux différentes hypothèses de croissance économique. Les valeurs du PIB mondial sont issues du raccordement des projections à la série lissée des données historiques et peuvent différer des valeurs originales présentées dans le tableau 2.

Tableau 11 : évaluation des hypothèses de croissance économique

Scénarios	Horizon de la projection	PIB mondial (en millions \$ PPA 1990)	Tcam	Dérivée 2 nd e moyenne
AIE Low	2020	58262	2,60	-0,89
AIE BAU	2020	65153	3,10	0,58
AIE High	2020	76125	3,80	2,22
IIASA-CME A	2020	59299	2,68	-0,64
IIASA-CME B	2020	53198	2,20	-2,37
IIASA-CME C	2020	54434	2,30	-1,96
IIASA-CME A	2050	121293	2,53	-0,05
IIASA-CME B	2050	95566	2,07	-1,30
IIASA-CME C	2050	98924	2,14	-1,17
Nachet	2010	46816	2,90	0,05
Shell	2060	202620	2,96	0,07

Notes : tcam = taux de croissance annuel moyen entre 1997 et l'horizon de la projection.

Les dérivées secondes associées aux scénarios d'évolution de la croissance économique montrent que la plupart d'entre eux anticipent un coup d'arrêt au ralentissement des trente dernières années, voire une nouvelle phase de croissance économique soutenue.

Le corollaire des hypothèses démographique et économique est l'hypothèse de revenu par tête. Cet aspect est crucial à la formulation des projections énergétiques, le lien entre revenu et consommation d'énergie par tête étant clairement établi, tout au moins depuis le milieu des années 60. Les

caractéristiques de la dynamique de croissance du revenu par tête, sur les périodes identiques à celles du PIB, sont les suivantes :

Tableau 12 : caractéristiques de la dynamique de revenu par tête entre 1966 et 1997 (série lissée)

PIB par tête mondial en 1966 (en \$ PPA 1990)	Taux de croissance 1966 / 1965	PIB par tête mondial en 1997 (en \$ PPA 1990)	Taux de croissance 1997 / 1996	Dérivée 2 ^{nde} moyenne sur 1966-97
3305	3,03	5693	1,60	-3,62

Tableau 13 : caractéristiques de la dynamique de revenu par tête entre 1951 et 1997 (série lissée)

PIB par tête mondial en 1951 (en \$ PPA 1990)	Taux de croissance 1951 / 1950	PIB par tête mondial en 1997 (en \$ PPA 1990)	Taux de croissance 1997 / 1996	Dérivée 2 ^{nde} moyenne sur 1951-97
2199	2,92	5693	1,60	-1,50

Le tableau 14 indique les dynamiques d'évolution implicites du revenu par tête mondial, issues des différentes hypothèses de croissance démographique et économique.

Tableau 14 : évaluation des hypothèses implicites de revenu par tête

Scénarios	Horizon de la projection	Revenu par tête (en \$ PPA 1990)	Tcam	Dérivée 2 ^{nde} moyenne
AIE Low	2020	7769	1,36	-1,38
AIE BAU	2020	8688	1,86	1,21
AIE High	2020	10151	2,55	3,70
IIASA-CME A	2020	7619	1,28	-1,95
IIASA-CME B	2020	6835	0,80	-6,36
IIASA-CME C	2020	6994	0,90	-5,18
IIASA-CME A	2050	12029	1,42	-0,45
IIASA-CME B	2050	9476	0,97	-2,03
IIASA-CME C	2050	9811	1,03	-1,74
Nachet	2010	6915	1,51	-0,86
Shell	2060	19564	1,98	0,65

Notes : tcam = taux de croissance annuel moyen entre 1997 et l'horizon de la projection.

En matière de revenu par tête, seuls les scénarios IIASA-CME B et IIASA-CME C se situent dans la continuité voire en deçà de la tendance actuelle de progression ralentie. Les scénarios AIE, IIASA-CME A, Nachet et Shell anticipent un regain de dynamisme, spectaculaire dans certains cas.

3.2.3. Projections de la consommation totale d'énergie

Les bases d'évaluation des projections de consommation d'énergie sont les suivantes :

Tableau 15 : caractéristiques de la dynamique de la consommation d'énergie entre 1962 et 1996 (série lissée)

Consommation mondiale d'énergie en 1962 (Gtep)	Taux de croissance 1962 / 1961	Consommation mondiale d'énergie en 1997 (Gtep)	Taux de croissance 1997 / 1996	Dérivée 2 ^{nde} moyenne sur 1962-97
3669	4,92	9487	1,44	-3,52

Tableau 16 : caractéristiques de la dynamique de la consommation d'énergie entre 1951 et 1996 (série lissée)

Consommation mondiale d'énergie en 1951 (Gtep)	Taux de croissance 1951 / 1950	Consommation mondiale d'énergie en 1997 (Gtep)	Taux de croissance 1997 / 1996	Dérivée 2 ^{nde} moyenne sur 1951-97
2186	5,14	9487	1,44	-2,10

Le tableau 17 indique les valeurs des dérivées secondes moyennes associées aux différentes projections de consommation d'énergie. Les valeurs sont issues du raccordement des projections à la série lissée des données historiques et peuvent différer des valeurs originales présentées dans le tableau 4.

Tableau 17 : évaluation des projections de consommation d'énergie

Scénarios	Horizon de la projection	Consommation mondiale d'énergie (en ktep)	Tcam	Dérivée 2 ^{nde} moyenne
Nachet	2010	12341	2,04	4,89
AIE BAU	2020	14949	2,00	2,64
IIASA-CME A	2020	14324	1,81	1,85
IIASA-CME B	2020	13004	1,38	-0,35
IIASA-CME C	2020	11414	0,81	-5,20
IIASA-CME A	2050	23271	1,71	0,61
IIASA-CME B	2050	19100	1,33	-0,30
IIASA-CME C	2050	14265	0,77	-2,56
Sheffield Low	2050	15133	0,89	-1,95
Sheffield Medium	2050	16462	1,05	-1,25
Sheffield High	2050	17790	1,19	-0,72
Shell D	2060	19269	1,13	-0,79
Shell SG	2060	32115	1,95	0,91

Notes : tcam = taux de croissance annuel moyen entre 1996 et l'horizon de la projection ; Scénario BAU = Business As Usual, Shell D = Dematerialisation, Shell SG = Sustained Growth.

Les tendances des projections de consommation d'énergie se situent en rupture par rapport aux périodes 1963-97 et 1952-97, à l'exception du scénario IIASA-CME C. A l'horizon 2010-2020, les scénarios Nachet, AIE Business As Usual et IIASA-CME A prévoient un dynamisme vigoureux de la consommation d'énergie, tranchant avec la tendance des trente dernières années. Le scénario IIASA-CME B anticipe un coup d'arrêt au ralentissement (cf. figure 23). A l'horizon 2050-2060, les projections de consommation apparaissent globalement plus modérées, allant d'une croissance en ralentissement proche de la tendance historique (scénarios IIASA-CME C, Sheffield Low et Medium) à une croissance plus vigoureuse (scénarios IIASA-CME B, Sheffield High et Shell Dematerialisation). Seuls les scénarios IIASA-CME A et Shell Sustained growth projettent une croissance en accélération (cf. figure 24).

3.2.4. Projections de la consommation d'énergie par tête et de l'intensité énergétique

Les évolutions anticipées de la consommation d'énergie par tête sont multiples alors qu'un consensus semble se dégager en matière d'intensité énergétique. A la suite de l'actuelle stagnation de la consommation par tête, les scénarios prévoient dans l'ensemble une nouvelle phase de croissance dynamique, d'intensité variable selon les cas, certains poursuivant au contraire la tendance de ralentissement des trente dernières années par une phase de décroissance. La tendance à la décroissance de l'intensité énergétique est par ailleurs confirmée par les différents scénarios, la plupart anticipant toutefois une décroissance en ralentissement.

Afin d'évaluer les hypothèses implicites relatives à ces deux ratios, nous adoptons le mode de représentation graphique associant les variations relatives de revenu par tête et de consommation d'énergie par tête (cf. figures 25 et 26).

A l'horizon 2020, les scénarios AIE et Nachet anticipent une croissance soutenue de la consommation d'énergie par tête. L'hypothèse de ce rebond demeure cependant liée à une élasticité de la consommation au revenu par tête inférieure à 1. Les évolutions anticipées conjointes du revenu et de la consommation d'énergie par tête apparaissent ainsi cohérentes par rapport à la période 1965-97. Comme nous l'avons déjà évoqué, les scénarios AIE, Nachet et IIASA A se situent dans une optique de progression du revenu par tête. Les scénarios IIASA B et C se distinguent par l'hypothèse d'une croissance très ralentie du revenu par tête et par la remise en cause du niveau de l'élasticité. Il semble que ces deux scénarios prévoient les deux cas probables liés à une tendance à la stagnation du revenu par tête : soit la consommation d'énergie par tête reste stable (scénario B), soit celle-ci diminue (scénario C). L'IIASA se situe ainsi en rupture par rapport aux idées généralement admises. A l'horizon 2050-60, les scénarios Shell et IIASA A anticipent une dynamique de progression du revenu

par tête supérieure à celle de la période 1965-97. La progression de la consommation d'énergie par tête s'inscrit de façon identique à la hausse sur le sentier des trente dernières années, le lien par élasticité inférieure à 1 n'étant pas abandonné. Les scénarios IIASA B et IIASA C anticipent une croissance ralentie du revenu par tête, proche de la stagnation.

La relation entre intensité énergétique et croissance économique n'apparaît pas aussi évidente que celle associant revenu et consommation d'énergie par tête. Au niveau mondial, nous observons que l'intensité énergétique est en décroissance soutenue depuis 1966 et plus particulièrement depuis les années 80, parallèlement à la phase de croissance ralentie du PIB. A l'horizon 2010-2020 comme 2050-2060, nous constatons qu'un certain consensus se dégage en faveur d'une décroissance ralentie de l'intensité énergétique, quelle que soit cependant l'hypothèse de dynamique économique.

Conclusions de la première partie

Les travaux de projection n'ont certes pas vocation à être réduits à de simples pronostics, fatalement démentis par les faits, mais à identifier les possibles sentiers que sont susceptibles d'emprunter les trajectoires des évolutions démographiques, économique et énergétique. **Les travaux de notre panel de scénarios anticipent dans l'ensemble des dynamiques de croissance de la consommation mondiale d'énergie supérieures à ce que nous observons depuis l'après guerre et particulièrement depuis le milieu des années soixante. Ces projections trouvent leur origine dans des hypothèses de croissance économique qui sous-entendent une prochaine et profonde modification de la tendance de long terme. Notre principale observation concernant la plupart des scénarios réside dans le fait que de tels phénomènes, croissance économique et énergétique, sont présentés comme se situant dans la continuité des trente dernières années alors qu'ils signifieraient, au contraire, une rupture de la tendance générale au ralentissement** que nous mettons en évidence par la représentation en phase et le calcul de la dérivée seconde moyenne. Nous en concluons que la plupart des scénarios ne semblent pas prendre la mesure des évolutions économique et énergétique qui ne peuvent être bien traduites par des taux constants. Enfin, les scénarios ne font que rarement référence au ralentissement important de la croissance démographique qui pourrait perturber la nouvelle ère de dynamisme économique si celle-ci devait effectivement se manifester.

Deuxième partie : évolution des différentes formes d'énergie

La première partie du présent travail, consacrée à la demande d'énergie au plan mondial (historique et scénarios d'évolution), met en évidence, indépendamment de problèmes statistiques trop facilement négligés, l'importance du facteur démographique et permet de constater que les auteurs de scénarios font parfois usage d'hypothèses implicites représentant de véritables ruptures économiques.

Nous abordons maintenant, suivant un canevas identique à celui utilisé en première partie, les questions relatives aux différentes formes d'énergie. Ici aussi, nous discuterons, brièvement, la valeur des statistiques mais insisterons sur le problème des fluctuations de consommation parfois considérables, ce qui entraîne que le filtrage des chroniques ne doit pas perdre de vue les phénomènes eux-mêmes. Comme en première partie, nous ferons appel à la représentation en phase pour mettre en évidence la dynamique des phénomènes.

1. Le problème des statistiques

Il est à peine besoin de rappeler ici que **les statistiques des formes d'énergie ne sont pas de même qualité**, pour des raisons diverses touchant à leur nature technique comme aux classiques difficultés de collecte, parfois très importantes dans divers pays. L'électricité (hydraulique, nucléaire) mise en réseau est, en principe, bien comptée. Les hydrocarbures liquides qui contiennent, si l'on peut dire, beaucoup de fiscalité, sont bien comptés en volume, le passage aux tep impliquant une multiplication par une masse volumique que l'on peut estimer bien connue elle aussi. Le gaz naturel est un peu plus difficile à suivre, malgré tous les progrès des méthodes de comptage : la plage d'erreur, s'agissant de " tep gaz " est probablement plus importante que pour les liquides. Avec les charbons, on commence à rentrer dans des zones d'imprécision élevée car une grande partie de la production et de la consommation est localisée dans des zones où il n'est pas évident que les suivis de production, en volume et pouvoir calorifique, permettent d'alimenter les statistiques en tep de bonne qualité.

Le problème de la précision statistique devient plus irritant pour les autres formes d'énergie. On peut en effet estimer que la taille importante des énergies traitées ci-dessus minimise les conséquences d'erreurs, pour ce qui intéresse leurs substitutions relatives. Mais, concernant les autres formes d'énergie, on est encore conduit à distinguer :

- la biomasse dont l'ordre de grandeur est important mais qui introduit une imprécision statistique certaine
- et les autres (géothermie, solaire, éolien) dont la petite taille est, aujourd'hui probablement, de l'ordre de grandeur des erreurs absolues sur les énergies majeures, mais dont l'importance future espérée en fait un élément clé de divers scénarios alors même que, par nature, le comptage des flux associés risque de se révéler aléatoire.

Cette situation n'est pas sans conséquence sur l'évaluation de la compétition entre énergies, d'autant que l'appréciation dynamique de ces phénomènes introduit naturellement la vitesse d'évolution des parts de marché.

Nous avons ainsi le point essentiel de différence entre la première partie (approche globale) et la deuxième partie (approche par énergies) de notre étude : dès que l'on s'intéresse aux différentes formes d'énergie, la notion de part de marché apparaît et, dans l'optique dynamique que nous adoptons, la vitesse d'évolution des parts de marché devrait représenter un élément important des scénarios.

Le développement de notre étude sera donc le suivant :

- statistiques relatives aux différentes formes d'énergie : quantités et parts de marché
- la compétition entre énergies
- les scénarios spécifiques et nos observations

2. Évolution des différentes formes d'énergie ⁴

L'examen des séries fait apparaître des fluctuations que l'on peut naturellement éliminer par filtrage, ce que nous avons fait dans notre première partie, délibérément consacrée au moyen ou au long terme. Lorsque l'on traite des différentes énergies, on constate que l'allure de leurs fluctuations leur est spécifique, ce qui conduit à un double regard : évolution à court et long terme.

2.1 Évolution à court terme

Nous suivrons une double approche : évolution des parts de marché et fluctuations des consommations. Cet examen est limité aux seules énergies dominantes : charbon, pétrole et gaz.

Les graphes de l'évolution des parts de marché charbon vs pétrole et pétrole vs gaz (cf. figures 27 et 28) montrent l'importance des chocs pétroliers de 1973, et surtout 1979 et le contre choc de 1986, sur la place de ces énergies. On notera qu'en leur temps ces "chocs" furent perçus et décrits comme tels, ce qui n'est pas le cas des fluctuations, pourtant tout à fait comparables, de ces derniers mois. Avant 1973, pétrole et gaz croissent, le charbon recule ; de 1979 à 1986, le charbon regagne du terrain alors que le pétrole décroît et que le gaz continue à croître, enfin, à partir de 1986, charbon et pétrole décroissent, alors que le gaz continue à croître. On note cependant un déclin certain de la vitesse de décroissance du pétrole : de fait, le lien physique entre pétrole et gaz est tenace, et, mais il sera nécessaire de regarder cela plus attentivement, on peut penser que nous assistons à une substitution à l'intérieur de l'ensemble des hydrocarbures, substitution d'autant plus complexe que la technologie du transport du gaz, qui n'a pas fini d'évoluer, y joue un rôle déterminant.

On peut s'intéresser aux fluctuations, nécessairement sur séries brutes, en recherchant comment les variations de la demande sont répercutées par chaque forme d'énergie dominante (charbon, pétrole, gaz). Cela suppose implicitement un comportement plus ou moins rationnel, ce qui est peut-être excessif, mais, au moins pour une partie des acteurs, réaliste.

La figure 29 met en évidence la réaction propre à chaque énergie, face aux fluctuations de la demande totale⁵. Ce qui apparaît est le comportement très différent des énergies.

De 1950 à 1975, le charbon augmente systématiquement moins que la demande totale, pétrole et gaz systématiquement plus. En outre, le charbon, pour chaque point bas du cycle énergétique, accuse les variations en les amplifiant (cf. figure 29, points A, B, C, D, E) ; à partir de 1976, jusqu'en 1986, le pétrole se situe en dessous du total, ensuite le charbon perd de nouveau du terrain dans un schéma énergétique qui se resserre et devient très compact à partir de 1993. **S'il en était besoin, cette approche confirme la véritable rupture dans les comportements qu'a provoqué le choc de 1973 alors que 20 ans plus tard, les énergies dominantes semblent suivre des sentiers identiques.**

⁴ Sources des données : cf. "Peut-on améliorer les prévisions énergétiques ? Première partie : la demande globale d'énergie", Revue de l'Énergie, janvier 2000.

⁵ Source des variations de consommation pour l'année 1998 : BP Amoco Statistical Review of World Energy, juin 1999.

On notera que cette analyse des séries non filtrées repose sur l'acceptation des statistiques, sans remettre en cause leur précision ; **on pourrait même conclure que la cohérence des phénomènes observés constitue une garantie de qualité, mais il serait préférable de savoir jusqu'où on peut aller sans risquer l'interprétation d'artefacts.**

2.2 Évolution sur long terme

L'évaluation des scénarios d'évolution des différentes formes d'énergie nécessite dans un premier temps l'analyse des tendances historiques propres à chacune d'elles, tant en termes de consommation primaire que de part de marché. Nous conservons notre approche en dynamique et présentons ici les caractéristiques des trajectoires des plans de phases sur la période 1950-1997 (cf. définition du plan de phase). L'analyse sur long terme nécessite de se référer aux séries lissées afin d'éliminer les fluctuations de court terme.

La consommation de **charbon** est caractérisée par deux grands cycles comme le révèle le plan de phases (cf. figure 30). Le premier cycle de croissance trouve son origine avant 1950, atteint une variation maximale en 1958 pour ralentir jusqu'en 1969. La trajectoire se trouve alors dans la zone critique de stagnation mais en sort rapidement pour amorcer une nouvelle phase de croissance dont la variation maximale sera atteinte en 1980-81. La consommation de charbon subit ainsi un très net ralentissement sur la période étudiée. Le plan de phase de la part de marché traduit clairement ce phénomène (cf. figure 31) : le charbon n'a cessé de perdre du terrain par rapport aux énergies primaires entre 1950 et le début des années 80. La décroissance continue de la part de marché ralentit à partir de 1968 pour atteindre la zone de stagnation vers 1980. La trajectoire de la part de marché est d'ores et déjà engagée dans une nouvelle phase de décroissance.

La consommation de **pétrole** présente également deux cycles dont le second est toujours en cours (cf. figure 32). Une longue phase de croissance trouve sa conclusion en 1982 en atteignant la zone de stagnation. La trajectoire repart cependant à la hausse. L'amplitude de ce regain de dynamisme de la consommation pétrolière est largement inférieure à celle de la première phase puisque le taux de croissance maximum semble devoir rester en deçà de 1,5% contre près de 8% à la fin des années 60. La représentation en phase de la part de marché conduit à une analyse moins optimiste de l'évolution de la consommation pétrolière (cf. figure 33). Les variations maximales de la phase de gain de parts de marché se situent entre 1965 et 1967. Le ralentissement de cette croissance puis la décroissance amènent la trajectoire à toucher une variation négative maximale en 1984. La zone critique de stagnation est atteinte en 1975-76. Le pétrole continue certes de perdre des parts de marché depuis 1984 mais à un rythme de plus en plus en faible, la trajectoire étant en passe d'atteindre de nouveau la zone de stagnation. Enfin, il est à remarquer que les maxima et minima des plans de phases de consommation de charbon et de pétrole sont inversés : à une variation maximale de l'une correspond une variation minimale de l'autre.

En comparaison des trajectoires de consommation de charbon et de pétrole, la consommation de **gaz naturel** présente des variations beaucoup plus régulières. Le plan de phase montre un ralentissement continu dans la croissance de la consommation à l'exception du plateau de 1961 et de la brève période de reprise entre 1981 et 1985 (cf. figure 34). La tendance de long terme semble amener les taux de croissance annuels sous la barre des 2%. La part de marché évolue de façon similaire : bien que croissante sur toute la période étudiée, on observe un net ralentissement depuis 1962. La dynamique de gain de parts de marché du gaz naturel sur les autres énergies primaires semble s'essouffler (cf. figure 35).

L'énergie **nucléaire** se trouve en bout de course : ceci ne constitue pas un jugement de valeur, mais traduit le fait que la contribution de cette énergie à l'augmentation de la consommation totale d'énergie ne cesse de décroître. Les plans de phases de consommation comme de part de marché montrent que

la zone critique est d'ores et déjà atteinte (cf. figures 36 et 37). La trajectoire de consommation semble pouvoir rester asymptotique au seuil de variation zéro mais cela ne saurait être de nature à maintenir la part de marché à brève échéance.

La trajectoire de consommation de l'énergie **hydraulique** connaît un déclin incontestable depuis 1970. La période 1989-94 n'aura probablement que retardé ce déclin. En terme de consommation, la trajectoire se situe actuellement proche du seuil de croissance annuelle de 2% (cf. figure 38). La trajectoire de la part de marché est caractérisée par une grande stabilité. Les plans de phases montrent qu'après être sortie de la zone de stagnation en 1967-68 pour amorcer une phase de croissance, la trajectoire a de nouveau touché cette zone en 1987 mais pour rebondir jusqu'à un maximum, inférieur à celui de 1979 (cf. figure 39).

La trajectoire de consommation de l'énergie **géothermique** est en forme de U inversé. La variation maximale relative est atteinte dès 1979 (cf. figure 40). La trajectoire de part de marché suit une courbe identique avec une variation maximale relative en 1985 (cf. figure 41). L'énergie géothermique semble durablement orientée au ralentissement qui pourrait mener à un déclin en part de marché.

Les énergies **solaire** et **éolienne** semblent, tout au moins au niveau mondial, atteindre un plateau dans leur développement. Le début d'une phase d'expansion brutale coïncide avec le premier choc pétrolier, ce qui est cohérent avec la mise en œuvre de multiples programmes de recherche dans les pays de l'OCDE destinés à diversifier les sources d'approvisionnements énergétiques. La dynamique de cette phase plafonne en 1981 pour ralentir de façon continue jusqu'à la fin de la période étudiée (cf. figure 42). Les dernières années semblent marquer une stabilisation de la consommation au voisinage d'un taux de croissance annuelle de 10%. La trajectoire de la part de marché est similaire à celle de la consommation. Le premier choc pétrolier insuffle une forte dynamique. Le ralentissement que l'on observe sur les dix années suivantes semble être à la veille d'une stabilisation dans la zone de taux de croissance annuelle proches de 5% (cf. figure 43). En dépit de cette tendance au ralentissement, la dynamique

La consommation d'énergie tirée de la **biomasse**, commerciale et non commerciale, suit une trajectoire de croissance marquée par un ralentissement depuis 1979-80 (cf. figure 44). La part de marché est en décroissance continue entre 1950 et le début des années 80 pour se stabiliser à environ 11% (cf. figure 45).

2.3 La compétition entre énergies

Face à une demande globale dont le taux de croissance semble durablement orienté à la baisse ou, du moins, ne plus croître, l'évolution des différentes formes d'énergie fait apparaître quelques points remarquables :

- parallélisme des variations de la demande globale, du charbon et des hydrocarbures depuis 1993.
- maintien de la part de marché des énergies les plus anciennes, hydraulique et biomasse : ce phénomène semble lié avant tout au ralentissement de la demande mais doit être retenu, au moins pour alimenter l'hypothèse de "noyaux durs" que chaque forme d'énergie pourrait accepter.
- situation critique du nucléaire qui ne peut reprendre quelque espoir qu'à la suite d'une impulsion extérieure.
- déclin en part de marché des énergies à CO₂ qui maintiennent une certaine progression quantitative, déclin lui aussi lié au ralentissement de la demande mais qui n'est pas sans introduire une certaine ambiguïté dans le jeu des opérateurs (OPEP).

- difficulté d'appréciation de la situation des énergies renouvelables : les courbes présentées sont entachées d'une imprécision considérable, ce qui ne signifie pas que l'allure générale ne soit pas convenable mais demande que, faute de mieux, on s'en tienne au qualitatif.
- enfin, et le plus important, non linéarité des évolutions, quel que soit le phénomène étudié.

3. Mise en perspective des travaux de projection

Les travaux auxquels nous nous référons sont les suivants :

- . "World Energy Outlook", Agence Internationale de l'Énergie, OCDE, 1998.
- . "Global Energy Perspectives", International Institute for Applied Systems Analysis & Conseil Mondial de l'Energie, Cambridge University Press, 1998.

3.1 Cadre de référence : les scénarios de demande globale à l'horizon 2020

Les scénarios d'évolution des énergies primaires sont indissociables des projections de la consommation mondiale d'énergie. Nous rappelons pour mémoire les caractéristiques de ces scénarios :

Tableau 18 : niveaux et taux de croissance de la consommation mondiale d'énergie des scénarios AIE et IIASA-CME 2020

	AIE Business As Usual	IIASA-CME A	IIASA-CME B	IIASA-CME C
Consommation mondiale d'énergie en ktep	14949	14324	13004	11414
Taux de croissance annuel moyen	2,00	1,81	1,38	0,81

Note : les taux de croissance annuels moyens proviennent des scénarios originaux. Les consommations mondiales d'énergies ont été recalculées sur la base de ces taux et des données AIE pour l'année 1997 afin de privilégier la dynamique des scénarios et de remédier aux différences de conventions statistiques entre l'AIE et l'IIASA-CME.

Le tableau suivant précise la contribution anticipée de chaque énergie primaire à la consommation totale à l'horizon 2020 :

Tableau 19 : les énergies primaires dans les scénarios AIE et IIASA-CME 2020

en ktep	AIE Business As Usual	IIASA-CME A1	IIASA-CME A2	IIASA-CME A3
Consommation mondiale d'énergie	14949	14324	14324	14324
Charbon	3763	3458	4017	2712
Pétrole	5248	4343	4194	3970
Gaz	3457	3374	3178	3579
Nucléaire	602	848	540	960
Hydraulique	351	-	-	-
Géothermique, solaire, éolien	113	-	-	-
Biomasse	1415	-	-	-
Total renouvelables	1879	2301	2395	3103

Tableau 19 : les énergies primaires dans les scénarios AIE et IIASA-CME 2020 (suite)

en ktep	IIASA-CME B	IIASA-CME C1	IIASA-CME C2
Consommation mondiale d'énergie	13004	11414	11414
Charbon	3253	2287	2287
Pétrole	3628	3016	3016
Gaz	3052	3056	2956
Nucléaire	864	669	849
Hydraulique	-	-	-
Géothermique, solaire, éolien	-	-	-
Biomasse	-	-	-
Total renouvelables	2207	2386	2306

Note : les données de consommation présentées ci-dessus diffèrent des données originales. En raison de conventions statistiques différentes entre l'AIE et l'IIASA, nous avons recalculé les données de consommation des énergies primaires à l'horizon 2020 sur la base de la consommation globale d'énergie recalculée et des parts de marché correspondantes.

3.2 Scénarios relatifs aux énergies primaires majeures : les dynamiques sous-jacentes

Notre méthode est celle mise en œuvre dans la première partie de notre étude concernant l'évaluation des scénarios de demande globale. Nous mettons en évidence la dynamique nécessaire à la réalisation des scénarios. L'approche graphique nous permet d'évaluer et de comparer scénarios et tendance historique. Pour des raisons de lisibilité, les figures 46 à 53 ne reprennent qu'une partie de la trajectoire historique et sont donc à rapprocher des figures 30 à 37.

Le tableau suivant complète les représentations graphiques (comme pour les scénarios globaux, nous avons calculé les taux et leur dérivée sur la période de référence 1950-1997, mais aussi, pour chaque énergie, sur une période plus remarquable de leur évolution, telle que la représentation en phase la présente) :

Tableau 20 : dynamiques sous-jacentes aux scénarios AIE et IIASA-CME 2020

Consommation	Période 1950-97	Période spécifique	AIE BAU	IIASA A1	IIASA A2	IIASA A3	IIASA B	IIASA C1	IIASA C2
Charbon		1980-97							
Tcam	1,89	1,44	2,25	1,87	2,54	0,80	1,60	0,06	0,06
Dérivée 2 nd e moyenne	-3,31	-6,36	8,44	7,13	9,30	0,64	6,00	-36,75	-36,75
Pétrole		1964-97							
Tcam	4,15	2,63	1,98	1,15	1,00	0,75	0,36	-0,45	-0,45
Dérivée 2 nd e moyenne	-4,42	-8,15	3,20	-1,27	-2,53	-5,11	-13,48	-	-
Gaz		1961-97							
Tcam	5,38	4,41	2,60	2,49	2,22	2,75	2,04	2,05	1,90
Dérivée 2 nd e moyenne	-3,34	-4,36	2,53	2,19	1,29	2,98	0,61	0,63	0,01
Nucléaire		1971-97							
Tcam	-	12,18	-0,22	1,28	-0,69	1,83	1,36	0,24	1,29
Dérivée 2 nd e moyenne	-	-9,58	-	-4,49	-	-1,25	-3,89	-27,45	-4,44
Consommation totale		1962-97							
Tcam	3,24	2,75	2,00	1,81	1,81	1,81	1,38	0,81	0,81
Dérivée 2 nd e moyenne	-2,10	-3,52	2,64	1,85	1,85	1,85	-0,35	-5,20	-5,20

Note : tcam = taux de croissance annuel moyen ; scénario AIE BAU = Business As Usual.

La dérivée seconde moyenne traduit la dynamique implicite à une évolution dont ne peut pas rendre compte un taux de croissance annuel moyen. Dans le cas de la consommation totale, cette valeur indique que, depuis 1950 (-2,10%) et surtout depuis 1962 (-3,52%), date de la dernière variation maximale, la trajectoire suit bien entendu une phase de croissance mais, phénomène plus diffus, à un rythme sans cesse décroissant. Les taux de croissance annuels moyens ne cessent de diminuer en tendance.

Un profond changement de rythme de la croissance de la consommation (dérivée seconde supérieure à zéro) suppose que le système reçoive une impulsion forte de nature démographique, économique, via

l'intensité énergétique ou une combinaison de plusieurs de ces variables. A l'horizon 2020, il apparaît que les scénarios AIE BAU et IIASA-CME A anticipent un dynamisme vigoureux de la croissance de la consommation contrastant fortement avec la tendance des trente dernières années. Le niveau de consommation du scénario IIASA-CME B suppose que la tendance au ralentissement s'atténue considérablement ; le scénario IIASA-CME C anticipant une accentuation de cette même tendance.

Notre revue des scénarios d'évolution des différentes formes d'énergie est limitée aux seules énergies dominantes, charbon, pétrole, gaz et nucléaire en raison de l'absence de projections détaillées concernant les énergies renouvelables.

Charbon (cf. figures 46 et 47)

Le scénario IIASA-CME C, de par son volontarisme à projeter une réduction des émissions de CO₂, est le seul à anticiper la stagnation de la consommation de charbon, dans un contexte sans précédent de ralentissement de la croissance de la consommation totale. Ce cas de figure équivaut à une perte de part de marché qui reste cependant cohérente avec la tendance historique. Ce constat s'applique également au scénario IIASA-CME A3 dans lequel le rythme de progression de la consommation de charbon est simultanément très supérieur à la tendance passée et toutefois insuffisant pour maintenir la part de marché, au vu de la croissance de la consommation totale.

Les scénarios AIE BAU, IIASA-CME A1, A2 et B anticipent une dynamique de la consommation de charbon sans commune mesure avec ce que l'on constate sur l'après guerre. Les niveaux de consommation totale correspondants, certes élevés, n'expliquent que partiellement un tel revirement : la part de marché connaît, dans tous les cas, une impulsion d'une intensité jusqu'alors inconnue. Cette dynamique de gain de part de marché trouve également son origine dans le recul de la contribution de la filière nucléaire, en termes relatifs ou absolus selon le cas.

Pétrole (cf. figures 48 et 49)

Les scénarios AIE d'une part, IIASA-CME d'autre part s'opposent quant à l'évolution de la consommation pétrolière. Le scénario AIE BAU anticipe un retournement de la tendance historique, dans un contexte de forte dynamique de la croissance de la consommation totale. Au contraire, les trajectoires de consommation pétrolière des scénarios IIASA-CME, quel que soit le contexte de référence, se situent dans la continuité de la trajectoire historique, c'est à dire qu'ils en respectent la courbure. L'éventail des cas de figures demeure assez large, allant du recul de la consommation (par rapport au niveau actuel) du scénario C à la croissance assez dynamique, quoique toujours ralentie, des scénarios A1 et A2.

Le fait marquant commun à tous les scénarios réside dans le déclin de la part de marché du pétrole, sous l'emprise d'une dynamique prononcée. Même le scénario AIE, le plus favorable en niveau et dynamique de consommation, n'aboutit qu'à une stagnation de la part de marché, dans un contexte général, il est vrai, très dynamique.

Gaz (cf. figures 50 et 51)

Le gaz semble promis à un avenir particulièrement porteur. Selon les scénarios AIE BAU, IIASA-CME A1, A2 et A3, la consommation devrait connaître un retournement à la hausse de la dynamique historique de croissance. Les scénarios les plus défavorables à la progression de la consommation, IIASA-CME B, C1 et C2, se situent sur des sentiers qui n'apparaissent pas irréalistes sous les hypothèses de faiblesse du charbon et/ou du nucléaire.

De telles perspectives de consommation équivalent à des dynamiques de progression de la part de marché parfois vertigineuses, sans ignorer le contexte général (scénarios A3, C1 et C2). Les scénarios

IIASA-CME A1, B et AIE BAU semblent moins extrémistes. Notons enfin le cas du scénario A2 dont le ralentissement prononcé, quoique cohérent avec la tendance historique, de la progression de la part de marché du gaz a pour corollaire le regain de dynamisme sans précédent de celle du charbon. Ces deux trajectoires sont le pendant l'une de l'autre mais n'apparaissent pas comme les plus vraisemblables.

Nucléaire (cf. figures 52 et 53)

La question de l'avenir du nucléaire voit une opposition entre les scénarios anticipant une consommation en déclin (AIE BAU et IIASA-CME A2) à l'horizon 2020 ou vouée à l'être très rapidement (IIASA-CME C1) et les scénarios accordant un relatif regain de dynamisme, d'intensité variable, sans toutefois contredire la forte tendance au ralentissement.

A l'exception du scénario C2, dont la faible dynamique générale permet au nucléaire de maintenir sa part de marché, sans toutefois sortir de la tendance au ralentissement, les autres scénarios sont unanimes à anticiper une dynamique de déclin du nucléaire, quel que soit le contexte énergétique global.

3.3 Le possible et le vraisemblable

Nous insistons sur le fait que notre mise en perspective des travaux de projection ne saurait constituer une méthode de nature à se substituer aux modèles mêmes. Il nous paraîtrait aussi incorrect et arbitraire d'extrapoler telle trajectoire (de plan de phase), fut-elle révélatrice d'une dynamique profonde et souvent mal perçue, que la courbe d'un phénomène qui, lorsque le temps est porté en abscisse, semble ne pas avoir de limite, faisant par-là même du temps une variable faussement explicative. Nos représentations graphiques montrent par ailleurs que des renversements de tendance ont déjà eu lieu par le passé.

Nous devons toutefois revenir sur le point commun aux trajectoires de consommation d'énergie, totale et primaires : aucune ne présente une dynamique positive, que le phénomène soit en croissance ou d'ores et déjà en déclin (part de marché du charbon). Evolutions de consommation et de part de marché sont clairement orientées vers une zone d'inertie, semblant traduire l'apparition de "noyaux durs" de consommation propres à chaque forme d'énergie. **Sans nier l'intérêt de proposer des scénarios contrastés de nature à couvrir un large éventail de possibilités afin d'en évaluer les enjeux et risques potentiels associés, notre approche nous amène à émettre des réserves quant aux arguments visant à justifier le niveau de consommation mondiale anticipée de certains scénarios et, par voie de conséquence, certaines évolutions concernant les énergies majeures.** La portée des scénarios varie selon le degré de vraisemblance, présenté comme tel, qui leur est attribué.

Ainsi, une consommation mondiale d'énergie supérieure à 14 Gtep en 2020 ne saurait être atteinte que sous l'effet d'une impulsion dont la nature, ni même l'existence ne sont précisées dans aucun scénario. En outre, quelle que soit cette impulsion, celle-ci aurait déjà dû se manifester ou devrait tout au moins apparaître dans le très court terme, eu égard à la proximité de la date de référence (2020) et à la dynamique implicite nécessaire. Notre revue des hypothèses économiques, démographiques et d'intensité énergétique à l'origine de ces projections nous amène à nous placer intuitivement dans le cas d'une croissance future modérée dont la dynamique à cet horizon pourrait être, certes, supérieure à celle que nous observons sur la période de l'après guerre, mais qui ne saurait atteindre l'intensité prévue par les scénarios AIE "Business As Usual" et IIASA-CME A.

Les évolutions anticipées des énergies primaires majeures sont, en premier lieu, étroitement dépendantes du contexte énergétique global. Le second élément décisif des scénarios réside dans

l'avenir de la filière nucléaire qui conditionnera les dynamiques de consommation de charbon et de gaz. L'abandon du nucléaire équivaldrait, dans cette optique, à une réelle impulsion de nature à modifier durablement les trajectoires de consommation des autres énergies primaires majeures, mais revient à faire fi des problèmes de CO₂.

4. Conclusions relatives aux possibilités d'amélioration des prévisions énergétiques.

Des travaux que nous venons de présenter découlent deux ensembles de conclusions, qui, sans restreindre l'indispensable liberté des auteurs, ne pourraient, semble-t-il, que permettre une meilleure compréhension des résultats :

4.1 À l'évidence, et au risque d'être accusé d'enfoncer une porte ouverte, améliorer la qualité des statistiques utilisées.

Les différences de sources et de conventions statistiques plaident pour **une normalisation claire et largement diffusée**, nécessaire à ce que le débat sur les questions de fond ne s'en trouve pas altéré et que les travaux de projection gagnent en lisibilité.

De notre double examen à court et long terme, on retiendra que le caractère cyclique (4 à 6 ans) relativement régulier de la demande énergétique implique que les prévisions à court terme n'ignorent pas ce phénomène, donc s'attachent à déterminer si celui-ci présente un caractère pérenne. Si quelque nouveau paradigme de la croissance économique devait entraîner sa disparition, être alors certain, à travers la **connaissance de la précision des observations**, de la persistance ou de la disparition de fluctuations, surtout si on cherche à étendre ce genre d'analyse aux énergies non dominantes.

4.2 Si l'on en vient aux travaux de projection eux-mêmes, on ne peut que constater que les difficultés de leur interprétation sont parfois liées à d'élémentaires considérations : le " passé " utilisé n'est pas toujours très clairement précisé, pas plus que l'instant zéro du travail (ce qui peut faire beaucoup selon la position dans le cycle). De cette situation **les organismes demandeurs, cette demande s'adressant autant à eux-mêmes qu'à des auteurs extérieurs, portent une part de responsabilité, en ignorant la notion de cahier des charges** : par exemple, pourrait-on imaginer qu'à l'occasion de tel ou tel congrès, les appels à communication définissent les statistiques à utiliser, l'instant zéro, et aillent même jusqu'à normaliser la présentation des résultats. Dans un tel schéma, la liberté conceptuelle des auteurs est strictement observée, mais les difficiles lectures auxquelles nous avons dû nous livrer (pour ce qui concerne les travaux présentés ici) seraient simplifiées.

4.3 S'agissant des modèles eux-mêmes, on ne peut que souligner :

- **l'inadéquation d'un paramétrage à taux constant** (ce qui est **toujours** contraire à ce que nous montre le passé) : à court et moyen terme (10 ans), les fluctuations sont assez importantes pour masquer les tendances, au delà, les courbures jouent leur rôle. Dans tous les cas, les approches habituelles sont essentiellement erronées.
- **l'importance du facteur démographie**, qui ne semble plus pouvoir être retenu seulement à travers un P.I.B par habitant, ou une consommation par habitant, et qui n'est pas vraiment considéré par la lettre " L " des modèles type KLEM (Capital, Travail, Energie, Matières Premières).

Annexe 1 : le lissage des séries

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 :

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

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 $\lambda = +\infty$, on obtient un trend linéaire. Hodrick et Prescott suggèrent de fixer la valeur du paramètre λ à 100 pour une série annuelle. Nous avons appliqué le filtre Hodrick-Prescott à chacune des séries : population, PIB converti aux parités de pouvoir d'achat, revenu par tête, consommation totale d'énergie, consommation d'énergie par tête, intensité énergétique du PIB.

Annexe 2 : représentation en phase

Une fonction y d'une variable étant supposée dérivable (y'), on peut la représenter dans un plan de coordonnées y, y' : c'est l'espace des phases de la mécanique statistique quantité de mouvement – vitesse. L'intérêt d'une telle représentation est de mettre en évidence la dynamique des phénomènes. En effet :

- le plan y, y' est orienté par le fait que la fonction croît si sa dérivée est positive
- le contact avec l'axe des abscisses (y étant supposé en abscisse) se fait normalement à l'axe mais
 - . avec rebond si $y'' > 0$
 - . avec traversée si $y'' < 0$
 - . avec stagnation si y'' est proche de 0 (point d'attraction)

Les propriétés de la représentation en phase s'étendent aux séries (chroniques) mais après filtrage permettant de calculer des différences de premier et deuxième ordre. Dans l'application donnée ici, le filtre Hodrick-Prescott a été appliqué de façon à faire disparaître toutes les fluctuations de court / moyen terme (< 10 ans) mais on pourrait utiliser un filtre respectant ces fluctuations (cf. "Vous avez dit chocs pétroliers ?", Paul Alba, Revue de l'Énergie).

Annexe 3 : sources des données

Période	Sources
1971-97	- Bilans et statistiques de l'énergie des pays non-membres, 1996-97, AIE, 1999 (Sources originales des données population et PIB : Banque Mondiale, CEPIL).
1950-70	- World Energy Supplies, ONU, 1976. - Etamad & Luciani, "La production mondiale d'énergie, 1800-1985", CNRS & CHEI, 1991. - Angus Maddison, "L'économie mondiale 1820-1992", OCDE, 1995.

L'édition 1999 de la publication de l'AIE "Bilans et statistiques de l'énergie des pays non membres" propose un travail original de données statistiques et d'estimations de consommation de biomasse et déchets sur la période 1971-97. La consommation mondiale de biomasse a été estimée par interpolation linéaire entre 1950 et 1970 sur la base d'une consommation de 495 Mtep en 1950 proposée par Jean-Marie Martin.

Bibliographie

ALBA P. (1999), Remarques sur les prévisions énergétiques, document interne IFP.

ALBA P. (1996), Propos impertinents sur l'énergie, *Revue de l'énergie*, novembre.

BIROL F., OKUGU B. (1997), Purchasing Power Parity (PPP) approach to energy efficiency measurement : implications for energy and environmental policies, *Energy*, Vol. 22, n° 1, pp. 7-16.

GOLDEMBERG J. (1996), A note on the energy intensity of developing countries, *Energy Policy*, Vol. 24, n° 8, pp. 759-761.

KOUSNETZOFF N. (1995), Comparaison de l'efficacité énergétique des pays d'Europe centrale et orientale avec celle des pays de l'OCDE, Centre d'Études Prospectives et d'Informations Internationales (CEPII), document de travail n° 95-03.

MADDISON A. (1995), L'économie mondiale 1820-1992, analyse et statistiques, Centre de Développement OCDE.

MARCHETTI C., NAKICENOVIC N., PETERKA V., FLECK F., (1978), The dynamics of energy systems and the logistic substitution model, IIASA.

MARTIN J-M. (1988), L'intensité énergétique de l'activité économique dans les pays industrialisés: les évolutions de très longue période livrent-elles des enseignements utiles ?, *Revue de l'ISMEA*, n° 4, pp. 9-27.

MARTIN J-M., CHATEAU B., CRIQUI P., LAPILLONNE B. (1984), La diminution de la consommation d'énergie en France : réaction conjoncturelle ou inflexion de tendance sur longue période?, *Revue de l'Énergie*, n° 363, pp. 181-191.

NILSSON L. (1993), Energy intensity trends in 31 industrial and developing countries 1950-1988, *Energy*, Vol. 18, n° 4, pp. 309-322.

Liste des tableaux

- Tableau 1 : Population
- Tableau 2 : Produit Mondial Brut
- Tableau 3 : Revenu par tête
- Tableau 4 : Consommation totale d'énergie (y compris biomasse non commerciale)
- Tableau 5 : Consommation d'énergie par tête
- Tableau 6 : Intensité énergétique du PIB PPA
- Tableau 7 : caractéristiques de la dynamique démographique entre 1970 et 1997 (série lissée)
- Tableau 8 : évaluation des hypothèses de croissance démographique
- Tableau 9 : caractéristiques de la dynamique de la croissance économique entre 1967 et 1997 (série lissée)
- Tableau 10 : caractéristiques de la dynamique de la croissance économique entre 1951 et 1997 (série lissée)
- Tableau 11 : évaluation des hypothèses de croissance économique
- Tableau 12 : caractéristiques de la dynamique de revenu par tête entre 1966 et 1997 (série lissée)
- Tableau 13 : caractéristiques de la dynamique de revenu par tête entre 1951 et 1997 (série lissée)
- Tableau 14 : évaluation des hypothèses implicites de revenu par tête
- Tableau 15 : caractéristiques de la dynamique de la consommation d'énergie entre 1962 et 1996 (série lissée)
- Tableau 16 : caractéristiques de la dynamique de la consommation d'énergie entre 1951 et 1996 (série lissée)
- Tableau 17 : évaluation des projections de consommation d'énergie
- Tableau 18 : niveaux et taux de croissance de la consommation mondiale d'énergie des scénarios AIE et IIASA-CME 2020
- Tableau 19 : les énergies primaires dans les scénarios AIE et IIASA-CME 2020
- Tableau 20 : dynamiques sous-jacentes aux scénarios AIE et IIASA-CME 2020

Liste des figures

- Figure 1 : Population - Chronique série brute
- Figure 2 : PIB PPA - Chronique série brute
- Figure 3 : Consommation d'énergie - Chronique série brute
- Figure 4 : Variations relatives brutes - Population
- Figure 5 : Variations relatives brutes - PIB PPA
- Figure 6 : Variations relatives brutes - Consommation d'énergie
- Figure 7 : Revenu par tête - Chronique série brute
- Figure 8 : Consommation d'énergie par tête - Chronique série brute
- Figure 9 : Intensité énergétique du PIB PPA - Chronique série brute
- Figure 10 : Variations relatives brutes - Revenu par tête
- Figure 11 : Variations relatives brutes - Consommation d'énergie par tête
- Figure 12 : Variations relatives brutes - Intensité énergétique du PIB PPA
- Figure 13 : Population - Plan de phase série lissée
- Figure 14 : PIB PPA - Plan de phase série lissée
- Figure 15 : Consommation d'énergie - Plan de phase série lissée
- Figure 16 : Revenu par tête - Plan de phase série lissée
- Figure 17 : Consommation d'énergie par tête - Plan de phase série lissée
- Figure 18 : Intensité énergétique du PIB PPA - Plan de phase série lissée
- Figure 19 : Croisement des variations revenu par tête et population - séries lissées
- Figure 20 : Croisement des variations PIB PPA et population - séries lissées
- Figure 21 : Croisement des variations revenu par tête et consommation d'énergie par tête - séries lissées

Liste des figures (suite)

- Figure 22 : Croisement des variations revenu par tête et intensité énergétique du PIB PPA - séries lissées
- Figure 23 : Consommation mondiale d'énergie - Scénarios 2010-2020
- Figure 24 : Consommation mondiale d'énergie - Scénarios 2050-2060
- Figure 25 : Croisement des variations de revenu et consommation d'énergie par tête - Scénarios 2010-2020
- Figure 26 : Croisement des variations de revenu et consommation d'énergie par tête - Scénarios 2050-2060
- Figure 27 : Croisement des parts de marché charbon et pétrole - 1950-97 (séries brutes)
- Figure 28 : Croisement des parts de marché gaz et pétrole - 1950-97 (séries brutes)
- Figure 29 : Variations relatives de la consommation mondiale d'énergie charbon, pétrole, gaz, hydrocarbures et totale (séries brutes)
- Figure 30 : Consommation de charbon - Plan de phase série lissée
- Figure 31 : Part de marché du charbon - Plan de phase série lissée
- Figure 32 : Consommation de pétrole - Plan de phase série lissée
- Figure 33 : Part de marché du pétrole - Plan de phase série lissée
- Figure 34 : Consommation de gaz - Plan de phase série lissée
- Figure 35 : Part de marché du gaz - Plan de phase série lissée
- Figure 36 : Consommation d'énergie nucléaire - Plan de phase série lissée
- Figure 37 : Part de marché du nucléaire - Plan de phase série lissée
- Figure 38 : Consommation d'énergie hydraulique - Plan de phase série lissée
- Figure 39 : Part de marché de l'hydraulique - Plan de phase série lissée
- Figure 40 : Consommation d'énergie géothermique - Plan de phase série lissée
- Figure 41 : Part de marché du géothermique - Plan de phase série lissée
- Figure 42 : Consommation d'énergie solaire et éolienne - Plan de phase série lissée
- Figure 43 : Part de marché du solaire et de l'éolien - Plan de phase série lissée
- Figure 44 : Consommation d'énergie tirée de la biomasse - Plan de phase série lissée
- Figure 45 : Part de marché de la biomasse - Plan de phase série lissée
- Figure 46 : Scénarios - Consommation charbon
- Figure 47 : Scénarios - Part de marché charbon
- Figure 48 : Scénarios - Consommation pétrole
- Figure 49 : Scénarios - Part de marché pétrole
- Figure 50 : Scénarios - Consommation gaz
- Figure 51 : Scénarios - Part de marché gaz
- Figure 52 : Scénarios - Consommation énergie nucléaire
- Figure 53 : Scénarios - Part de marché nucléaire

Déjà parus

CEG-1. D. PERRUCHET, J.-P. CUEILLE,

Compagnies pétrolières internationales : intégration verticale et niveau de risque.
Novembre 1990

CEG-2. C. BARRET, P. CHOLLET,

Canadian gas exports: modeling a market in disequilibrium.
Juin 1990

CEG-3. J.-P. FAVENNEC, V. PREVOT,

Raffinage et environnement.
Janvier 1991

CEG-4. D. BABUSIAUX,

Note sur le choix des investissements en présence de rationnement du capital.
Janvier 1990

CEG-5. J.-L. KARNIK,

Les résultats financiers des sociétés de raffinage distribution en France 1978-89.
Mars 1991

CEG-6. I. CADORET, P. RENOUE,

Élasticités et substitutions énergétiques : difficultés méthodologiques.
Avril 1991

CEG-7. I. CADORET, J.-L. KARNIK,

Modélisation de la demande de gaz naturel dans le secteur domestique : France, Italie, Royaume-Uni 1978-1989.
Juillet 1991

CEG-8. J.-M. BREUIL,

Émissions de SO₂ dans l'industrie française : une approche technico-économique.
Septembre 1991

CEG-9. A. FAUVEAU, P. CHOLLET, F. LANTZ,

Changements structurels dans un modèle économétrique de demande de carburant.
Octobre 1991

CEG-10. P. RENOUE,

Modélisation des substitutions énergétiques dans les pays de l'OCDE.
Décembre 1991

CEG-11. E. DELAFOSSE,

Marchés gaziers du Sud-Est asiatique : évolutions et enseignements.
Juin 1992

CEG-12. F. LANTZ, C. IOANNIDIS,

Analysis of the French gasoline market since the deregulation of prices.
Juillet 1992

CEG-13. K. FAID,

Analysis of the American oil futures market.
Décembre 1992

CEG-14. S. NACHET,

La réglementation internationale pour la prévention et l'indemnisation des pollutions maritimes par les hydrocarbures.
Mars 1993

CEG-15. J.-L. KARNIK, R. BAKER, D. PERRUCHET,

Les compagnies pétrolières : 1973-1993, vingt ans après.
Juillet 1993

CEG-16. N. ALBA-SAUNAL,

Environnement et élasticités de substitution dans l'industrie ; méthodes et interrogations pour l'avenir.
Septembre 1993

CEG-17. E. DELAFOSSE,

Pays en développement et enjeux gaziers : prendre en compte les contraintes d'accès aux ressources locales.
Octobre 1993

CEG-18. J.P. FAVENNEC, D. BABUSIAUX*,

L'industrie du raffinage dans le Golfe arabe, en Asie et en Europe : comparaison et interdépendance.
Octobre 1993

CEG-19. S. FURLAN,

L'apport de la théorie économique à la définition d'externalité.
Juin 1994

CEG-20. M. CADREN,

Analyse économétrique de l'intégration européenne des produits pétroliers : le marché du diesel en Allemagne et en France.
Novembre 1994

CEG-21. J.L. KARNIK, J. MASSERON*,

L'impact du progrès technique sur l'industrie du pétrole.
Janvier 1995

CEG-22. J.P. FAVENNEC, D. BABUSIAUX,

L'avenir de l'industrie du raffinage.
Janvier 1995

CEG- 23. D. BABUSIAUX, S. YAFIL*,

Relations entre taux de rentabilité interne et taux de rendement comptable.
Mai 1995

CEG-24. D. BABUSIAUX, J. JAYLET*,

Calculs de rentabilité et mode de financement des investissements, vers une nouvelle méthode ?
Juin 1996

CEG-25. J.P. CUEILLE, J. MASSERON*,

Coûts de production des énergies fossiles : situation actuelle et perspectives.
Juillet 1996

CEG-26. J.P. CUEILLE, E. JOURDAIN,

Réductions des externalités : impacts du progrès technique et de l'amélioration de l'efficacité énergétique.
Janvier 1997

CEG-27. J.P. CUEILLE, E. DOS SANTOS,

Approche évolutionniste de la compétitivité des activités amont de la filière pétrolière dans une perspective de long terme.
Février 1997

CEG-28. C. BAUDOUIN, J.P. FAVENNEC,

Marges et perspectives du raffinage.
Avril 1997

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

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

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

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

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

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

CEG-35. D. RILEY
The Euro
Février 2000

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

* une version anglaise de cet article est disponible sur demande