



HAL
open science

Bilans énergétiques mondiaux en l'an 2000

Charles Canetti, Richard Lalande

► **To cite this version:**

Charles Canetti, Richard Lalande. Bilans énergétiques mondiaux en l'an 2000. Sciences de l'ingénieur [physics]. 1973. hal-01909996

HAL Id: hal-01909996

<https://minesparis-psl.hal.science/hal-01909996>

Submitted on 31 Oct 2018

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.

ECOLE DES MINES DE PARIS

Consultation
sur place

**BILANS ENERGETIQUES MONDIAUX
EN L'AN 2000**

DOSSIER LONG 1972 - 1973

INGENIEURS-ELEVES PROMO X 1967



**C. CANETTI
R. LALANDE**

JUIN 1973

ERRATUM

- p II 1 alinéa 3

Lire " la note II comprend 4 annexes (...)

(IV) : Estimation des rendements"

- p II 7 ligne 7

Lire " DTFE, DTED Estimation des tableaux de transformations (pour 1985 et 2000)"

- p II 7 schéma

A l'époque 2, on passe de F à E par DTFE (au lieu de TPE + DTFE) et de E à D par DTED (au lieu de TED + DTED)

- p II 8 schéma

A l'époque 2, on passe de E à D par DTED (au lieu de TED + DTED)

- p II 8 & V.3

Ajouter à la fin

" Le programme calcule également les consommations cumulées de 1970 à 1985 et de 1970 à 2000 par zone et source d'énergie. Il donne enfin une estimation des coûts d'investissements nécessaires de 1970 à 1985 et de 1985 à 2000, par zone et par énergie, à partir des coûts d'investissements unitaires qui sont introduits comme données. Les sommations sont effectuées pour obtenir des résultats mondiaux."

- p II 10 & II

Lire :

" Groupe I : des cartes précisant les titres des divers tableaux du programme et les coûts unitaires d'investissement".

- p II 10 3e ligne avant la fin

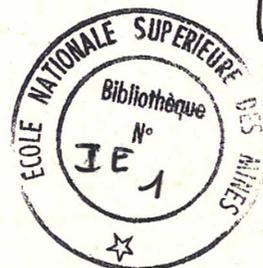
Lire :

...les 9 cartes du groupe I... "

- p II 12

- Ajouter au tableau

N°	Mo	M Description	Format
8	COU	I Coûts d'investissements Unitaires par énergie Secondaire entre 1970 et 1985	4 F 6.1
9	COU	I id. entre 1985 et 2000	4 F 6.1



• p II 15 & 1

Ajouter :

" Précisons que ce que les statistiques de l'ONU donnent sous le titre " Consommation" dans le tableau 1 recouvre deux notions différentes :

- pour les combustibles solides, le gaz naturel et importé et l'électricité hydraulique nucléaire et importée, il s'agit de la production corrigée des importations exportations et variations de stocks, donc de ce que nous avons appelé "consommation d'énergie primaire "

- pour les combustibles liquides, il s'agit par contre d'une agrégation des productions des produits raffinés, ne tenant pas compte par exemple des utilisations du pétrole brut comme matière première. C'est donc à peu près ce que nous avons appelé " Consommation secondaire ", qui est beaucoup mieux défini par l'OSCE.

Pour obtenir les autres composantes de la consommation secondaire, nous avons dû chercher dans les tableaux suivants :

- combustibles solides	: tableau 3
- combustibles gazeux	: tableau 17
- électricité	: tableau 20

Pour l'électricité et le gaz naturel, nous avons corrigé les coefficients de conversion utilisés par l'ONU, en nous ramenant à l'unité spécifique, puis en appliquant nos propres coefficients de conversion (cf p II- 21).

Enfin, la consommation primaire de pétrole brut a été tirée du tableau 2".

• p II 15 Note (1) en bas de page

Lire :

" "Energy and the Economic World", chez the JOHNS HOPKINS PRESS, qui..."

• p II 21

Ajouter :

" 1 kg charbon = 7000 kcal

Pour une étude détaillée de l'influence du choix des différents coefficients de conversion, voir J. DARMSTADTER, Op. Cit., Part 4 pp 816 sqq "

• p II 23 Nota

Lire

" Comme dit dans la remarque 2 p II 17, ... "

• p II 23 Tableau

Colonne 4, lire : " D3/D1 3 (au lieu de " D1/D2 ").

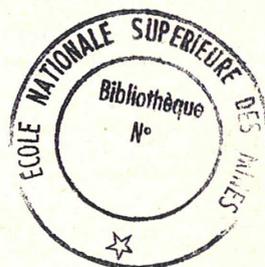
Ce travail a été effectué dans le cadre de la 3e année de l'Ecole des Mines de Paris, sous la direction de M. J.L. BEFFA de la Direction des Carburants.

Ce rapport se compose de trois notes :

- 1 - Une note intitulée "Energie et Croissance", présentant le problème de l'énergie dans les années à venir, rédigée pour nos camarades des Mines.
- 2 - Une note technique, intitulée "Un modèle de croissance des besoins en énergie de 1970 à 2000", qui explique le fonctionnement du modèle que nous avons mis au point et les hypothèses sous-jacentes.
- 3 - Une note de synthèse présentant les principales conclusions que nous avons tirées du modèle, les hypothèses de base retenues, les difficultés que nous avons rencontrées ainsi que les questions auxquelles nous n'avons pas pu répondre.

Les lecteurs voudront bien excuser la rédaction des notes 2 et 3 ; elles reprennent un certain nombre de fiches techniques écrites au fur et à mesure de l'avancement de l'étude, que nous n'avons pas eu le temps de réécrire.

Que toutes les personnes qui nous ont aidés soient ici remerciées, et particulièrement M. P. KELLER, de la Direction des Carburants.



Note n° 1

ENERGIE ET CROISSANCE

C. CANETTI
R. LALANDE

Juin 1973

ENERGIE ET CROISSANCE

I - Analyse de la demande en énergie

I.1 Consommation globale et sources d'énergie

I.2 Consommation d'énergie et niveau de vie

I.3 Extrapolations

I.4 De nouvelles formes d'énergie

I.5 Un modèle de croissance

II- Les réserves énergétiques mondiales

III- L'approvisionnement à long terme de l'énergie : un problème économique et politique

Croissance économique et augmentation de la consommation d'énergie ont toujours suivi des évolutions parallèles, depuis "la guerre du feu" jusqu'à la société que nous connaissons. L'énergie est à la base de notre mode de vie. Qu'un risque de pénurie passagère d'essence survienne, la panique s'empare de millions de personnes. Il est impossible de s'imaginer nos pays occidentaux coupés de leurs approvisionnements ; ce serait la paralysie totale. Nombreux sont ceux qui parlent en ce moment de crise de l'énergie, lui donnant pour bien faire une dimension mondiale. Les signes avant coureur de catastrophe ne manquent pas à leurs yeux :

- les plus gros consommateurs d'énergie du monde, les Etats-Unis, se débattent au milieu de nombreux problèmes tels que l'épuisement de leurs ressources en hydrocarbures économiquement exploitables ou la difficulté de réaliser de nouveaux investissements **non** polluants ;
- après que se soit calmée la crise du charbon, l'Europe commence à s'interroger sur la sécurité de ses approvisionnements pétroliers. Etant presque entièrement dépendante du Moyen-Orient pour son approvisionnement en énergie, elle est obligée de subir les événements et d'accepter la hausse très rapide des prix internationaux ;
- la révolution nucléaire se fait attendre, les perspectives de fusion contrôlée s'éloignent au fil des années, les investissements en recherche pétrolière deviennent écrasants, aux dires des grandes compagnies internationales, qui se prétendent au bord de l'asphyxie.

Le "Rapport sur la croissance", de l'équipe du Professeur MEADOWS, a mis l'accent sur l'épuisement des réserves, et l'effondrement de notre société qui en résulterait à l'aube du XXI^e siècle. Si le mérite de ce rapport est d'adopter une approche globale du problème de la croissance, il nous a semblé bon, pour une étude plus détaillée, de préciser et séparer les "grands problèmes actuels" :

- + l'épuisement des réserves
- + la sécurité des approvisionnements
- + le souci de l'environnement
- + le besoin de nouvelles solutions techniques (nucléaires, nouvelles sources d'énergie)
- + le poids croissant des investissements (recherche production).

Nous avons choisi la démarche suivante : après avoir analysé la demande d'énergie (et taché de voir ce que signifiait la croissance exponentielle), nous regarderons quelles sont les réserves actuelles de produits énergétiques, et les ressources nouvelles : nouvelles formes d'énergie (solaire, géothermique, fusion contrôlée), ou nouveaux usages de formes d'énergie déjà connues.

I - ANALYSE DE LA DEMANDE EN ENERGIE

I - 1. Consommation globale et sources d'énergie

Depuis, plus d'un siècle, la consommation globale d'énergie dans le monde a augmenté à peu près exponentiellement à un taux de plus de 3 %. La tendance à long terme est remarquablement stable, si on ne tient pas compte des cycles économiques qui ont fait stagner la demande de 1929 à 1954 et l'accélérer dans la période d'après guerre. Pour s'en convaincre il suffit de regarder la figure 1, qui représente en coordonnées* logarithmiques l'évolution de la demande énergétique américaine depuis un siècle.

Mais l'importance relative des différentes ressources énergétiques qui ont permis de satisfaire cette demande a beaucoup varié en un siècle. Le bois a été remplacé par le charbon au cours du XIXe siècle, lors de la révolution industrielle. A partir du début du XXe siècle, les hydrocarbures se sont développés rapidement en absorbant tout l'accroissement de la demande. Déjà l'apparition de l'énergie nucléaire laisse présager de nouveaux bouleversements dans cette répartition. L'évolution de la consommation de chaque produit est mieux représentée par une courbe en cloche que par une exponentielle.

I - 2. Consommation d'énergie et niveau de vie

L'énergie est considérée comme un support fondamental de la croissance. De fait, consommation d'énergie et croissance économique ont suivi des évolutions "parallèles". Les figures 2 et 3 illustrent cette relation pour les Etats-Unis. La forte croissance relative du PNB par rapport à la consommation d'énergie dans les années 40 provient du développement rapide du secteur tertiaire. En Europe, l'évolution inverse s'est produite après la fin de la dernière guerre, à la suite de la forte croissance industrielle de nos pays : en 50 ans, le PNB et la consommation d'énergie ont cru respectivement de 3,5 % et 2,1 %, mais si on ne prend que ces vingt dernières années, on trouve 4,6 % et 5,1 %. Une forte corrélation apparaît donc entre le PNB et la consommation d'énergie bien qu'elle doive être tempérée par des considérations sectorielles (cf. figure 4). En fait on commence seulement à expliciter les relations économétriques qui existent entre croissance et consommation d'énergie, en recourant à des consommations sectorielles d'énergie utile. Il faudrait déterminer la valeur ajoutée qu'entraîne chaque forme d'énergie dans les différents secteurs de l'économie.

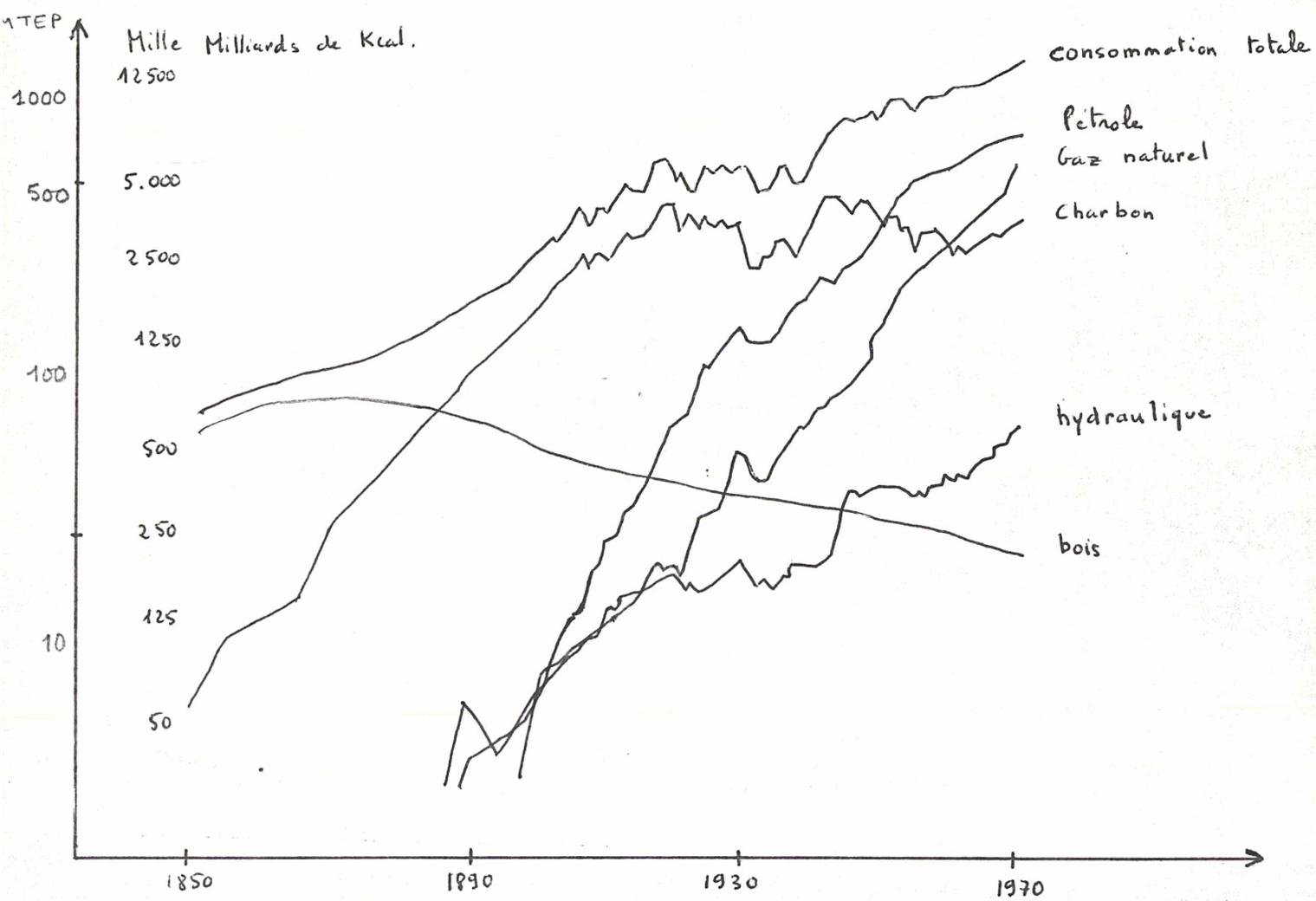


Fig 1 : Evolution de la consommation d'énergie aux USA.

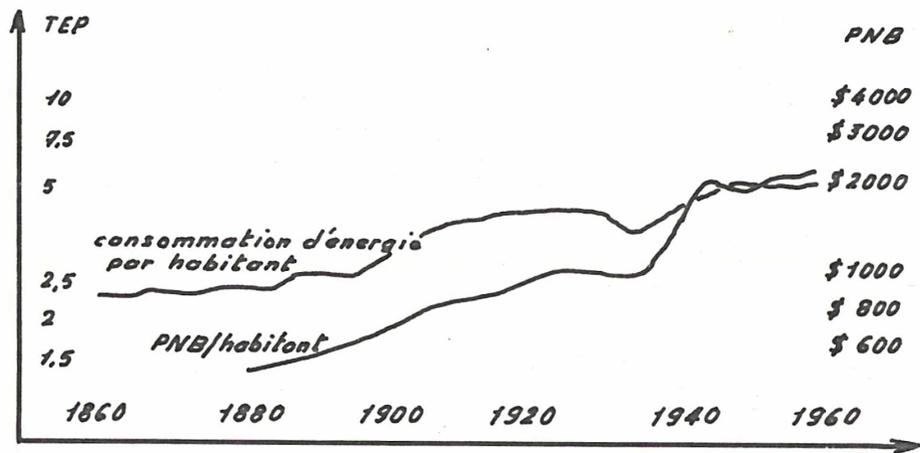


Fig 2

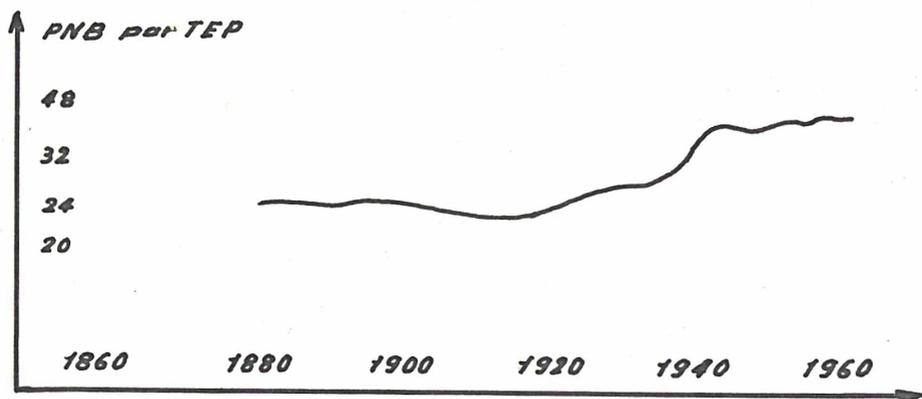
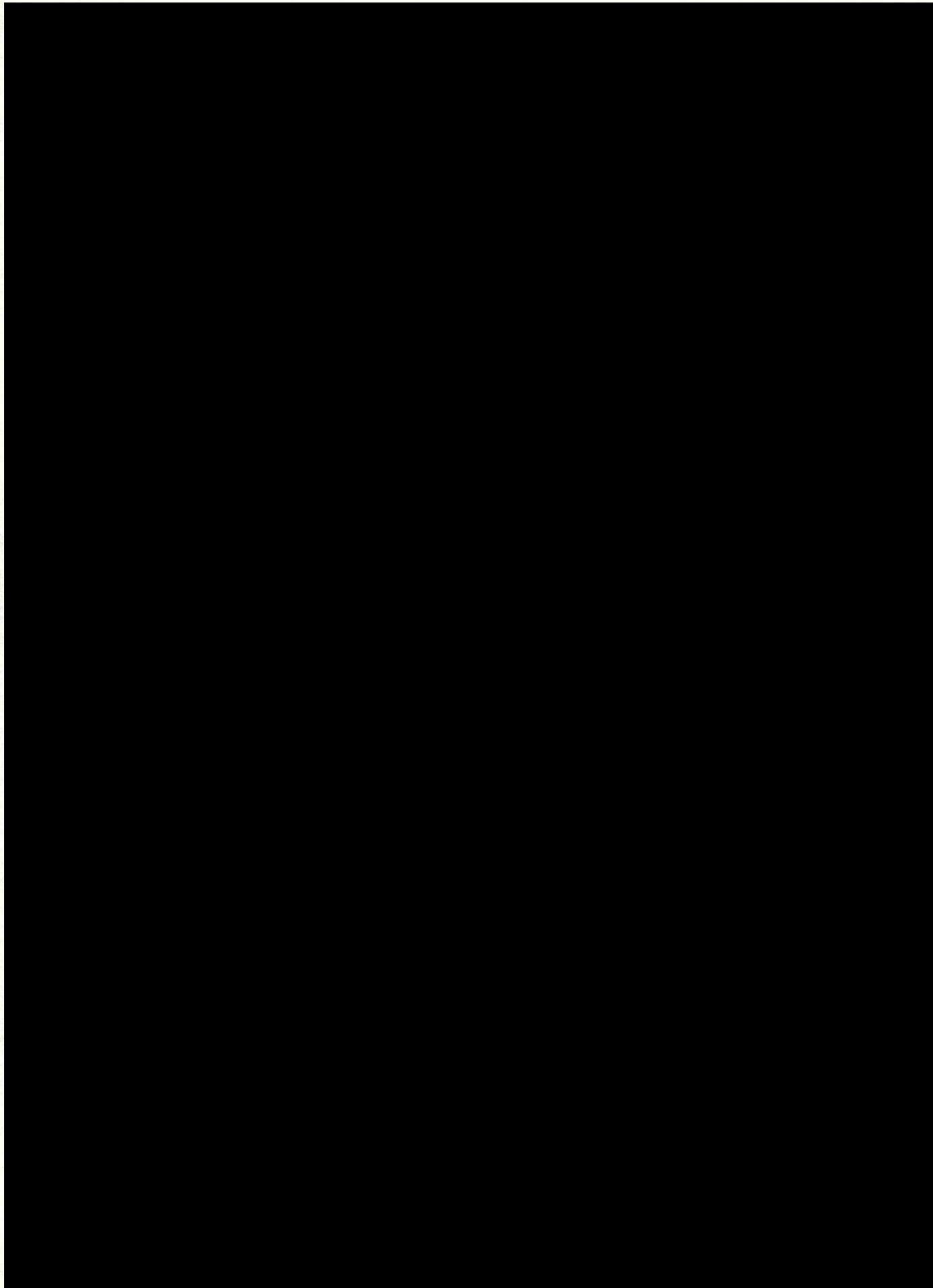


Fig 3

Fig 2 et 3 Relations entre le PNB et la consommation d'énergie aux USA



I - 3. Extrapolations

Ces considérations sur les tendances à long terme de la consommation d'énergie permettent de supposer qu'on peut raisonnablement extrapoler sur quelques décades sans risquer de se tromper sur les ordres de grandeur. Suivant les estimations, la demande mondiale en l'an 2000 sera de l'ordre de 15 ou 20 milliards de Tep (1) (2) (elle est de 5 milliards de Tep à l'heure actuelle).

Si des futurologues avaient cherché à estimer cette demande vers 1920 d'après les données de leur époque, ils auraient trouvé qu'elle aurait été de 10 ou 12 milliards de Tep. Ils auraient donc trouvé un chiffre assez peu éloigné de ceux qui sont avancés à l'heure actuelle, ce qui confirme l'idée, que sauf phénomène brutal et imprévisible, l'ordre de grandeur des besoins en énergie en l'an 2000 n'est pas sujet à caution. Autrement dit, la consommation mondiale atteindra 20 milliards de Tep entre 1995 et 2005.

Les différences entre les estimations actuelles de la demande globale en l'an 2000 proviennent de plusieurs facteurs :

- l'extrapolation pure et simple peut donner des différences notables suivant la période de temps extrapolée, du fait de l'accélération de la croissance de la demande après la dernière guerre ;
- certains auteurs pensent que des phénomènes de saturation vont apparaître dans la consommation d'énergie. Par exemple le chauffage des habitations ne peut pas augmenter indéfiniment, bientôt le "nombre" de voitures sera forcément limité etc...

Il faut remarquer qu'à ce stade de l'analyse le sort des pays en voie de développement importe peu. Ils consomment actuellement environ 25 % de l'énergie mondiale (3), et les diverses projections faites montrent que cette proportion ne sera guère modifiée d'ici à 2000, même si ces pays connaissaient une croissance exceptionnelle.

Les évolutions des besoins futurs en énergie divergent plus sérieusement quant à la répartition des différentes formes d'énergie utilisables. Mis à part les visionnaires qui prédisent l'avènement prochain et foudroyant d'une nouvelle source d'énergie, qu'elle soit solaire, géothermique, éolienne, ou qu'il s'agisse de la fusion contrôlée, deux scénarios raisonnables sont envisageables.

./.

- (1) - 1 Tep = l'équivalent énergétique d'une tonne de pétrole.
- (2) - Nos propres estimations donnent plutôt 20 milliards de Tep, cf infra les bilans énergétiques en 1985 et 2000
- (3) - pour 75 % de la population mondiale.

- la 1ère hypothèse plausible est la suivante :
La part de l'électricité dans la satisfaction des besoins énergétiques reste aux environs de sa valeur actuelle, de 20 à 30 %. L'énergie nucléaire ne se développe que lentement, par suite d'un accident majeur, d'une action décidée des protecteurs de l'environnement, ou d'une rentabilité défec-
tueuse. Alors les hydrocarbures (pétrole et gaz) devront subvenir à plus de 70 % de la demande, nucléaire et charbon se partageant le reste.
- dans la 2e hypothèse, l'électricité continue à avoir un développement plus rapide que l'ensemble des besoins éner-
gétiques. Elle arrive à satisfaire 40 % ou 45 % de la deman-
de globale de l'an 2000.

Le nucléaire supplante définitivement les autres formes d'énergie primaire utilisées pour produire l'électricité. Alors les hydrocarbures ne devront plus satisfaire qu'à peine 60 % de la demande énergétique, le nucléaire en satisfaisant plus de 30 %.

Malgré leurs différences, les deux scénarios concordent sur deux points fondamentaux :

- quelles que soient les hypothèses, les hydrocarbures seront de loin la première ressource énergétique en l'an 2000. En effet la croissance maximale possible du nucléaire est liée à la pénétration de l'électricité, et celle-ci ne peut se faire que lentement à cause des inerties structurales (délais de construction des centrales, difficultés de conversion des matériels à combustion classique).
- les autres sources d'énergie auront une importance négligeable d'ici à 2000.

I - 4. De nouvelles formes d'énergie

Citons d'abord les sources nouvelles d'énergie, telles que l'énergie solaire, géothermique ou éolienne :

- la meilleure façon que l'on ait trouvé jusqu'ici de récupérer l'énergie solaire est la fonction chlorophyllienne des plantes ; on voit mal nos pays couverts de panneaux solaires ;
- l'énergie géothermique ne serait exploitable à grande échelle qu'à condition de récupérer le flux de chaleur émis par la terre sur de grandes surfaces ; certains proposent de créer de grandes chaudières souterraines à l'aide d'explosions nucléaires ; même si des expériences étaient commen-
cées prochainement, il faudrait des années pour mettre au point les techniques ;

- l'énergie éolienne est trop soumise au régime des vents pour être intéressante à l'heure actuelle, et aucun matériel n'est au point à grande échelle.

On fonde de grands espoirs sur la fusion contrôlée. Mais elle ne sera sans doute pas disponible sur le plan industriel avant le XXI^e siècle. Les recherches en laboratoires sont encore loin d'avoir abouti, et il ne faut pas oublier qu'il faudra dix, voire vingt ans pour la mise au point du procédé industriel.

L'énergie hydroélectrique n'est pas non plus une panacée. Certes les ressources existantes sont théoriquement importantes (10 fois ce que nous utilisons déjà), mais déjà en 1970, l'hydraulique ne fournissait que 5 % de l'énergie consommée.

De la même manière on voit mal comment se développerait un nombre important d'usines marémotrices.

Le charbon voit son développement actuel freiné pour plusieurs raisons : épuisement des mines traditionnelles, coût de transport, pollution due à la poussière et aux fumées. Mais il n'est pas exclu qu'il serve à satisfaire partiellement la demande en hydrocarbures à l'aide des techniques actuellement à l'étude aux Etats-Unis de liquéfaction et de gazéification.

Les conclusions qu'on peut tirer de ces extrapolations sont simples : en l'an 2000 le monde consommera de trois à quatre fois plus d'énergie qu'à l'heure actuelle : les hydrocarbures devront fournir beaucoup plus que la moitié de cette énergie, le reste sera fourni en grande partie par l'énergie nucléaire.

I - 5. Un modèle de croissance

Pour avoir une meilleure appréciation des différentes évolutions possibles des besoins, il faut étudier plus en détail les utilisations de l'énergie et leur développement probable. Mais alors l'estimation des besoins énergétiques telle que nous l'avons faite ne suffit plus. En fait, elle pêche par trois côtés :

- elle considère l'énergie comme une fin en soi. Les raisons qui font que croissance globale et croissance énergétique ont suivi des évolutions parallèles ne sont pas étudiées. La relation mise en évidence entre le PNB et la consommation d'énergie est sujette à caution : ce n'est pas parce que deux paramètres évoluent dans le même sens, qu'ils le feront dans l'avenir ;
- il est très difficile de se rendre compte si les hypothèses faites au cours des études prospectives sont cohérentes entre elles, puisque leurs conséquences sont évaluées individuellement, comme si elles étaient indépendantes les unes des autres ;
- enfin, la croissance mondiale ne représente qu'une moyenne entre des situations très différentes de richesse et de croissance ; par elle-même elle n'a aucun sens. Il faut donc étudier la demande en énergie d'une manière désagrégée, et ensuite seulement en faire la somme.

Pour tenter de pallier ces imperfections, nous avons mis au point un programme informatique qui, par son caractère désagrégé et par la neutralité de ses calculs, nous a permis de tester tous les scénarios de développement de l'énergie que nous avons envisagés. On trouvera la description détaillée de ce programme dans la seconde partie du rapport.

Le principe de ce programme est simple. Le monde est découpé en plusieurs zones homogènes. Chaque zone a son développement propre. Les besoins mondiaux en énergie représentent la somme des demandes de chacune de ces zones.

L'activité économique d'une zone est séparée en trois secteurs : industrie, transport, tertiaire. Chacun de ces secteurs consomme de l'énergie sous plusieurs formes, que nous appellerons "énergie secondaire" : charbon, pétrole, gaz, électricité. La somme de ces consommations est donc la demande globale en énergie de l'économie. Il faut fournir cette énergie secondaire à l'aide des ressources primaires d'énergie, à savoir le charbon, le pétrole, le gaz, l'énergie hydroélectrique, l'énergie nucléaire.

La croissance de l'économie augmente les besoins, dont la répartition entre les différentes formes d'énergie secondaire peut varier ; la manière dont cette énergie secondaire est produite à l'aide des ressources primaires peut également varier au cours du temps. Finalement il y a trois stades au niveau des quels une évolution peut se produire :

- la croissance des besoins de l'économie peut varier, et même s'annuler dans le cas du "zéro growth". Etant donné que l'énergie est à l'heure actuelle assez largement dilapidée, il y a deux moyens de faire **varier** la consommation totale : soit agir sur l'économie même, soit restreindre la consommation d'énergie superflue. Dans ce dernier domaine, il est certain que de grands progrès peuvent être faits, ne serait-ce par exemple qu'en isolant thermiquement les habitations ou en favorisant les transports en commun. Dans ces deux cas on peut diminuer la demande totale d'énergie de plusieurs pourcents sans influencer notablement sur la croissance de l'économie ;
- la répartition des besoins de l'économie entre les différentes formes d'énergie secondaire peut également varier. Par exemple l'apparition de la voiture électrique changerait radicalement la répartition des besoins des transports, qui dépendent presque exclusivement du pétrole. La généralisation du chauffage électrique augmenterait également beaucoup la part de l'électricité dans les besoins du secteur tertiaire. Des incitations gouvernementales (ou une politique commerciale agressive) peuvent faire largement évoluer la situation actuelle avant l'an 2000 ;

- enfin, la façon de fournir cette énergie secondaire est sujette à des modifications rapides. Pour l'électricité, toutes les ressources primaires concourent à sa production ; mais le charbon disparaît progressivement en Europe, remplacé par le pétrole, et le nucléaire fait une entrée en force. Le gaz, produit à partir du charbon jusqu'à une époque récente, est maintenant presque exclusivement naturel ; mais déjà aux Etats-Unis l'épuisement des ressources naturelles conduit à le fabriquer à partir de pétrole, et bientôt ... de charbon. Même le pétrole peut être synthétisé à partir du charbon ; les américains y songent d'ailleurs sérieusement. Là encore une politique volontariste peut faire évoluer la situation actuelle, notamment en ce qui concerne la part du nucléaire dans la production d'électricité.

Le programme que nous avons mis au point permet d'introduire toutes ces alternatives dans les schémas de développement d'une manière claire, chiffrée et cohérente.

Il permet ainsi de juger les conséquences que peut avoir une modification de structure, ou d'apprécier les résultats maximaux que l'on peut attendre d'une politique. En testant rapidement un grand nombre d'hypothèses, il est possible de comparer les scénarios les plus différents et de se rendre compte de la stabilité à certains paramètres du schéma de développement de l'énergie.

Au moment de mettre en oeuvre ce programme, on s'aperçoit de la difficulté de chiffrer les différentes hypothèses. Autant les études abondent sur la transformation d'énergie primaire en énergie secondaire, autant il est difficile d'obtenir des données suffisamment détaillées sur les besoins énergétiques de l'économie. On se heurte à l'universalité de la consommation d'énergie : il est impossible de dresser un tableau complet des utilisations des différentes formes d'énergie. Il faut donc les agréger, mais il est alors plus difficile de discerner les effets d'un changement particulier de structure. De toute façon, s'il est encore possible de trouver des données sur l'utilisation de l'énergie dans les pays développés occidentaux, il est très difficile de trouver quoi que ce soit sur les autres pays.

Si l'on regarde les différents scénarios calculés, on s'aperçoit de la remarquable stabilité du secteur énergétique. Il est impossible d'imaginer un scénario plausible qui bouleverse l'ordre de grandeur des problèmes. Il faudrait que notre société elle-même subisse une évolution extraordinaire, ce qui sort de notre étude. Il faut en effet tenir compte de la grande inertie de tout le secteur de l'énergie. Jusqu'en 1985 ou 1990, son évolution est déjà largement déterminée par la technologie actuelle, les délais d'études et de construction, la force des habitudes. Ce n'est qu'à partir de ce moment là que tout devient possible. Mais la période des 10 ou 15 dernières années du siècle pour laquelle il est difficile maintenant de prédire l'évolution du secteur énergétique n'est pas suffisamment longue pour que la demande en l'an 2000 soit bouleversée par rapport aux tendances moyennes actuelles. Le raisonnement est encore plus vrai quand il s'applique à la consommation cumulée entre 1970 et 2000. Nous pouvons donc comparer cette consommation cumulée probable avec les réserves d'énergie primaire connues sans nous préoccuper de la précision avec laquelle elle est connue.

II - LES RESERVES ENERGETIQUES MONDIALES

Si la consommation d'énergie a cru à un rythme exponentiel, il en est de même des réserves prouvées. L'exemple le plus probant est celui des réserves d'hydrocarbures. Les réserves de pétrole prouvées en 1972 étaient de 90 milliards de tonnes. La consommation cumulée était de 36 milliards de tonnes. Les réserves jusque là localisées étaient donc de 116 milliards de tonnes, dont 30 % avaient été déjà pompés. La consommation mondiale de pétrole a été de 2,4 milliards de tonnes en 1971. Les réserves prouvées représentaient ainsi seulement 36 ans de consommation au niveau de 1971, beaucoup moins si on tient compte de la croissance des besoins. Mais il ne faut pas en conclure que la situation est désespérée, car si on ne regarde plus les chiffres de consommation et de découvertes que pour la période 1960 - 1970, on trouve que la consommation cumulée a été de 16,4 milliards de tonnes, soit 27 % des nouvelles découvertes, qui se sont élevées à 60 milliards de tonnes. Le rythme des découvertes est donc quatre fois supérieur à celui de la consommation.

Tout se passe comme si les compagnies pétrolières ajustaient leurs recherches de façon que leurs réserves prouvées représentent 35 ans de production (à consommation constante, ou 15 ans de consommation en croissance exponentielle). La valeur des réserves prouvées n'a donc aucun sens quand on parle de réserves à long terme. Tout ce qu'on peut dire, c'est que si l'on veut avoir 15 ans d'avance il sera nécessaire de trouver d'ici à 1985 100 milliards de tonnes et d'ici à 2000 200 ou 300 milliards de tonnes de pétrole, ce qui fait un rythme d'une dizaine de milliards de tonnes par an, soit chaque année l'équivalent des réserves prouvées de l'Algérie et de la Libye réunies.

Pour trouver ces nouvelles réserves, qui représentent le double du niveau actuel, plusieurs méthodes sont possibles :

- pomper les gisements anciens par des méthodes de récupération secondaire ou tertiaire, ce qui fait déjà doubler leur capacité réelle ;
- réévaluer certains gisements déjà exploités mais mal explorés. C'est ainsi que pour des raisons politiques les réserves officielles de l'Arabie Séoudite ont doublé brusquement en 1969. Il est certain que les possibilités du Moyen Orient sont bien plus élevées que les chiffres officiels ne le laissent supposer et que cette région devrait pouvoir fournir une bonne partie des réserves nécessaires d'ici à 1985 ;
- chercher de nouveaux gisements. D'immenses régions sont encore à explorer. On ne sait pratiquement rien des réserves de Sibérie, du Grand Nord Canadien. L'exploration offshore, qui commence à peine, devrait permettre dans quelques années de doubler la surface sédimentaire ouverte à l'exploitation pétrolière ; les techniques qui permettront d'explorer et d'exploiter des terrains situés à 1 000 mètres de fond sont en cours de mise au point ;

- exploiter les schistes et les sables bitumineux. D'énormes réserves de schistes ou de sables bitumineux existent dans le monde (plusieurs centaines de milliards de Tep). Pour l'instant ils ne sont pas économiquement exploitables. Mais des projets très avancés permettent de prévoir un coût d'exploitation de 4,5 ou 5 dollars par baril de pétrole obtenu sur les gisements des Etats-Unis. Ce coût est supérieur d'environ deux dollars au coût intérieur actuel des Etats-Unis. Autant dire que ces schistes seront économiquement exploitables d'ici quelques années. Leur production industrielle pourrait commencer à grande échelle à partir de 1980.

Quand on fait l'addition de toutes ces possibilités, on s'aperçoit que les risques de pénurie en pétrole par épuisement des ressources terrestres sont pratiquement nuls pour une période de temps dépassant largement l'an 2000. Physiquement, le problème n'existe pas. Mais les nouvelles ressources dont nous avons parlé ne sont exploitables qu'au prix d'un relèvement substantiel des coûts de production.

La généralisation de l'utilisation du gaz naturel est plus récente que celle du pétrole. Aussi les réserves prouvées sont-elles plus importantes par rapport à la consommation : elles sont de 45 000 milliards de mètres cubes pour une production de 1 000 milliards en 1970 et une consommation cumulée de 14 000 milliards de mètres cubes. Si les Etats-Unis connaissent à l'heure actuelle une pénurie de gaz naturel, c'est que la difficulté et le coût de son transport ont été longtemps un obstacle à sa diffusion mondiale. Le fait que du gaz va être produit à l'aide de charbon et de pétrole s'explique ainsi et non par suite de l'épuisement des réserves mondiales, estimées à près de 300 000 milliards de mètres cubes aux coûts actuels.

La situation du charbon est différente de celle des hydrocarbures. Les réserves connues sont gigantesques : elles représentent plusieurs milliers de fois la consommation mondiale annuelle, qui est de 2,5 milliards de tonnes (lignite compris : chiffres de 1970). Les raisons de sa stagnation sont ailleurs : le charbon est un minerai difficile à extraire, exigeant beaucoup de main d'oeuvre, coûteux à transporter, sale, produisant des fumées polluantes. Avant de pouvoir l'utiliser à nouveau à une grande échelle dans les pays développés, il faudra mettre au point des moyens de transports terrestres peu coûteux (pipelines à charbon), des méthodes économiques de gazéification ou de liquéfaction, et trouver un moyen de débarrasser les fumées de leur suie et leur soufre.

Nous avons déjà dit que l'énergie hydraulique ne pouvait prendre beaucoup d'extension en raison de la rareté des sites aménageables. Sa part dans la satisfaction des besoins énergétiques mondiaux ne peut que décroître.

Le nucléaire est une source d'énergie encore trop jeune pour que l'on puisse apprécier l'étendue de ses réserves. Le minerai d'uranium est toujours d'une très faible teneur. Ne sont exploités, ou exploitables aux conditions actuelles, que les minerais les plus riches. Les réserves connues d'oxyde d'uranium disponibles à un prix inférieur à 10 dollars par livre sont assez faibles, de moins de un million de tonnes, ce qui représente 30 ou 40 ans de production au rythme actuel, soit 12 à 13 milliards de Tep ; c'est faible, compte tenu de l'essor rapide de l'énergie nucléaire. Mais, comme pour tous les minerais à faible teneur, un relèvement substantiel de son prix élèverait énormément les réserves exploitables. Comme la part du coût de l'uranium est faible dans le prix de revient de l'électricité nucléaire, un relèvement sensible des prix n'aura pas beaucoup d'incidences. De plus, quand les réacteurs à neutrons rapides seront au point, sans doute dans une quinzaine d'année, il n'y aura plus aucun problème d'approvisionnement. A contrario la mise au point rapide de ces réacteurs semble une nécessité.

Il ressort de cette analyse que le problème des approvisionnements n'est pas un problème physique, mais un problème économique et politique.

III - L'APPROVISIONNEMENT A LONG TERME DE L'ENERGIE : UN PROBLEME ECONOMIQUE ET POLITIQUE

M. Claude DESTIVAL résume la situation ainsi : "Comment mobiliser avec les anticipations nécessaires, les diverses énergies possibles qui s'offrent, en fonction de leur coût ?".

Les réserves énergétiques en effet dépendent finalement du prix qu'on est prêt à payer. A l'heure actuelle il est certain que les coûts des diverses formes d'énergie utilisées sont très bas. Les différentes phases du cycle de l'énergie sont entièrement conditionnées par la recherche du moindre coût, que ce soit au niveau de l'extraction, de la transformation ou de l'utilisation. Il n'est donc pas étonnant que les réserves d'énergie à ce coût minimum soient peu élevées.

Dans les conditions actuelles, personne ne se soucie réellement du niveau de sa consommation d'énergie. Celle-ci entre pour une très faible part dans le coût total des biens manufacturés comme dans les dépenses de logement. L'économie est donc capable d'absorber sans grande gêne des augmentations très élevées du coût de l'énergie. Dès que notre société acceptera de payer le prix de son énergie le problème des réserves sera résolu pour de nombreuses décades. Alors peut-être, se préoccupera-t-elle plus de sa consommation d'énergie, et le phénomène se régulera-t-il de lui-même. Mais nous ne voulons pas dire par là que même si l'économie mondiale croît au rythme actuel indéfiniment, il n'y aura jamais de problème. Nous pensons simplement que l'énergie mondiale est en ce moment à un stade de jeunesse où il y a pléthore de ressources à des coûts proches de zéro. Il ne faut pas oublier que les coûts d'extraction du pétrole au Moyen-Orient sont de quelques francs par tonne, et que son prix de marché provient presque exclusivement des taxes, coûts de transport

et marges bénéficiaires pris par les intermédiaires. Dans quelques années, ces réserves s'épuiseront, et il faudra bien accepter que l'énergie soit un produit noble et cher. Nous en serons alors à l'âge adulte de l'énergie. A ce moment seulement il sera possible de se poser la question des réserves ultimes d'énergie (c'est-à-dire les réserves dont l'exploitation demandera moins d'énergie que celle qui sera récupérée). Maintenant cette opération est plus qu'inutile : elle est absurde. Nous sommes absolument incapables d'évaluer raisonnablement les réserves énergétiques de la terre.

Le seul problème actuel est d'anticiper suffisamment les structures de la société et ses besoins en énergie pour ne plus faire face à des crises conjoncturelles de la nature de celle que subissent actuellement les Etats-Unis. Mais alors le problème est autant politique qu'économique. En effet les structures futures de notre société dépendent de l'action gouvernementale, et en dernier ressort des courants de pensée de l'humanité. Il est évident que ce dernier problème dépasse le cadre de notre étude. Mais plus concrètement l'action gouvernementale doit se préoccuper de la sûreté des approvisionnements. Les sources d'énergie à bon marché sont souvent loin des points de grande consommation. L'Europe dépend presque entièrement du Moyen Orient pour son approvisionnement en pétrole. Cet éloignement des régions productrices et des régions consommatrices n'a que peu de chances de se réduire dans les prochaines années ; nous avons vu en effet que les coûts de l'énergie sont suffisamment bas pour ne plus être, comme il y a quelques décades, un facteur de localisation des industries. L'énergie n'est plus désormais un facteur déterminant. Mais elle demeure plus que jamais un facteur conditionnant. Une économie comme la notre ne peut survivre à une rupture de ses approvisionnements habituels.

Cette question est tellement vitale qu'une partie de la politique internationale est axée sur les rapports entre les pays consommateurs d'hydrocarbures et les pays producteurs.

La notion de sûreté d'approvisionnement peut revêtir un autre sens : l'économie utilisant de moins en moins l'énergie primaire telle quelle, les installations de transformation de cette énergie en énergie secondaire (centrales électriques, raffineries ...) doivent suivre l'évolution de la demande.

L'action gouvernementale doit tendre à éviter au maximum les risques de crises conjoncturelles qui seraient dues à une rupture des approvisionnements où à une inadéquation des structures de l'industrie de l'énergie. C'est en cela qu'il faut comprendre le développement rapide du nucléaire en Europe. Il serait absurde d'axer une politique sur la peur de l'épuisement des réserves mondiales d'une des formes d'énergie.

Note n° II

UN MODELE DE CROISSANCE DES BESOINS EN ENERGIE
DE 1970 à 2000

C. CANETTI
R. LALANDE

Juin 1973

DESCRIPTION DU MODELE

Les études sur l'évolution future de la consommation d'énergie ont souvent extrapolé les tendances actuelles en prenant l'utilisation de l'énergie comme une fin en soi. Ce type d'approche ne permet que difficilement d'inclure dans les prévisions les changements techniques ou structurels des utilisations d'énergie. Au contraire, nous sommes partis de l'idée que la seule approche permettant de déterminer un jeu d'hypothèses cohérent était de considérer que la consommation d'énergie est la conséquence du développement général de l'économie. Plutôt que d'essayer de déterminer directement une croissance énergétique, nous ferons des hypothèses sur le développement économique, sur les besoins en énergie qu'il entraîne et sur les solutions techniques adoptées pour satisfaire ces besoins. La première étape du modèle consistera donc à définir les besoins en énergie de l'économie et leur croissance.

I - BESOINS EN ENERGIE DE L'ECONOMIE

Les utilisations de l'énergie sont regroupées en trois secteurs :

- Industrie
- Transports
- Domestique et Tertiaire

Les limites de ces secteurs ont été définies pour être compatibles avec les statistiques disponibles (OCDE en particulier) ; ainsi le secteur Industrie inclut-il entre autres la sidérurgie et les besoins non énergétiques de matière énergétique (carbo chimie, pétrochimie ...), tandis que le secteur Domestique et Tertiaire comprend les utilisations agricoles.

II - HYPOTHESE DE CROISSANCE DE LA CONSOMMATION ENERGETIQUE

La croissance de la consommation énergétique de chaque secteur est supposée exponentielle avec un taux variable selon les époques, les secteurs et les pays ; ce taux peut naturellement être négatif en cas de récession du secteur. Il semble que la croissance de la consommation est suffisamment régulière pour que l'on puisse toujours approcher ainsi l'évolution de la consommation d'un produit énergétique donné en gardant les époques assez longues (quinze ans dans le modèle actuel, avec possibilité de changer).

III - REPARTITION DES BESOINS GLOBAUX ENTRE LES DIFFERENTES SOURCES D'ENERGIE POSSIBLES

Le modèle distingue deux niveaux dans la consommation d'énergie:

III - 1. L'énergie livrée à la consommation finale, ou "secondaire",
comprenant

- * combustibles solides (charbon, lignite, coke ...)
- * combustibles liquides (produits pétroliers)
- * combustibles gazeux (gaz naturel, de cokerie, d'usine, de raffinerie ...)
- * électricité (hydraulique, géothermique, thermique classique, nucléaire).

Chaque catégorie regroupe des produits de même nature, aisément substituables, indépendamment de leur origine. Le passage de la consommation totale d'énergie par secteur à la consommation de chacune des énergies secondaires se fait par un opérateur de Léontieff, tableau ((T1)) dont chaque coefficient t_{ij} représente (en %) la part de l'énergie de type i dans la consommation du secteur j (Exemple : en 1971 en France, l'électricité représentait 5,5 % de l'énergie consommée par les Transports). Ce tableau de répartition peut être modifié à chaque époque pour tenir compte du progrès (cf § 4 ci-dessous).

III - 2. L'énergie "primaire", utilisée pour la transformation en énergie secondaire. Elle est décomposée en cinq groupes :

- * combustibles solides (charbon, lignite ...)
- * combustibles liquides (pétrole brut)
- * gaz naturel
- * électricité d'origine hydraulique ou géothermique
- * électricité d'origine nucléaire.

Les valeurs représentent la consommation intérieure de chaque forme d'énergie pour une zone, c'est-à-dire la production intérieure de chaque énergie, compensée par les mouvements internationaux d'importation et d'exportation, et les variations de stock.

Le passage de la consommation finale à la consommation primaire s'effectue également par l'intermédiaire d'un tableau (T2), dont chaque coefficient t_{ij} représente la part (en %) de l'énergie secondaire (j) qui provient de l'énergie primaire (i) (Exemple : en 1971 en France, 31,4 % de l'électricité consommée était d'origine hydraulique). Signalons que ce tableau n'est pas facile à estimer, dans la mesure où il faut tenir compte des divers procédés de transformation, concurrents, à rendements différents ; par exemple, on peut obtenir de l'électricité à partir de charbon, soit en le brûlant directement dans une centrale, soit en faisant du coke, et en récupérant les gaz pour la centrale, soit enfin par l'intermédiaire du gaz de hauts fourneaux ...

La nécessité de convertir toutes les énergies en une unité commune ajoute encore aux imprécisions. Il n'empêche que ce tableau, modifiable à chaque époque, permet d'introduire des hypothèses de progrès (cf § 4) et de décisions politiques de sécurité des approvisionnements.

IV - PRISE EN COMPTE DU PROGRES

Très schématiquement, on peut distinguer :

- le progrès technique dans l'utilisation des ressources primaires.

Les nouvelles possibilités peuvent être introduites à chaque époque dans le tableau (T2) de transformation. Il s'agit par exemple de

- la gazéification du charbon
- le développement des surgénérateurs
- le progrès technique dans l'utilisation de l'énergie secondaire

On modifiera le tableau (T1). Il s'agit de

- la voiture électrique
- le chauffage électrique et l'air conditionné ...
- le progrès économique et social.

Dans la mesure où l'on peut admettre une corrélation entre niveau de vie et consommation d'énergie (1), il est possible, en jouant sur les taux de croissance respectifs des diverses zones, d'étudier l'influence d'un déplacement des industries de transformation vers les pays en voie de développement, ou encore, en jouant sur les taux de croissance des différents secteurs économiques d'une même zone, d'étudier des modifications de structure de l'économie.

- l'évolution de la dépendance vis-à-vis de l'extérieur, par le développement des nouvelles ressources ou formes d'énergie.

./.

(1) Voir en particulier "Energy and the Economy" de K. DARMSTADTER, dans Energy International d'Août 1970, et la figure IV de la note I

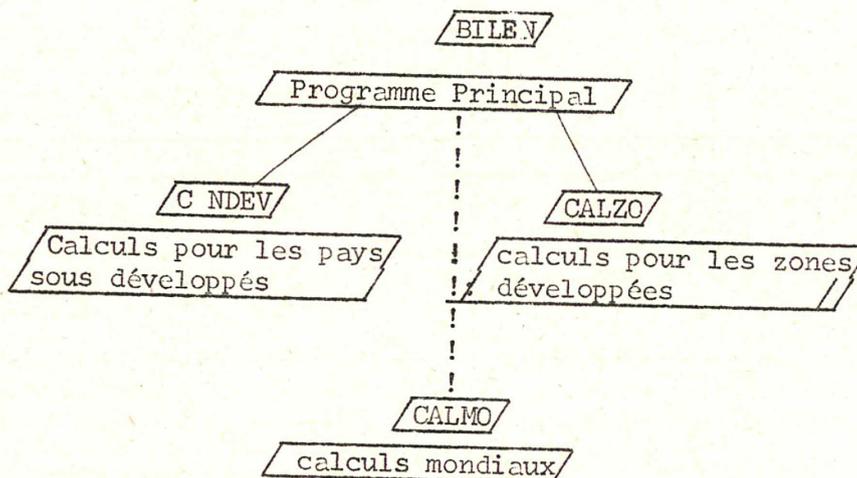
V - FONCTIONNEMENT

Le modèle est établi pour 3 époques (1970-1985-2000); il est facile de le généraliser à n périodes de temps de durée donnée (ae, 6 périodes de 5 ans). Le monde a été partagé en 9 zones :

- Zone n° 1 : USA
 2 : Europe de l'Ouest (définition OCDE)
 3 : Japon
 4 : Amériques (excepté les USA)
 5 : Asie-Océanie (sauf Japon, Moyen Orient et Pays Communistes)
 6 : Afrique et Moyen Orient
 7 : Chine
 8 : URSS
 9 : Tous autres pays communistes d'Europe et d'Asie.

Etant donné le manque d'informations statistiques précises pour les zones 4 à 9, il a fallu adopter une démarche différente, et partir des consommations d'énergie secondaire. Eu égard aux statistiques disponibles, l'URSS a été rangée parmi les pays en voie de développement. Il n'y a qu'un tableau (T2) de passage aux besoins en énergie primaire. Pour assurer la cohérence avec les trois premières zones, la consommation par secteur est calculée à partir d'hypothèses de répartition (en %) de la consommation entre les différents secteurs.

La structure du programme est alors la suivante :



Il y a trois sous programmes indépendants, reliés par un programme principal ; le listing est donné en annexe.

V - 1. Sous programme CALZO

- Utilise les données suivantes (pour chaque zone) :

F1 Consommation d'énergie dans chaque secteur en 1970

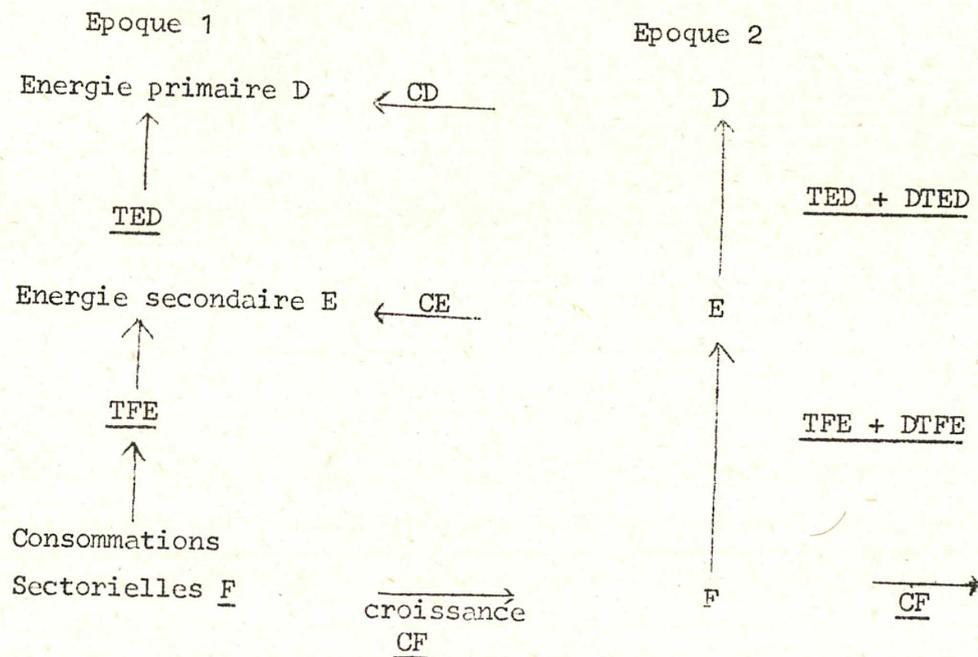
CF Taux de croissance des besoins sectoriels (**vecteur**) pour chacune des deux périodes

TFE, TED Tableaux de transformation en 1970

DTFE, DTED Modifications de la structure (pour chacune des deux périodes)

- Progression :

Les valeurs soulignées sont les données. Les flèches indiquent les calculs effectués. A partir des données initiales, le modèle calcule les consommations sectorielles à l'époque suivante, puis les besoins en énergie secondaire et primaire, et les taux de croissance annuels en résultant.

V - 2. Sous programme CNDEV

- Données (par zone) :

E1 Consommations d'énergie secondaire en 1970

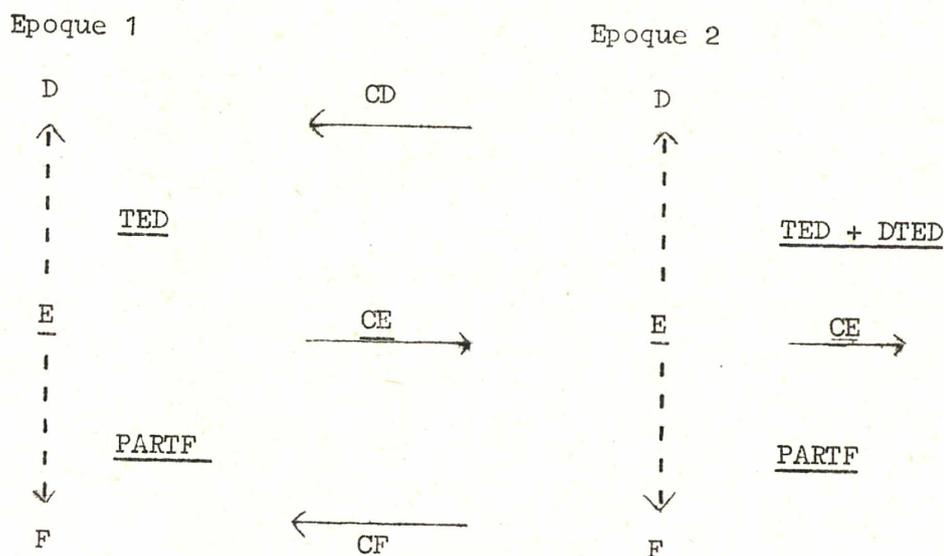
CE Taux de croissance des consommations (pour chacune des deux périodes)

TED, DTED Comme CALZO

PARTF Répartition de la consommation d'énergie secondaire entre les différents secteurs.

• Progression

Avec les mêmes symboles que pour CALZO,



Le modèle **calcule** les consommations énergétiques à l'époque suivante, puis les besoins en énergie primaire, les consommations sectorielles, et les taux de croissance annuels en résultant.

V - 3. Sous programme CALMO

Regroupe les résultats à l'échelon mondial.

De façon à pouvoir comparer les résultats obtenus par ce modèle avec d'autres prévisions, le programme calcule également les taux de croissance annuels associés implicitement aux variations des tableaux de transformation : croissance

- d'une énergie secondaire dans un secteur
(ex taux de croissance annuel de l'électricité dans les transports)
- d'une énergie primaire dans la production d'énergie secondaire
(ex taux de croissance annuel du gaz dans la production d'électricité)

Une note explique les calculs sous jacents.

Annexe I

UTILISATION DU MODELE SUR L'ORDINATEUR DE LA DICA

I - FORMES ET STOCKAGE DES PROGRAMMES

Le modèle existe actuellement sous deux formes, toutes deux stockées sur le disque OOOD:

- la première, nommée BILEN, imprime les données, hypothèses et résultats zone par zone, puis les résultats mondiaux. Pour 9 zones, le temps d'impression est d'à peu près 10 mn.
- la seconde, nommée BILEM n'imprime que les résultats sous forme de tableaux mondiaux. Son intérêt est de ne nécessiter que 30 sec d'impression. Il permet ainsi de tester diverses hypothèses rapidement.

Correspondance entre les sous programmes de BILEN et ceux de BILEM

Les deux programmes effectuent les mêmes calculs, mais ceux des ordres WRITE qui concernaient les calculs sur les zones ont été supprimés dans BILEM. Les sous programmes de BILEN et BILEM portent ainsi des noms différents :

BILEN	BILEM	Programme d'assemblage
CALZO	CDEV1	Calculs pour les zones développées
CNDEV	CDEV2	Calculs pour les zones en voie de développement
CALMO	CALMO	Calculs mondiaux

II - ENTREE DES DONNEES ET HYPOTHESES

Les données et hypothèses nécessaires au fonctionnement du modèle sont stockées sur des cartes, qui doivent être lues à chaque passage. Les entrées sont les mêmes dans les deux versions BILEN et BILEM. Elles peuvent être classées en trois groupes, lus successivement :

- Groupe I : des cartes précisant les titres des divers tableaux du programme
- Groupe II : Il s'agit des données et hypothèses concernant les zones développées (trois dans la configuration actuelle)
- Groupe III : Données et hypothèses pour les zones sous développées (six dans le cas présent)

Les cartes sont décrites une à une plus bas.

Remarques

1. Les données sont constituées par les 5 cartes du groupe I, les 5 premières cartes de chaque zone du groupe II, et les 4 premières cartes de chaque zone du groupe III. Les autres cartes sont des hypothèses.

On pourrait alléger les entrées sorties en stockant ces données sur disque, et en ne faisant lire à chaque fois que les hypothèses.

2. Des données figurent également dans le corps du programme BILEN (ou BILEM). Il s'agit de :

IWRIT	représente le numéro de code de l'imprimante dans les ordres WRITE
IREAD	représente le numéro de code du lecteur de cartes dans les ordres READ
IDATF	est le nombre d'époques pour lesquelles calcule le programme. Ici IDATF = 3 c'est-à-dire 1970, 1985, 2000 (l'intervalle entre époques est 15 ans)
IZONF	est le nombre de zones considérées (ici, il y a neuf zones dont trois développées).

Pour changer le nombre d'époques ou de zones, il suffit en principe de modifier ces cartes. Il se peut qu'il faille aussi ajuster quelques formats (en particulier dans les entrées d'hypothèses).

Tableau des cartes

	N° dans le groupe ou la zone	Nom de la variable	Description des données	Format de chaque carte
<u>Groupe I</u>	1,2	TICOL	Titres des colonnes du premier tableau "Résultats pour une zone"	20 A4 (1)
	3,4	TICOL	Titres des colonnes du second tableau "Résultats pour les zones"	20 A4 (1)
	5,6,7	TILIG	Titres des lignes des tableaux	20 A4 (1)
<u>Groupe II</u> (par zone)	1	TIZON	Nom de la zone (12 caractères)	3 A4
	2	F	Consommations sectorielles en 1970	3 F10.4
	3	TFE	Tableau de répartition des consommations sectorielles par énergie secondaire, 1970	12 F6.2
	4,5	TED	Tableau de répartition énergie secondaire-énergie primaire 1970	10 F6.2
	6	CF	Taux de croissance sectoriels estimés pour la période 1970-1985	3 F6.1
	7	CF	Taux de croissance sectoriels estimés pour la période 1985-2000	3 F6.1
	8	DTFE	Estimation du nouveau tableau de répartition TFE pour 1985	12 F6.1
	9	DTFE	id. pour 2000	12 F6.1
	10,11	DTED	Estimation du nouveau tableau TED pour 1985	10 F6.1
	12,13	DTED	id. pour 2000	10 F6.1
<u>Groupe III</u> (par zone)	1	TIZON	Nom de la zone	3 A4
	2	E	Consommations d'énergie secondaire en 1970	4 F10.4
	3,4	TED	Tableau de répartition énergie primaire-énergie secondaire en 1970	10 F6.2
	5	CE	Estimation des taux de croissance des énergies secondaires de 1970 à 1985	4 F6.1
	6	CE	id. de 1985 à 2000	4 F6.1
	7,8	DTED	Estimation du nouveau tableau de répartition TED pour 1985	10 F6.1
	9,10	DTED	id. pour 2000	10 F6.1
	11	PARTF	Répartition de la consommation totale entre les différents secteurs (toutes époques)	3 F6.1 (2)

(1) chaque colonne comprend 12 caractères

(2) supposée ne pas varier dans le temps. Pourrait être indiquée sur le temps.

Annexe II

DETERMINATION DES DONNÉES - HYPOTHESES SOUS JACENTES

AU MODELE

I - DETERMINATION DES DONNEES (1)I - Pays en voie de développement

Les seuls recueils de statistiques mondiales à peu près complets sont ceux édités par l'Office Statistique des Nations Unies. Nous sommes donc partis de la publication :

World Energy Supplies 1961 - 1970

qui fournit des séries de données disponibles de 1961 à 1970. Il est facile d'en tirer les valeurs des consommations d'énergie secondaire, par contre il manque beaucoup de données sur l'utilisation par secteurs de cette énergie, et sur la façon dont cette énergie est produite à partir d'énergie primaire. Dans tous les cas où les coefficients du tableau TED n'étaient pas directement fournis, nous avons dû les estimer au mieux (en particulier, la répartition des consommations des centrales entre charbon et fuel a dû être estimée).

II - PAYS MEMBRES DE L'OCDE

Pour les trois zones principales Etats-Unis, Europe et Japon, nous disposons des statistiques de l'OCDE.

Les tableaux utilisés sont les tableaux "Production et Utilisation des Sources d'Energie en 1970" (sauf indications contraires). Nous décrivons ci-après la façon dont nous en avons tiré nos données, et les difficultés sur lesquelles nous avons buté. Le problème du choix des coefficients de conversion est traité en annexe III.

II - 1. Energie primaire D

Nous prenons les valeurs de la ligne "Consommation intérieure totale", complétées par le solde des importations de produits finis et semi-finis (quand il est significatif, comme par exemple aux USA).

Combustibles solides : colonnes 1 et 11

Combustibles liquides: colonnes 13 (et certaines données des colonnes 14 à 21)

Combustibles gazeux : colonne 5

Les données sur l'électricité hydraulique et nucléaire viennent du tableau 20 "Electricité".

(Ce calcul ne sert qu'à déterminer TED puis à tester l'exactitude des calculs effectués par l'ordinateur en 1970).

./.

(1) Depuis lors, nous avons eu connaissance du livre fondamental de J. DARMSTADTER : "Energy and the Economie World", chez SIMON & SCHURR, qui regroupe toutes les séries de données disponibles jusqu'en 1965.

II - 2. Energie secondaire E

Nous prenons les valeurs de la ligne "Consommation intérieure finale totale".

	Coeff. de conversion en MTEP
E (1) : Col 1 et 2	0,66
Col 3 et 4	0,6
Col 11 et 12	0,4
E (2) : Col 13 à 21 (sauf Col 15)	1
E (3) : Col 5 à 10	0,4
Col 15	1
E (4) : Col 22	0,27

Les autoconsommations et pertes du secteur énergie sont donc incluses dans ce secteur E.

II - 3. Consommation par secteurs F et tableau de transformation TFE

La consommation d'un secteur s'obtient en sommant toutes les consommations indiquées sur la ligne correspondante "Consommation du secteur X ..." avec les mêmes coefficients de conversion que pour E. Nous avons simplement regroupé les secteurs "énergie" et "industrie".

Les coefficients de TFE sont obtenus à partir de regroupements partiels des colonnes en groupes correspondant aux sources d'énergie de même nature puis en calculant des pourcentages. De par la définition retenue des consommations E et F, la somme des consommations de l'énergie j des 3 secteurs est égale à la consommation secondaire de l'énergie j :

$$\forall j \quad \sum_{i=1}^3 t_{ij} = 1$$

./.

Il n'y a pas de pertes en passant de F à E, ni de distortions introduites par les coefficients de conversion.

II - 4. Tableau de transformation énergie secondaire - énergie primaire TED

Ce tableau est déterminé à partir des lignes "consommations pour transformation" ; on y voit par exemple, qu'en Europe les centrales électriques ont consommé 146,4 MT houille, 95,7 MT lignite, et 62,5 MT de fuel.

Ceci est complété par les tableaux 20 : "Electricité" et 9 : "Gaz : ventilation de la production".

La difficulté vient du fait qu'un produit peut être transformé plusieurs fois, et que chaque étape donne lieu à des pertes et des sous produits. En particulier, le charbon peut soit être brûlé directement dans les centrales, soit être cokéfié, et donner du coke (source d'énergie comptabilisée comme "combustible solide utilisé par la sidérurgie") et du gaz de cokerie, utilisé dans les centrales. On ne connaît bien que la production initiale de charbon, et la production finale d'électricité. Après, tout se complique par suite

- des rendements différents des diverses transformations possibles
- des manipulations statistiques propres à l'OCDE, que nous ne connaissons pas
- du peu de précision des coefficients des conversion utilisés.

Compte tenu de ces difficultés, nous avons ajusté les coefficients de TED au mieux : le modèle calcule la valeur des consommations primaires en 1970 à moins de 3 %, ce qui nous semble suffisamment précis. L'analyse théorique menée ci-dessous permettrait de réduire ces écarts, mais ceci est inutile, compte tenu des erreurs beaucoup plus importantes qui s'introduisent dès que l'on veut faire des prévisions : une erreur absolue de 0,1 % sur un taux de croissance de 5 % par an pendant 15 ans conduit à une erreur finale de 2 % sur le résultat ...

Remarques

1. Dans le cas de transformations successives, nous considérons que l'énergie finale provient de l'énergie initiale, et non de la dernière énergie intermédiaire.
2. Pour le calcul des coefficients relatifs à l'électricité nous avons directement calculé les pourcentages provenant de l'hydraulique et du nucléaire à partir des données en GWh. Les autres pourcentages ont été calculé après conversion en MTEP. Ceci nous assure de l'exactitude des composantes D (4) et D (5) après calcul, en supprimant l'influence des coefficients de conversion.

3. Analysons de plus près ce qu'il advient de la consommation intérieure brute $D(i)$ d'une source d'énergie i (par exemple le charbon); elle se répartit en :

- * consommation finale d'énergie i (à usage énergétique ou non)
- * pertes à la production et autoconsommations
- * consommation pour transformation en d'autres types d'énergie, égale à la somme des énergies produites (1) et des pertes dans les transformations.

Nous ne prenons en compte dans la consommation intérieure finale que la consommation finale d'énergie i , la partie des pertes à la production et autoconsommations appréhendée par les statistiques OCDE, et les énergies produites par transformation. Le passage de D à E élimine ainsi une partie des pertes à la production et autoconsommations, et l'ensemble des pertes dans les processus de transformation.

Voyons quelles sont alors les conséquences de notre hypothèse d'existence d'un tableau TED ; les coefficients t_{ij} représentant la part de l'énergie secondaire j qui vient de l'énergie primaire i (2), le produit $t_{ij} E(j)$ représente justement l'énergie secondaire produite par transformation à partir de i . La décomposition ci-dessus s'écrit alors :

$$D(i) = \sum_j t_{ij} E(j) + \text{pertes à la production et autoconsommations (en partie)} + \text{pertes dans les processus de transformation}$$

Ecrire comme nous le faisons

$$D(i) = \sum_j t'_{ij} E(j)$$

revient à supposer que les pertes à la production, autoconsommations et pertes dans les processus de transformation sont proportionnelles à la consommation brute $D(i)$. Si ceci est justifié dans les deux premiers cas, (3) cela paraît moins évident pour les pertes dans les transformations, surtout s'il y a plusieurs transformations parallèles.

Dans cette hypothèse, $\sum \text{Pertes} = x(i) D(i)$

on obtient $t'_{ij} = \frac{t_{ij}}{1-x(i)}$

Le mode de calcul que nous avons choisi donne directement le tableau des t'_{ij} , avec pertes intégrées.

./.

(1) avec toujours le problème des conversions ! nous supposons dans la suite les coefficients d'équivalence exacts.

(2) Bien évidemment $t_{ii} = 1 \quad \forall i$

(3) Et encore ...

Remarquons enfin que supposer $\sum_i t'_{ij} = 1$ équivaudrait à supposer que les pertes sont nulles (ou intégrées dans les coefficients de conversion) ; la somme des consommations d'énergie primaire est alors égale à la somme des consommations d'énergie secondaire.

De cela, il résulte que ce modèle peut être amélioré en introduisant deux tableaux supplémentaires :

- R matrice diagonale, dont les éléments diagonaux R_{ii} représentent le rapport des pertes à la production et autoconsommations de l'énergie i à la production brute de cette énergie
- R' matrice dont les éléments R'_{ij} représentent le rapport des pertes à la transformation à l'énergie secondaire j produite à partir de l'énergie primaire i

Le bilan s'écrit alors

$$D(i) = \sum_j t_{ij} E(j) + R_{ii} D(i) + \sum_j R'_{ij} E(j)$$

$$\text{soit } D(i) = \sum_j \frac{t_{ij} + R'_{ij}}{1 - R_{ii}} E(j)$$

Par manque de temps nous nous sommes contentés de calculer en 1970 un rendement approximatif $\frac{1}{1-R_{ii}} = \frac{D(i)}{\sum_j t'_{ij} E(j)}$

et nous avons supposé qu'il demeurerait constant au cours du temps.

Annexe III

COEFFICIENT DE CONVERSION DES DIVERSES
ENERGIES ENTRE ELLES

Pour pouvoir comparer des consommations, il est nécessaire d'exprimer les données en une même unité. Nous avons choisi le MTEP (Million de tonnes Equivalent Pétrole). Il existe plusieurs systèmes différents de coefficients de conversion ; l'ONU, l'OCDE et le Commissariat au Plan ont chacun le leur. Le choix d'un système ou d'un autre n'a guère d'importance dans la mesure où nous ne pouvons prétendre à une grande précision. Nous nous sommes ralliés aux coefficients de l'OCDE. En particulier, nous avons pris pour le kwh, non pas l'équivalent théorique de 0,125 kg de houille, coefficient retenu par l'ONU et déterminé par combustion complète dans une bombe calorimétrique, mais l'équivalent pratique, moyenne des rendements obtenus dans les centrales thermiques, qui est

$$1 \text{ kwh} = 0,4 \text{ kg houille}$$

Notons que dans la réalité, les rendements vont de 300 à 600 g de charbon au kwh, ce qui montre bien le caractère approximatif de ces conversions. Nos coefficients sont alors les suivants :

1 MT charbon	=	0,67 MTEP
1 MT lignite	=	0,4 MTEP
1 MT coke	=	0,6 MTEP
1 MT produits pétroliers	=	1 MTEP
10^9 m ³ gaz naturel	=	1 MTEP
10^9 m ³ gaz à 4 200 kcal	=	0,4 MTEP
10^9 kwh	=	0,27 MTEP

si pétrole utilisé dans centrale !

Annexe IV

ESTIMATION DES RENDEMENTS

1. Pays développés

Comme nous l'avons vu dans la remarque 3 de la note II p. II.19, l'utilisation d'un tableau TED unique conduit à des divergences entre les valeurs des besoins d'énergie primaire calculées pour 1970 et les valeurs réelles. Le tableau, ci-après montre l'ordre de grandeur des écarts, et la valeur du terme correctif unique de rendement que nous avons utilisée (nous n'avons pas eu le temps d'estimer les deux termes définis p II.19). Nous avons supposé que ce facteur était également applicable en 1985 et 2000. Quand l'écart était inférieur à 3 %, nous n'avons introduit aucun rendement dans le modèle. Les valeurs données sont en MTEP.

Nota

Comme dit dans la remarque 2 p II.18, le mode de calcul des coefficients de TED adopté pour l'électricité d'origine hydraulique et nucléaire nous assure de la concordance des deux valeurs, qui n'ont donc pas été reprises dans le tableau ci-après.

		!D1 calculé par !le modèle avant ! correction	! D3 réel calculé ! lé d'après nos ! sources	D1/D2
! USA	Ch	389,3	316,7	0,82
	P	552	622,7	1,12
	GN	547,4	539	0,98
! EUROPE	Ch	307	318	1,03
	P	509	620	1,22
	GN	66,5	66,8	1,01
! JAPON	Ch	60,9	58,9	0,97
	P	177,7	183,3	1,03
	GN	2,5	2,5	1

2. Pays en voie de développement

Dans ce cas, la difficulté est d'obtenir les valeurs de la consommation primaire et secondaire. Les statistiques disponibles ne sont pas assez précises pour permettre de connaître l'ordre de grandeur des pertes. Le mode de calcul de TED, par ajustement direct, nous assure de la concordance sans qu'il soit besoin de rendement. Mais nous ne sommes pas sûrs de ce que recouvre exactement la consommation secondaire.

Note n° III

BILANS ENERGETIQUES MONDIAUX A L'AN 2000 :
PREVISIONS ET DIFFICULTES

C. CANETTI
R. LALANDE

Juin 1973

I - BESOINS GLOBAUX D'ENERGIE A L'AN 2000

Nos premiers résultats concordent avec ceux des experts, en particulier ceux de M. BRION. Dans une hypothèse de croissance moyenne (1) nous obtenons pour les besoins d'énergie primaire (en Milliards de TEP).

	1970	1985	2000	
			Nucléaire faible	Nucléaire fort
Charbon	1,8	2,7	3,8	3,0
Pétrole	2,0	4,2	7,9	7,0
Gaz naturel	0,9	1,7	3,0	3,0
Hydraulique	0,3	0,5	0,8	0,8
Nucléaire	-	0,5	2,9	4,8
Total	5,0	9,6	18,4	18,4

Ces résultats appellent les remarques suivantes :

- Ces valeurs représentent la consommation mondiale d'énergie primaire. Pour 1970, on retrouve les valeurs données par les statistiques de l'ONU. Dans l'ensemble, la valeur de la production mondiale de chaque énergie est très proche de la valeur de la consommation mondiale (ce qui prouve que les pertes sont bien appréhendées). Le pétrole constitue cependant une exception : la production mondiale de 1970 est estimée à 2,3 milliards de TEP, ce qui est notablement supérieur à notre valeur. On peut expliquer une partie de l'écart par une mauvaise prise en compte des pertes à la production ; par ailleurs les différences d'élaboration des statistiques de l'ONU et de l'OCDE, font qu'ayant travaillé avec les deux simultanément, nous n'avons pas été à même de vérifier correctement si nous n'oublions rien ; en particulier, les consommations de produits pétroliers données par l'ONU semblent systématiquement sous estimées dans la mesure où elles n'incluent pas les consommations de pétrole brut mais partent de la consommation de produits raffinés. De toute façon, ceci n'influe pas sur les résultats en 1985 et 2000, puisque ces valeurs sont le résultat et non la base du calcul.

./.

(1) voir annexe II p. III.9

- le tonnage des combustibles solides utilisés continue à croître, bien que leur part relative dans la satisfaction des besoins diminue. Ceci est dû à la croissance prévue de la production dans les pays communistes, et au développement des consommations des pays du Tiers Monde. Aux Etats-Unis même, on ne sait pas si la production va croître ou non. Par ailleurs, une bonne partie des besoins des pays du Tiers Monde (1), jusqu'ici satisfaite par des combustibles végétaux non commercialisés (bois, tige de canne à sucre), est peu à peu remplacée par des combustibles commercialisés, donc appréhendés par les statistiques, ce qui fait croître "artificiellement" les besoins.
- les hypothèses de développement de l'hydraulique sont plutôt favorables. Dans tous les continents neufs, les ressources exploitées ne constituent en effet qu'une faible part des ressources théoriquement recouvrables. Tout dépend de la rentabilité des projets. Il semble pour l'instant que l'ampleur des investissements à réaliser (en particulier pour le transport de l'énergie à distance) soit un frein à ce développement. Mais ça peut changer.
- Notons enfin que ce modèle donne des résultats d'une assez grande stabilité aux variations de taux de croissance et de pénétration du nucléaire. La consommation mondiale sera de 20 milliards de TEP en hypothèse moyenne forte, de 16 milliards de TEP en hypothèse moyenne faible (2). Une variante nucléaire forte dans les pays développés n'est supérieure à une variante nucléaire faible que de 700 MTEP (22 %). De toute façon, les hydrocarbures (liquides et gazeux) devront subvenir à plus de la moitié des besoins de l'an 2000. Le nucléaire ne semble pas pouvoir faire diminuer avant l'an 2000 les besoins mondiaux d'hydrocarbures, d'autant que sa croissance est subordonnée à celle de l'électricité.

II - BESOINS SECTORIELS DE L'ECONOMIE

La consommation d'énergie provient d'une certaine demande de l'économie. Une étude prospective sérieuse devrait donc partir des besoins de chacun des secteurs de l'économie, et déduire des prévisions de croissance de chaque secteur l'évolution de la demande globale d'énergie.

Mais très peu de travaux ont été faits sur les relations économétriques entre la croissance sectorielle et la consommation d'énergie. On connaît bien une relation globale FNB-énergie, qui n'est qu'une constatation faite à partir des statistiques passées. Mais on ignore les facteurs explicatifs de la demande des différentes formes d'énergie. Il eut fallu descendre au niveau de chaque secteur, étudier ses besoins en énergie et en tirer nous-même une relation économétrique. Le travail eut été énorme, seuls des universitaires pourraient le mener à bien.

(2) pour le détail des hypothèses, voir annexes I et II

(1) 51 % en Afrique, 58 % en Asie, 45 % en Amérique du Sud, mais 3 % aux USA, d'après une étude de l'ONU en 1955

Nous en avons donc été réduits à faire des hypothèses directement sur la croissance des besoins énergétiques des secteurs, et leur répartition entre les différentes formes d'énergie. Nous avons pris des taux de croissance "raisonnables" par rapport aux tendances actuelles.

III - PAYS SOUS-DEVELOPPES

Un certain nombre de pays sous développés sont proches du "décollage" économique. Leur situation actuelle est mal connue : ils utilisent beaucoup de sources d'énergie mal comptabilisées dans les statistiques internationales (bois etc...). L'évolution de leur économie est difficile à prévoir. Il n'est pas certain que leur développement appellera une aussi grande consommation d'énergie que la croissance des pays occidentaux. Leur potentiel humain est énorme, le travail manuel peut remplacer en partie les machines consommatrices d'énergie. Par exemple la Chine axe le développement de ses campagnes sur le travail humain (les digues sont faites à la main etc). A l'inverse les pays développés peuvent avoir tendance à exporter leur industrie vers les pays sous développés pour des problèmes de pollution ou de main d'oeuvre (1). Si ces pays continuent d'accepter le modèle de croissance occidentale, ils passeraient alors par une phase d'industrialisation rapide qui ferait croître leurs besoins en énergie. Des exemples en sont donnés par Porto Rico ou Trinidad.

./.

(1) phénomène contrebalancé par la peur de perdre leur indépendance

De toute façon la part des pays en voie de développement dans la consommation est très faible actuellement (10 % pour les pays les plus pauvres, 25 % pour l'ensemble du tiers monde). Nous avons testé sur le modèle des hypothèses de croissance accélérée, mais l'écart initial avec les pays développés est trop important pour que le retard se comble de façon significative d'ici à 2000.

IV - DIFFICULTES STATISTIQUES

Nous avons parlé de besoins en énergie. Encore faudrait-il que la notion d'énergie soit très claire. En fait, aussitôt qu'il s'agit de chiffrer les besoins en énergie, il apparaît de nombreuses difficultés statistiques :

- les pertes entre la production et l'utilisation sont toujours très difficilement chiffrables.
- la nécessité de convertir chaque forme d'énergie en une unité commune soulève le problème des taux de conversion. Pour des besoins finaux constants, les besoins en énergie primaire diminuent au cours du temps grâce au progrès technologique, qui entraîne des rendements croissants.
- les statistiques actuelles sont imprécises, et se contredisent l'une l'autre, suivant les définitions qu'elles prennent des différentes formes d'énergie. En particulier elles ne prennent pas toujours en compte l'énergie d'origine végétale.
- il serait opportun d'inclure l'énergie musculaire humaine ou animale dans une telle étude. En effet nous avons vu que des pays comme la Chine utilisaient à grande échelle l'énergie musculaire humaine. De la même manière l'humanité récupère une partie de l'énergie solaire sous forme de cultures. Ne pas la prendre en compte conduit à des aberrations ; comme les propositions de remplacer des champs par des panneaux solaires.

V - L'HORIZON 2000

Dans le secteur de l'énergie, le domaine de la prévision couvre les 10 ou 15 prochaines années. Après commence le domaine de la futurologie.

L'horizon 2000 est de ce fait très mal adapté à une étude prospective. En effet de deux choses l'une :

- ou bien nous cherchons à faire des prévisions précises. Alors 1985 ou 1990 paraissent des dates de référence bien adaptées. Une étude sectorielle poussée, en tenant compte des programmes de développement à long terme des entreprises, permettrait de calculer l'évolution des besoins dans les quinze prochaines années.

- ou bien il s'agit de décrire des scénarios possibles de développement sans tenir compte des contraintes de l'économie dues à la situation actuelle. Pour que les différentes hypothèses de développement conduisent à des résultats éloignés les uns des autres, il faut que la période envisagée soit d'au moins une cinquantaine d'années. En effet les inerties du secteur de l'énergie sont telles que son évolution globale est lente.

L'échéance 2000 se situe à mi-chemin entre ces deux types d'étude : il n'y a que 10 ou 15 ans à la fin du siècle pendant lesquels peuvent être envisagés plusieurs scénarios de développement distincts. Mais ce laps de temps est trop court pour que les besoins en énergie de l'an 2000 soient profondément différents les uns des autres. Tout au plus une incertitude subsiste-t-elle sur le rythme de développement de l'électricité et du nucléaire.

Conclusions

Si l'on n'y prend pas garde, un tel modèle est très satisfaisant pour l'esprit :

- la neutralité de ses calculs est rassurante : il n'interprète pas les hypothèses, il ne fait qu'en tirer les conséquences quantitatives ;

- il confirme par la rigueur de ces calculs les résultats des études qui ont déjà été faites ;

- il est d'une grande stabilité ; il fournit des résultats voisins pour des hypothèses qui nous paraissent très différentes : croissance lente ou rapide, nucléaire fort ou faible.

En fait, ces résultats ne devraient pas nous étonner. Nous avons fait des prévisions en excluant a priori tout bouleversement économique brutal. Dès lors que ce choix était fait, il était évident que l'évolution de la demande mondiale en énergie était en grande partie déterminée jusqu'à l'an 2000 (voir § 5).

Les prévisions seraient beaucoup plus hasardeuses si nous reculions le terme de notre étude de quelques décades, ou si nous étudions la possibilité d'une évolution économique dans nos pays.

A partir de l'an 2000 nous pouvons imaginer que de nouvelles formes d'énergie apparaîtront, telles que la fusion contrôlée ou l'hydrogène. Elles pourront modifier nos attitudes dans un sens bien difficile à prédire.

Mais d'ici là, un bouleversement des objectifs de notre société peut très bien survenir. Il se peut que nous abandonnions nos objectifs de croissance pour une meilleure qualité de la vie. Et même, sans qu'il soit nécessaire de remettre en cause notre société dans sa totalité, il serait sans doute possible de diminuer l'énorme gaspillage d'énergie qui a lieu à l'heure actuelle : au fond, un autobus parisien ne va pas plus vite qu'un homme à pied. Le drame est que l'énergie musculaire n'est pas décomptée en tant que telle. Le travail gigantesque de construction de digues par 700 millions de chinois n'est pas comptabilisé. Il est significatif que nous ne puissions les prendre en compte dans notre modèle, faute de données quantifiables. En effet ce modèle trouve ses limites dans le fait qu'il nécessite des statistiques chiffrées mesurées à l'aide d'une unité de référence (nous avons pris les tonnes Equivalent Pétrole).

Jusqu'à l'heure actuelle le progrès technique consistait souvent à remplacer le travail humain par une certaine consommation d'énergie. Ne serait-il pas temps de se préoccuper également de rationaliser la consommation d'énergie, de réduire les gaspillages, d'améliorer les rendements ? On nous parle de crise de l'énergie. Pourtant, la comparaison de la consommation énergétique en l'an 2000 aux réserves probables peut redonner confiance. Mais ces résultats comptables ne doivent pas faire oublier qu'il faut se poser le problème qualitativement, et rechercher comment peut être améliorée notre civilisation.

Annexes à la Note III

- (I) Hypothèses de modification de structure
Pénétration du nucléaire
- (II) Analyse de la croissance passée
Quelques scénarios de croissance
- (III) Bibliographie

Annexe I

HYPOTHESES DE MODIFICATION DE STRUCTURE

PENETRATION DU NUCLEAIRE

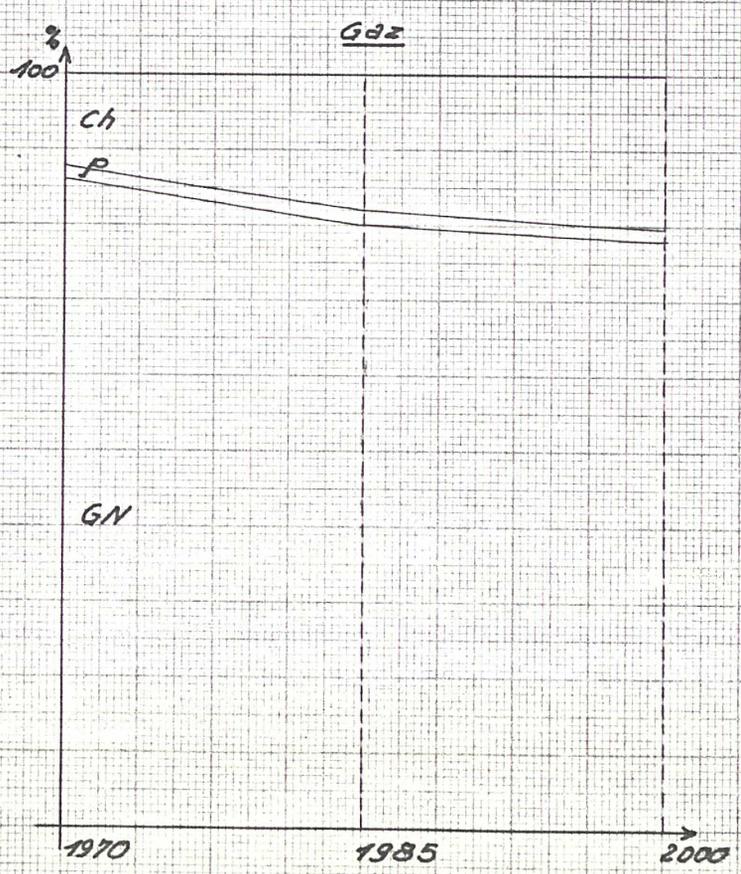
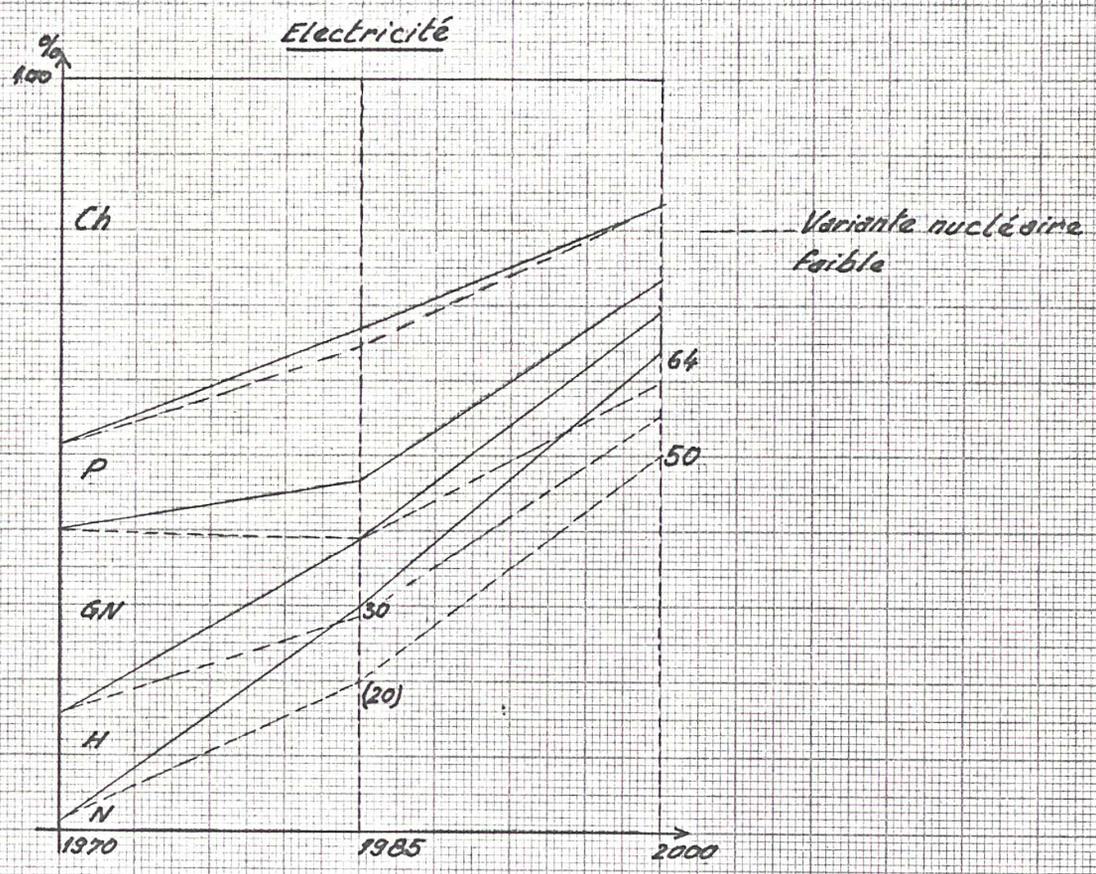
Les graphiques représentent l'évolution supposée des parts des différentes sources d'énergie dans la production d'électricité et de gaz. Dans le cas des pays occidentaux développés ont été retenues deux hypothèses de développement du nucléaire. La pénétration du nucléaire est résumée dans le tableau ci-après.

Taux de pénétration du nucléaire dans l'électricité (en %)

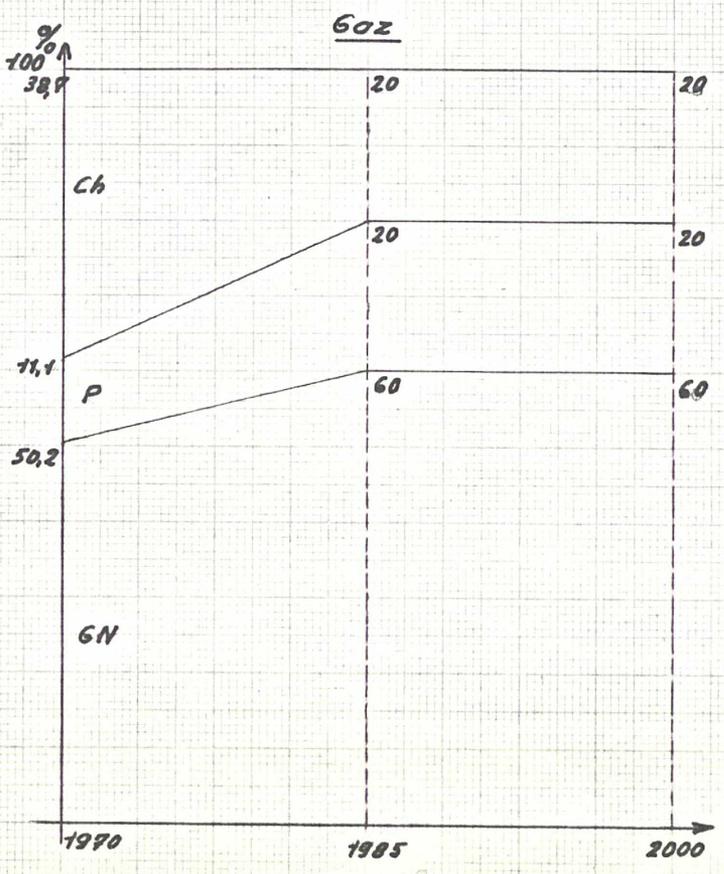
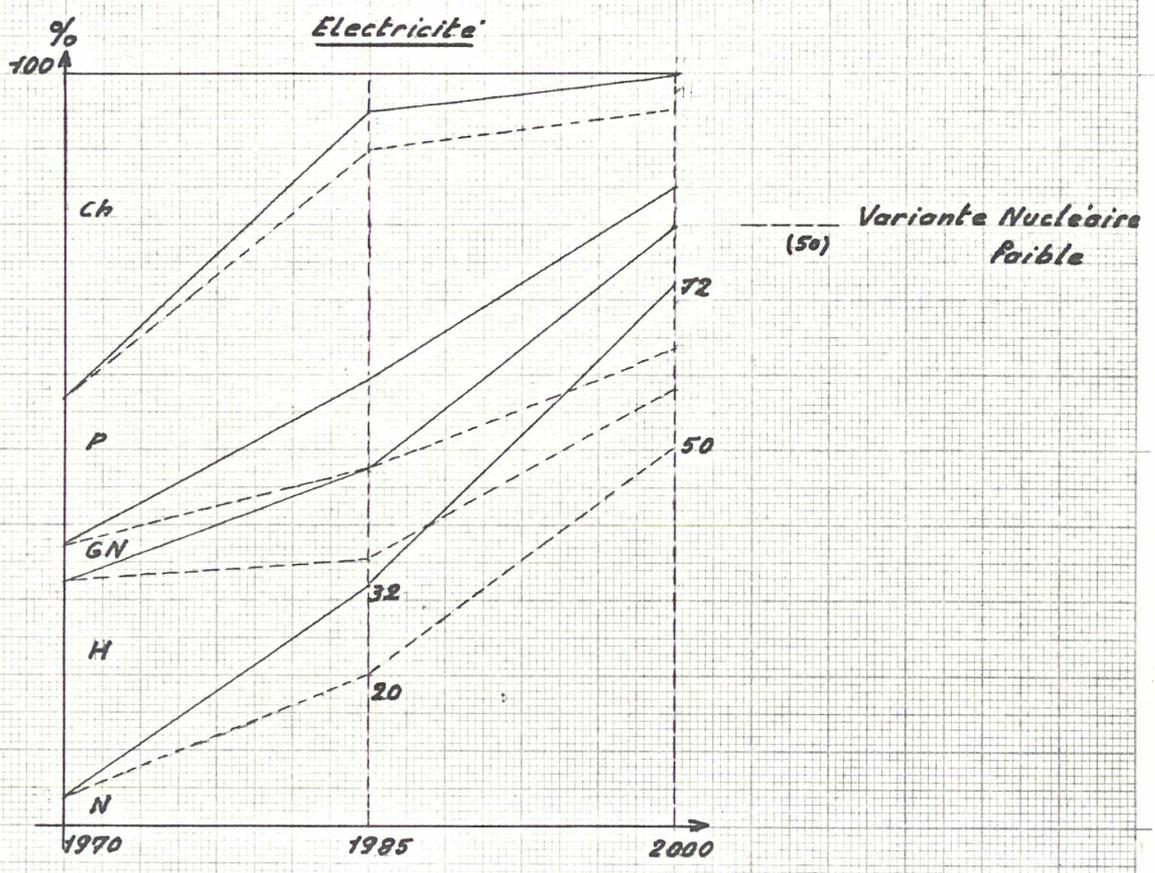
	1970	1985		2000	
		faible	fort	faible	fort
USA	1,3	20	30	50	64
EUROPE	3,7	20	32	50	72
JAPON	1,3	28	34	50	62
AMERIQUES	0,3		10		24
ASIE-OCEANIE	1,3		5		20
AFRIQUE	0		5		25
URSS	0,5		5		30
CHINE	0		5		28
PAYS COMMUNISTES	0,2		5		25

	1970	1985	2000
USA	1,3	20	50
EUROPE	3,7	20	50
JAPON	1,3	28	50
AMERIQUES	0,3	10	24
ASIE-OCEANIE	1,3	5	20
AFRIQUE	0	5	25
URSS	0,5	5	30
CHINE	0	5	28
PAYS COMMUNISTES	0,2	5	25

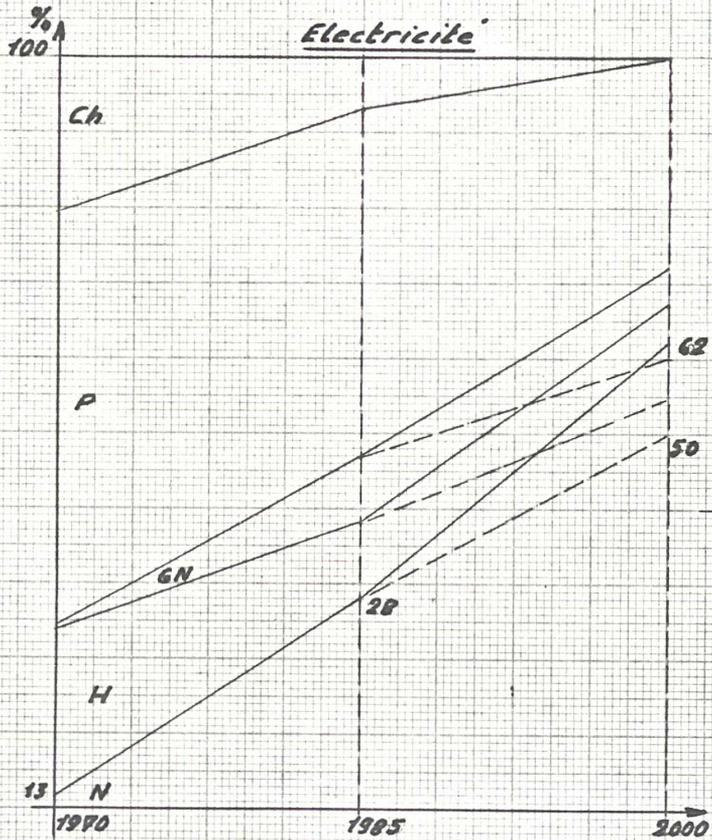
ZONE 1 U.S.A



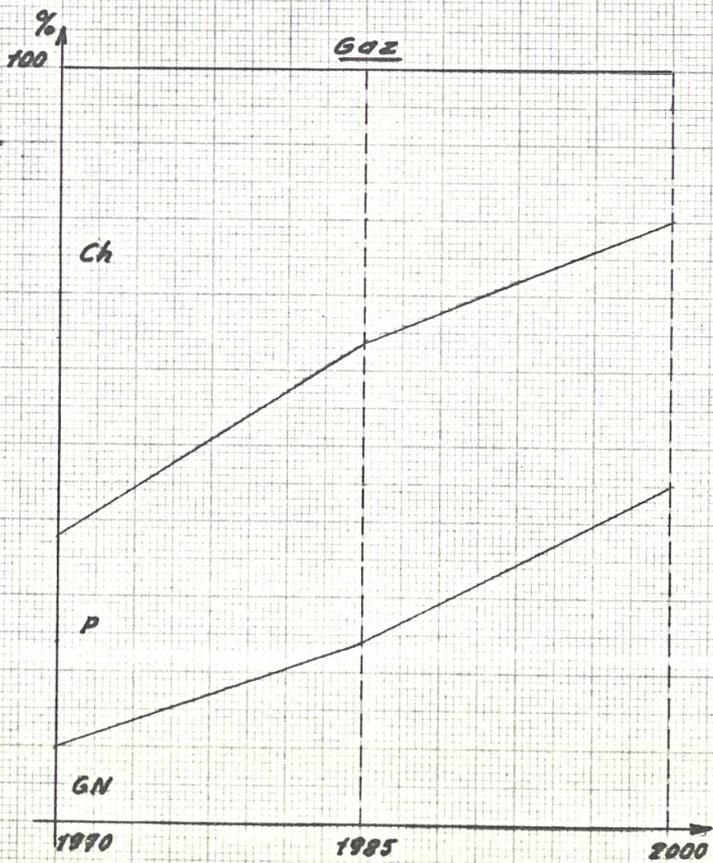
ZONE 2 EUROPE



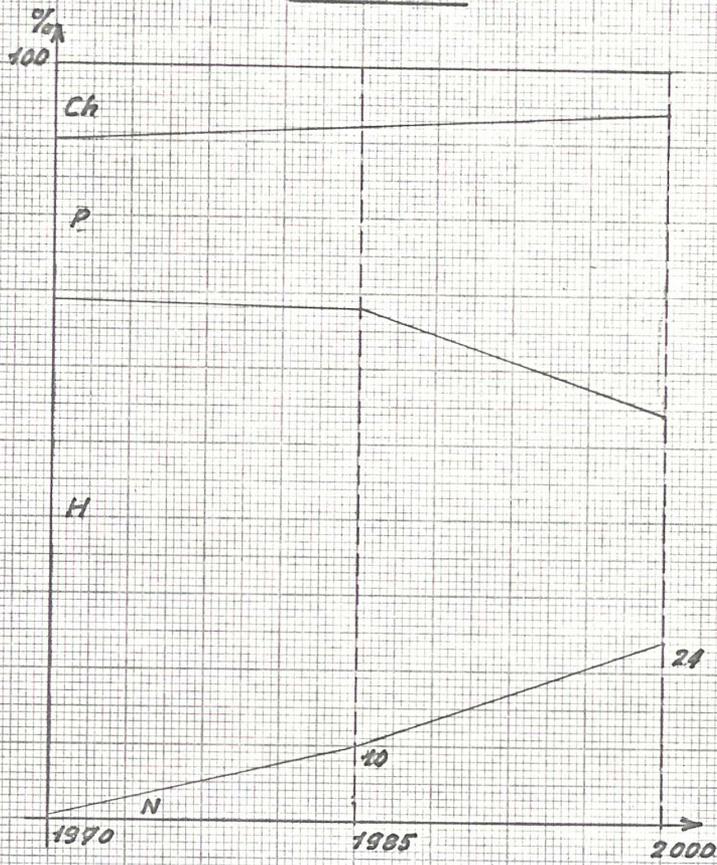
ZONE 3 JAPON



Variante Nucleaire faible

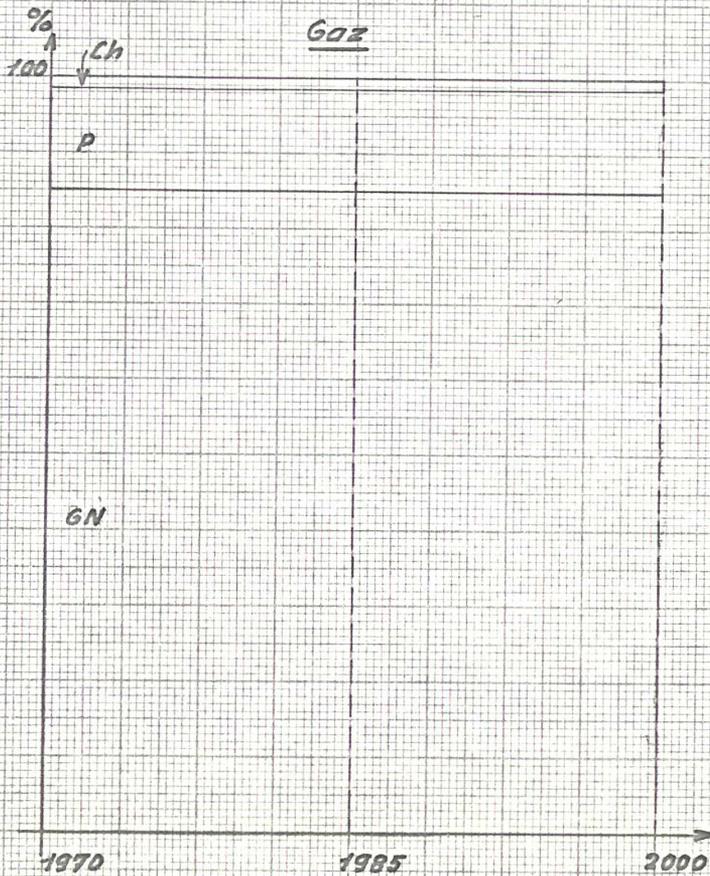


Electricité



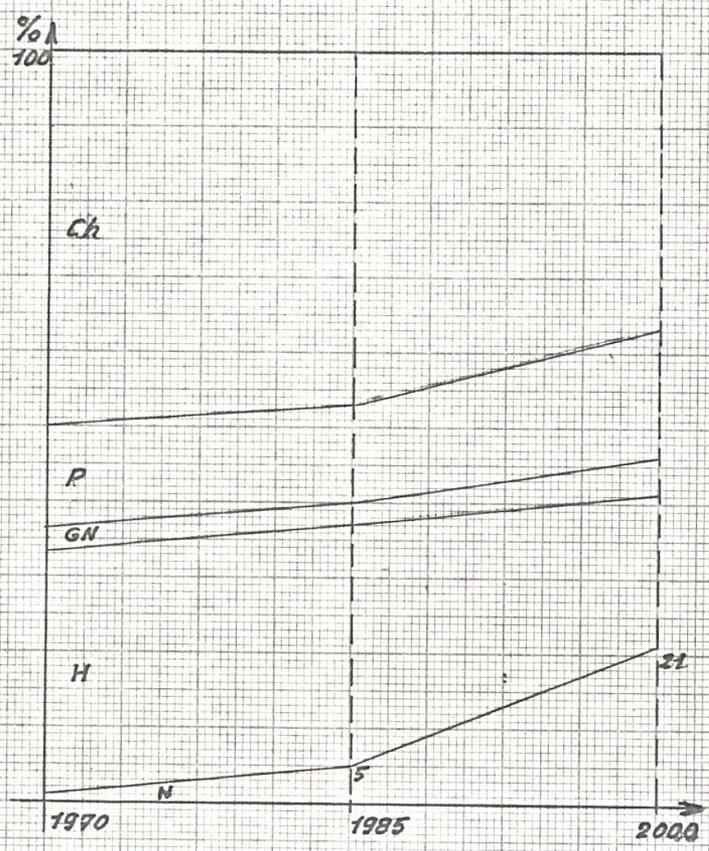
Pos. de gaz

Gaz

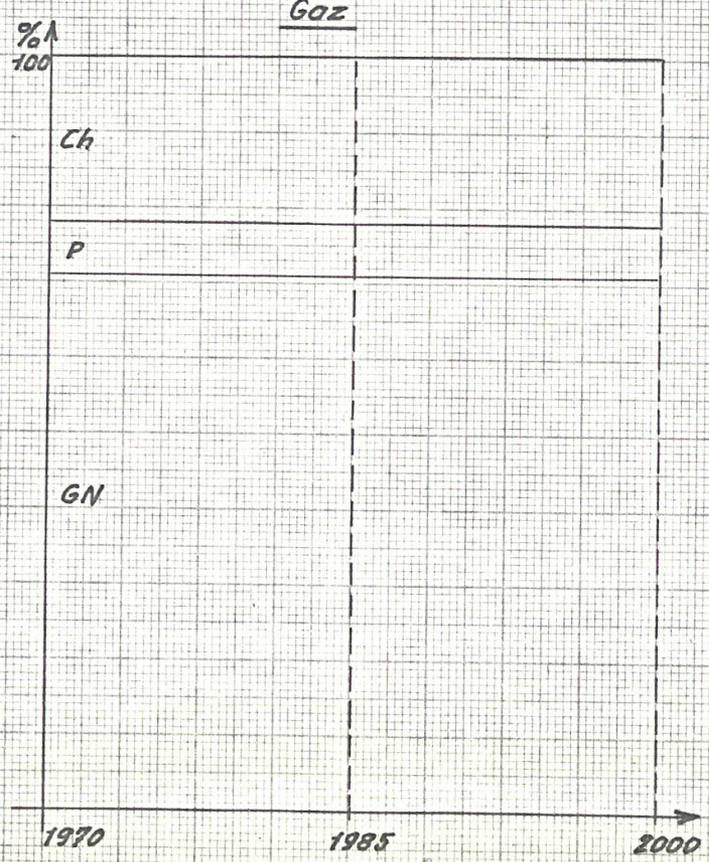


ZONE 5 ASIE. OCEANIE

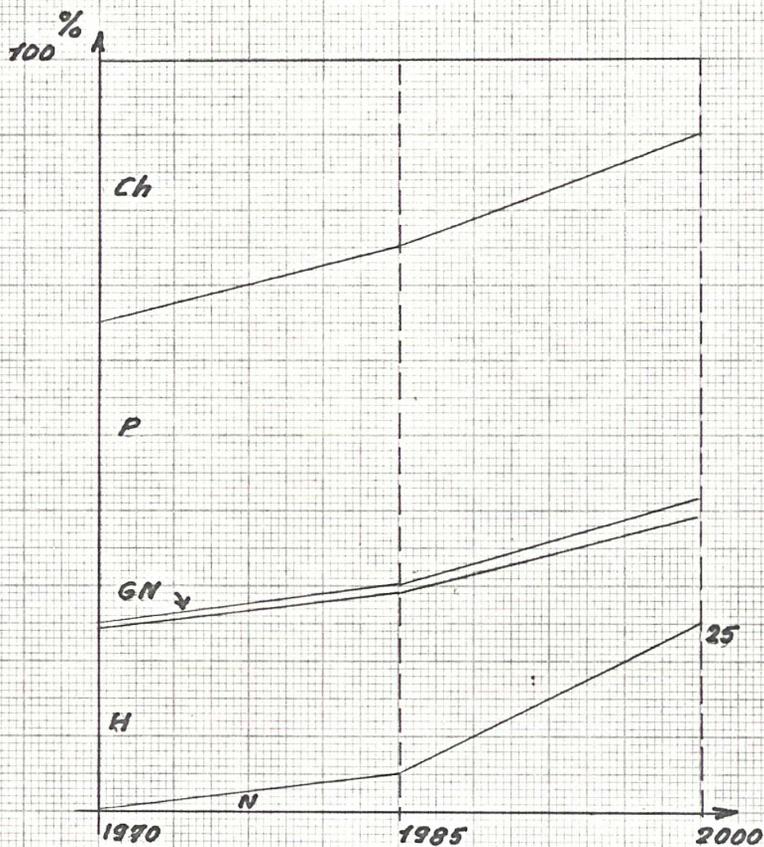
Electricite'



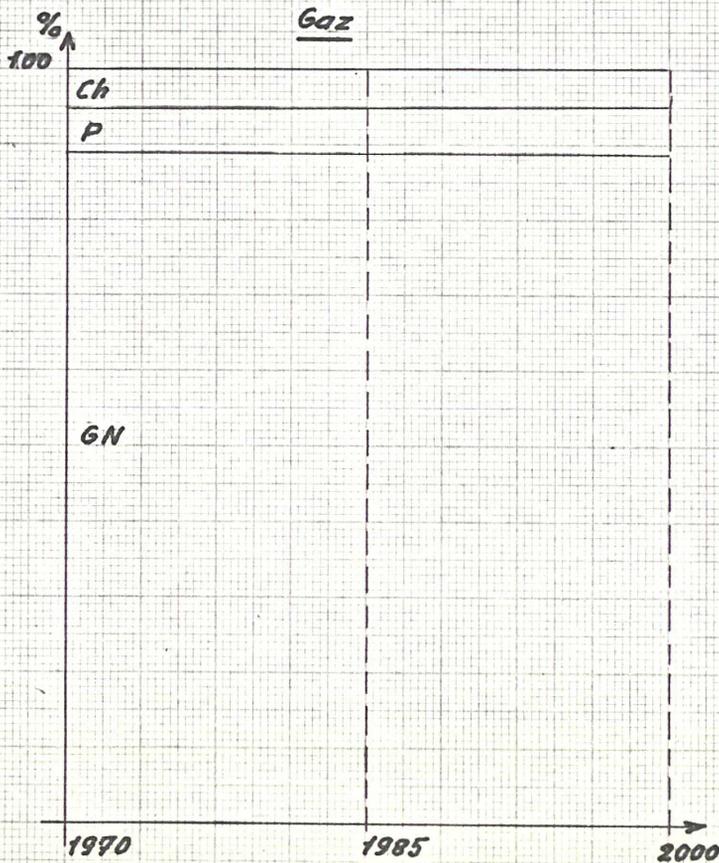
Gaz

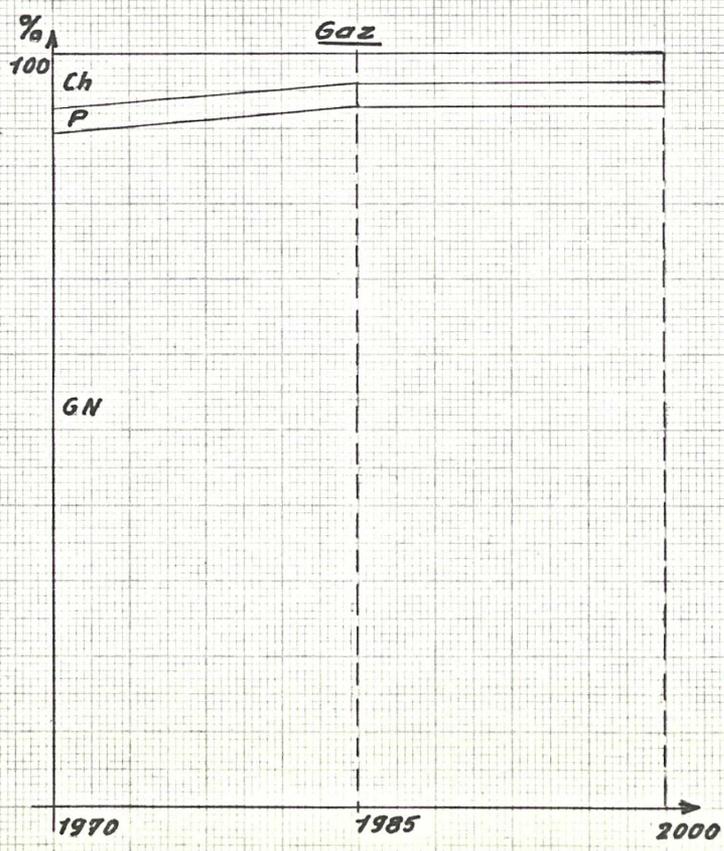
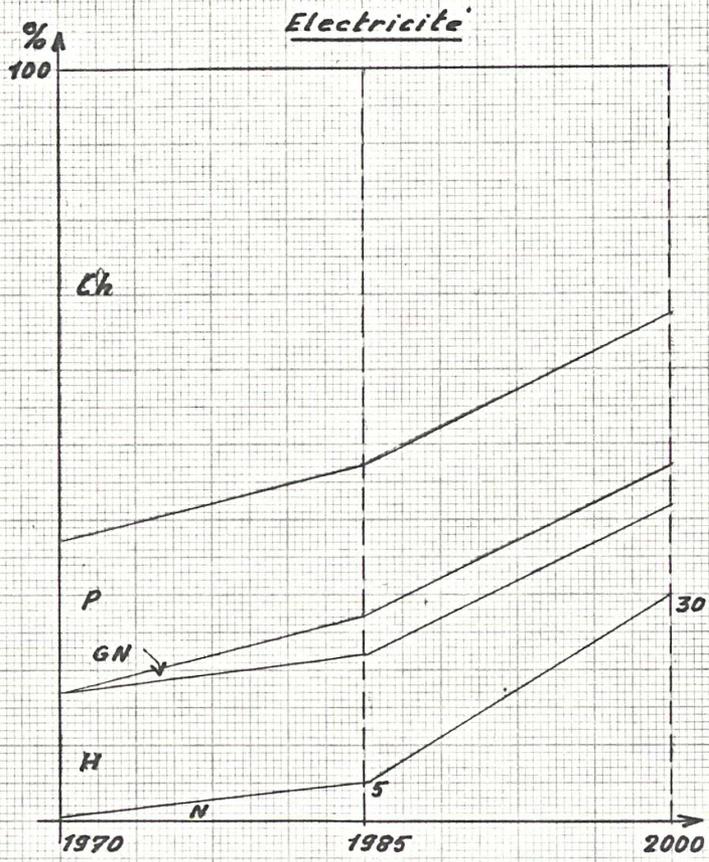


Electricite



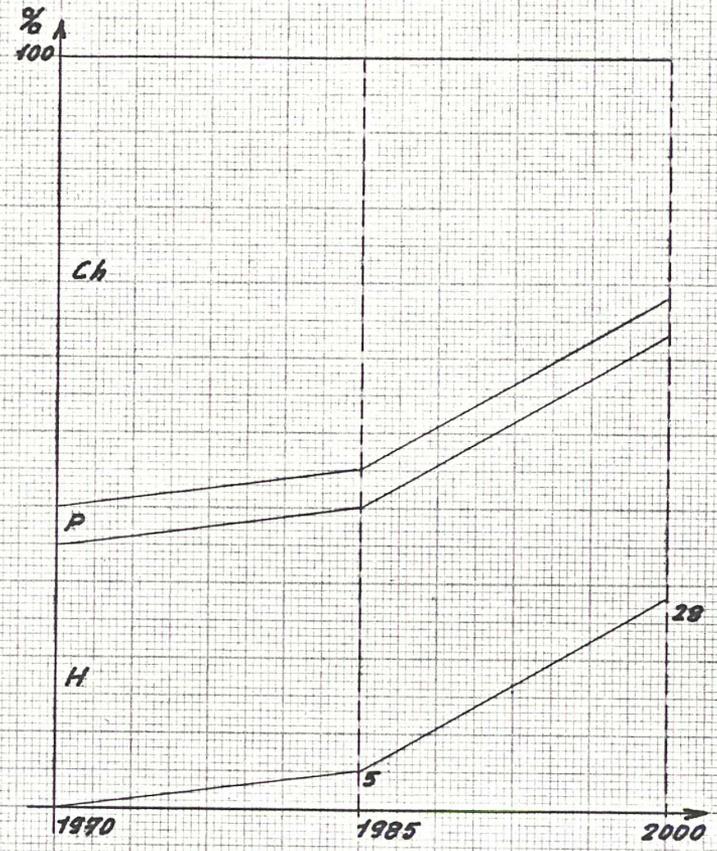
Gaz





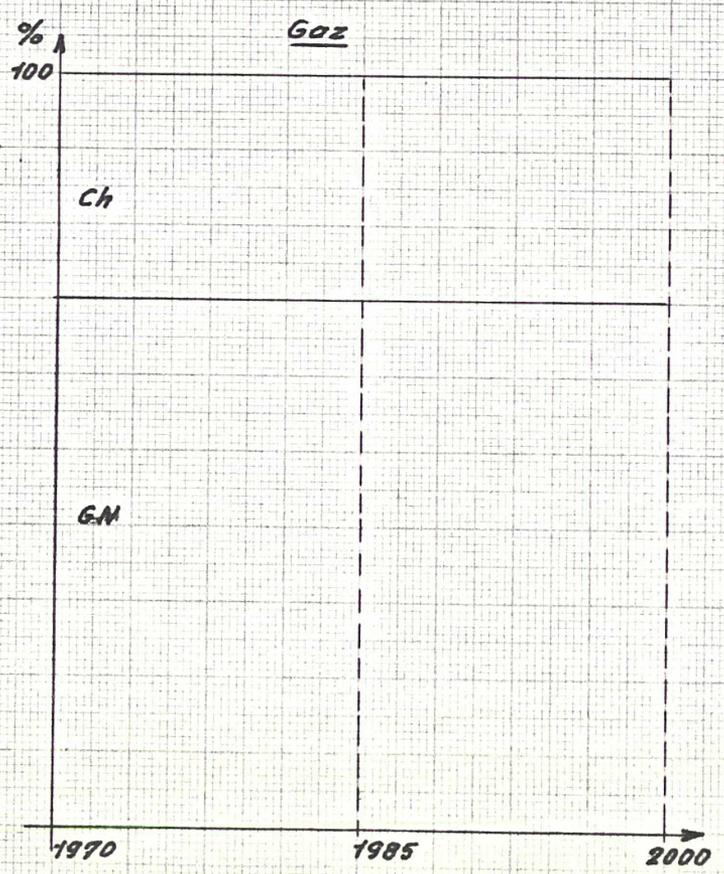
ZONE B CHINE

Electricité



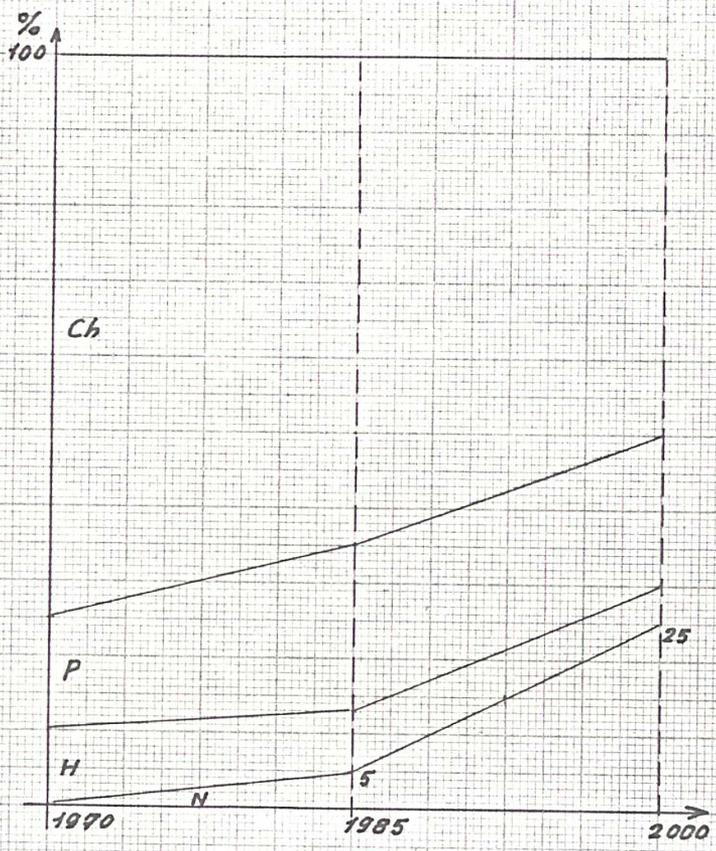
Pas de gaz

Gaz

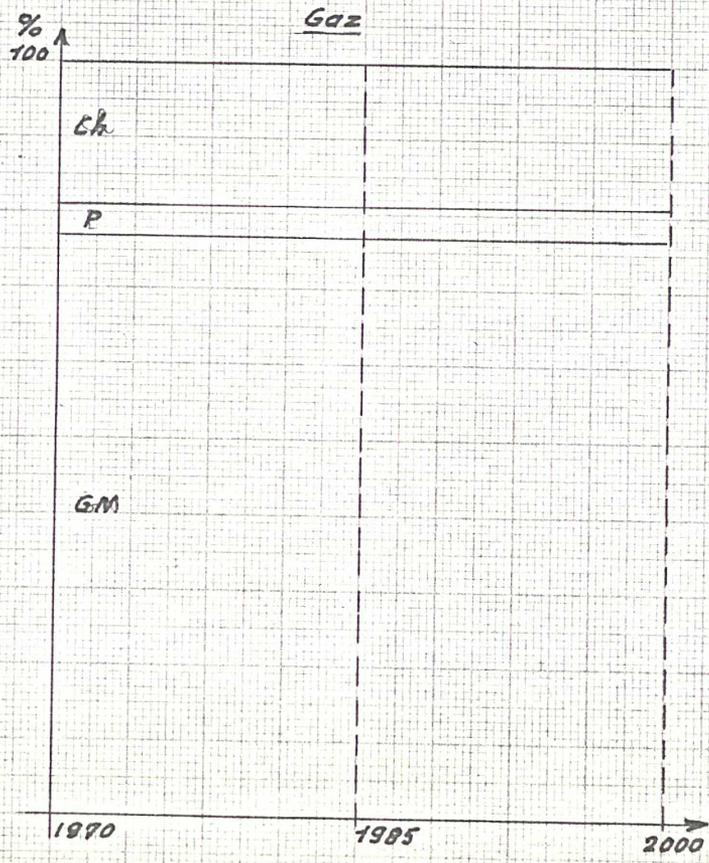


ZONE 9 AUTRES PAYS COMMUNISTES

Electricite



Gaz



Annexe II

ANALYSE DE LA CROISSANCE PASSEE
QUELQUES SCENARIOS DE CROISSANCE

I - ANALYSE DE LA CROISSANCE PASSEE

Nous donnerons quelques taux de croissance annuels pour chacune des zones étudiées. Ces taux sont tirés de l'ouvrage de J. DARMSTADTER "Energy in the World Economy". On y trouve l'étude à la fois de la production et de la consommation. Nous ne donnerons que des taux relatifs à la consommation d'énergie primaire, et le taux de croissance de l'électricité.

	1925-1965	1950-1965	1960-1965
<u>USA</u>			
<u>Total</u>	2,4	3,0	3,9
Combustibles solides	-0,4	-0,7	3,7
Combustibles liquides	4,5	3,9	3,5
Gaz naturel	6,7	6,6	4,7
Electricité d'origine hydraulique	5,1	4,4	5,0
Electricité	6,9	7,5	6,4
<u>Europe</u>			
<u>Total</u>	2,0	4,3	5,4
Combustibles solides	0,1	0,5	-0,1
Combustibles liquides	9,0	13,5	13,9
Gaz naturel	22,2	20,0	11,5
Electricité d'origine hydraulique	5,8	6,7	4,9
Electricité	6,3	8,3	7,7
<u>Japon</u>			
<u>Total</u>	4,4	8,3	10,0
Combustibles solides	2,2	3,8	2,2
Combustibles liquides	11,7	27,7	21,0
Gaz naturel	11,8	25,6	19,6
Electricité d'origine hydraulique	5,7	4,2	3,9
Electricité	8,2	10,0	11,0

	1925-1965	1950-1965	1960-1965
<u>Amériques (1)</u>			
<u>Total</u>	5,3	7,5	5,4
Combustibles solides	0,8	2,6	2,6
" liquides	6,0	7,4	4,4
Gaz naturel	9,5	11,8	10,1
Electricité d'origine hydraulique	7,2	8,9	7,9
Electricité	8,2	9,8	8,0
<u>Asie (2)</u>			
<u>Total</u>	4,3	8,0	8,9
Combustibles solides	2,6	4,8	4,0
" liquides	8,2	16,5	15,8
Gaz naturel	7,9	14,9	11,9
Electricité d'origine hydraulique	6,4	5,6	6,0
Electricité	8,4	10,9	11,5
<u>Océanie</u>			
<u>Total</u>	3,6	5,1	6,1
Combustibles solides	2,0	2,7	3,0
" liquides	8,4	8,9	9,7
Gaz naturel	-	-	-
Electricité d'origine hydraulique	8,6	9,5	11,7
Electricité	8,5	9,4	8,6
<u>Moyen-Orient</u>			
<u>Total</u>	8,4	10,3	8,1
Combustibles solides	5,5	3,7	4,7
" liquides	8,5	10,6	9,0
Gaz naturel	-	19,0	5,6
Electricité d'origine hydraulique	13,2	25,1	19,0
Electricité	12,1	14,8	9,5
<u>Afrique</u>			
<u>Total</u>	4,9	5,6	5,9
Combustibles solides	3,6	4,2	4,2
" liquides	9,0	6,9	6,9
Gaz naturel	-	45,4	105,4
Electricité d'origine hydraulique	14,2	16,3	14,5
Electricité	8,5	9,2	8,0
<u>URSS</u>			
<u>Total</u>	9,3	7,4	6,6
Combustibles solides	8,5	4,2	1,9
" liquides	9,0	10,5	8,1
Gaz naturel	18,6	23,0	23,1
Electricité d'origine hydraulique	15,5	13,1	9,5
Electricité	13,7	12,1	11,6

(1) Canada excepté

(2) Japon inclus

	1925-1965	1950-1965	1960-1965
<u>Pays Communistes d'Asie</u>			
<u>Total</u>	6,8	14,1	6,4
Combustibles solides	6,7	14,0	6,7
" liquides	6,4	36,8	4,0
Gaz naturel	-	-	-
Electricité d'origine hydraulique	-	9,6	1,7
Electricité	8,9	13,2	-2,7
<u>Pays Communistes d'Europe</u>			
<u>Total</u>	4,9	5,8	5,0
Combustibles solides	4,6	4,9	3,6
" liquides	6,5	12,5	13,2
Gaz naturel	7,5	13,4	12,4
Electricité d'origine hydraulique	9,1	11,5	11,1
Electricité	9,6	9,7	8,5
<u>Monde</u>			
<u>Total</u>	3,3	5,0	5,3
Combustibles solides	1,6	2,5	2,8
" liquides	6,2	7,6	7,6
Gaz naturel	7,6	9,0	8,3
Electricité d'origine hydraulique	6,3	6,6	5,5
Electricité	7,4	8,8	7,7

II - QUELQUES SCENARIOS DE CROISSANCE

Deux scénarios sont présentés dans le tableau ci-après : une hypothèse de croissance faible et l'autre de croissance forte. Dans les deux cas, il s'agit d'hypothèses moyennes, c'est-à-dire ni très faibles, ni très fortes. Un jeu d'hypothèses très faible est donné entre parenthèses pour les pays développés. Nous avons également testé un jeu d'hypothèses fortes pour certains pays en voie de développement (1,5 - 8 - 8 - 10).

Les deux scénarios supposent un ralentissement de la croissance de la consommation pour les pays développés, et une croissance continue des pays sous développés (prolongation de tendances). A partir de là, il est facile d'examiner des hypothèses beaucoup moins "moyennes".

Les valeurs données sont des taux de croissance annuels en %

- par secteur pour les trois premières zones, dans l'ordre

Industrie

Transport

Domestique et Tertiaire

- par énergie secondaire pour les autres, dans l'ordre

Combustibles solides
Combustibles liquides
Combustibles gazeux
Electricité

Ces taux ont été estimés à partir des tendances passées, compte tenu des quelques publications existantes.

		croissance faible		croissance forte	
		1970-1985	1085-2000	1970-1985	1985-2000
USA	I	4	3,5 (1,5)	5	4
	T	3,5	2,5 (1)	4	3
	D	3	2,5 (1)	3	3
EUROPE	I	4	3,5 (1,5)	5	4,5
	T	3,8	3 (1)	4,8	4
	D	3,5	3 (1)	4,5	4
JAPON	I	6	5 (3)	7	6
	T	5	3 (2)	6	4
	D	5	4 (2)	6	5
AMERIQUES	C	2	1	2	1
	P	6,5	5	6,5	5
	G	8	7	10	8
	E	7	6	10	7
ASIE OCEANIE	C	2	2	2	2
	P	6	6	8	7
	G	6	6	8	7
	E	8	7	9	8
AFRIQUE MOYEN-ORIENT	C	2	1	2	1
	P	5	5	5,5	6
	G	7	5	10	6
	E	7	7	8	8
RUSSIE	C	1	1	2	1
	P	5,5	4	6,5	5
	G	6	5	7	6
	E	5	5	7	7
CHINE	C			5	3
	P			6	5
	G			10	6
	E	-	-	6,5	7
AUTRES PAYS COMMUNISTES	C	1	1	1	0
	P	6	5	6	5,5
	G	6	5	6	5,5
	E	6	6	7	7

ANNEXE IIIBIBLIOGRAPHIE

Nous n'indiquons ici que les sources de données qui nous ont paru les plus intéressantes.

- 1) Statistiques de l'ONU "World Energy Supply"
- 2) Statistiques de l'OCDE "
- 3) "Energy in the World Economy"

J. DARMSTADTER

the Johns Hopkins Press
Baltimore and London

- 4) USA Publications du MITRE
- 5) JAPON "Energy in Japan"

Revue trimestrielle, contenant des statistiques détaillées et des études prévisionnelles. Voir en particulier le supplément au vol n°16 de Mars 1972, qui donne des prévisions très détaillées jusqu'en 1985.

6) AFRIQUE

"Etude des conditions économiques en Afrique, 1970"
ONU 1971

Le chapitre 6 est consacré à l'énergie (pp 97-108)

7) AMERIQUE

Il existe une étude de la CEPAL, non encore publiée, donnant une analyse de la consommation et des prévisions jusqu'en 1985 pour l'Amérique Centrale

"Evaluation regional del sector energia"
E/CN-12/CCE/SC 5/93
TAO/LAT/127 Janvier 1973

Cette étude donne quelques précisions sur la consommation de chaque secteur.

8) URSS

- "L'URSS en 1975 et 1980" M. BEAUCOURT
Courrier des Pays de l'Est n° 150 Mars 1972
pp 5-66

Doit paraître dans "Notes et Etudes Documentaires"

- "Le rôle du charbon dans les ressources énergétiques de l'URSS"
M. N.V. MEL"NIKOV

Canadian Mining and Metallurgical Bulletin
Vol 65-N° 722 Juin 1972

Perspectives 2000

9) CHINE

- Rivista Italiana del Petrolio
Anno 39 N° 9 30/9/71 pp 367-376