

# JOURNAL DE LA SOCIÉTÉ STATISTIQUE DE PARIS

ROBERT GIBRAT

## **L'analyse des données (2e partie)**

*Journal de la société statistique de Paris*, tome 119, n° 4 (1978), p. 312-331

[http://www.numdam.org/item?id=JSFS\\_1978\\_\\_119\\_4\\_312\\_0](http://www.numdam.org/item?id=JSFS_1978__119_4_312_0)

© Société de statistique de Paris, 1978, tous droits réservés.

L'accès aux archives de la revue « Journal de la société statistique de Paris » (<http://publications-sfds.math.cnrs.fr/index.php/J-SFdS>) implique l'accord avec les conditions générales d'utilisation (<http://www.numdam.org/conditions>). Toute utilisation commerciale ou impression systématique est constitutive d'une infraction pénale. Toute copie ou impression de ce fichier doit contenir la présente mention de copyright.

NUMDAM

Article numérisé dans le cadre du programme  
Numérisation de documents anciens mathématiques  
<http://www.numdam.org/>

## COMMUNICATIONS

## L'ANALYSE DES DONNÉES

(2<sup>e</sup> Partie)**LES SCIENCES HUMAINES : impasses, échecs et succès**

(Communication faite le 24 mai 1978 à Nice devant l'Association des statisticiens universitaires et les Sociétés de statistique de Paris et de France)

ROBERT GIBRAT,

*Président des Sociétés de statistique de Paris et de France,  
Membre de l'Institut international de statistique,  
Ancien président de la Société des ingénieurs civils de France*

*Dans la première partie, nous avons étudié essentiellement les applications aux techniques industrielles, ici nous commençons l'étude de certaines applications significatives tentées dans des domaines très différents appartenant aux sciences humaines, ceci pour préciser et enrichir nos conclusions.*

*Nous avons tenté d'établir, dans ce premier texte, une esquisse de la théorie des « oracles » dans sa forme moderne : prévision à long terme par consultation d'experts, méthode Delphi par exemple. La recherche d'une opinion « moyenne » est encore aujourd'hui dans l'enfance, la notion de « distance » entre experts doit être approfondie, il n'est pas sûr qu'au bout de la recherche, il y ait une solution. Résultats un peu décevants.*

*Décidément, comme l'avait déjà dit Plutarque, la Pythie ne rend toujours pas ses oracles en vers...*

*In the first part, we had mostly studied the applications to the "industrial technics", and now we undertake the study of some significant applications made in very different fields of the "social sciences" in order to precise and deepen our findings.*

*We have tried to establish, in this paper, an outline of the theory of oracles, in its up-*

*to-date form : long range forecast by experts' consultations, Delphi method for instance. The research of an "average" opinion is still nowadays at its beginning, the notion of "distance" between experts must be deepened and it is not sure that this research will lead to a solution. Results which are a little disappointing.*

*So, as Plutarch said, Pythia does not always pronounce her oracles in verses.*

« Le grotesque phénomène généralement connu comme statistique mathématique », J.-R. Anscombe, Stat. Soc., Série B, 29 janvier 1952.

#### AVANT-PROPOS

La première partie a fait l'objet d'une conférence aux Sociétés de statistique de France et de Paris le 17 novembre 1977. Elle étudiait tout spécialement l'analyse des correspondances à laquelle le professeur Benzecri et ses élèves ont tant apporté sur le plan théorique depuis quinze années. Nous avons estimé que : « son succès auprès des jeunes chercheurs, son utilisation de plus en plus fréquente dans l'industrie en particulier pour les problèmes de l'environnement d'une part, les critiques aiguës dont elle a fait l'objet, souvent de la part de personnalités de premier plan, d'autre part, méritaient une attention toute particulière ». Nous avons conclu : « A ne pas mettre entre toutes les mains. Exiger qu'une réflexion profonde puisse précéder le choix des données et la mise en route d'un programme. Ne pas se laisser impressionner par la technologie des calculs. Tels sont les conseils à donner aux utilisateurs. Ils paraissent, aujourd'hui, absolument nécessaires. Ce serait, cependant, à notre avis, une grande erreur de se refuser à utiliser pleinement l'analyse des données et particulièrement celle par correspondances sous prétexte que cela est difficile. »

Nous avons, dans la première partie, étudié essentiellement les applications aux techniques industrielles; ici, dans la deuxième partie, nous étudierons certaines applications significatives de l'analyse des données tentées dans des domaines très différents appartenant aux « sciences humaines », prévision à long terme (problème des oracles), diagnostic en médecine, statistique des « valeurs littéraires », facilité ou difficulté des structures musicales, etc.

Ceci nous permettra, peu à peu, de préciser et enrichir les conclusions précédentes.

Ces applications n'ont pas été toutes couronnées de succès, il s'en faut de beaucoup. Échec par insuffisance de techniques statistiques, impasse par étude prématurée ou mauvaise orientation, peut-être, ou raisons fondamentales? Nous en discuterons pour chaque cas.

Nous n'avons pas cherché dans ce premier essai que nous présentons ici à être complet ou à porter un jugement définitif. Nous n'avons pu faire de recherche bibliographique approfondie, elle sera d'ailleurs très difficile, nous avons simplement utilisé des documents français en général, venus à notre portée, dialogué avec certains de leurs auteurs, essayé d'approfondir leurs motivations et leurs difficultés.

L'occasion nous en a été fournie par un message des Sociétés de statistique de France et de Paris que nous avons, comme président de celles-ci, à adresser aux statisticiens universitaires réunis dans leur congrès annuel (Nice, 24 mai 1978). Nous y avons traité le problème des oracles. N'ayant été, en statistique, ni élève, ni professeur, il ne pouvait être question de les rejoindre en compétence et en érudition, mais de leur présenter les réflexions d'un ingénieur de bonne volonté, si amoureux de leur domaine que déjà au lycée ses camarades lui avaient donné, par moquerie, en seconde, le surnom de « Statistique » après lui avoir donné celui de « Logarithme » en quatrième.

A. LA PRÉVISION À LONG TERME PAR CONSULTATION D'EXPERT, OU POURQUOI LA PYTHIE NE REND PLUS SES ORACLES EN VERS (De Pythiae oraculis, PLUTARQUE)

I — Introduction

Nous voulons, ici, esquisser une théorie des oracles en nous appuyant sur les méthodes modernes de l'analyse des données. L'homme a, depuis qu'il existe, toujours senti le besoin profond de prévoir l'avenir et de croire aux prédictions recherchant dans celles-ci des conseils avant l'action, conseils d'origine divine autrefois, d'origine plus complexe aujourd'hui mais encore aussi mystérieuse.

Il nous paraît nécessaire de remonter dans l'Histoire afin de mieux comprendre les efforts contemporains.

Les oracles jouaient, dans l'Antiquité gréco-romaine, un rôle dans l'agitation politique analogue à celui de nos journaux et de nos mass média. « Ce qu'il y a de certain, écrivait Cicéron, dans son livre sur la Divination, prévoyant nos Futuribles, c'est que je ne vois aucune nation, si éclairée et si savante, ni si grossière et si barbare qu'elle soit, qui ne croit à une révélation de l'avenir et qui ne reconnaisse à quelques-uns la faculté de la prédire. » Nous ne reprendrons pas la célèbre « Histoire des oracles » de Fontenelle (1687) ou les théories subtiles dérivées de la gnose dues à Jamblique, dans « De mysteris » (vers 300 après J.-C.). Nous rappellerons l'ensemble le mieux structuré, celui de l'oracle de Delphes. Il a joué un rôle politique presque incroyable : création des fédérations des cités grecques, fondation de leurs colonies, directives politiques aux chefs d'État et rites de purification morale aux pèlerins, etc., etc. Il y a eu des difficultés politiques. Il lui fut reproché d'abord d'être favorable aux Doriens, donc aux régimes aristocratiques et ainsi de mécontenter les Ioniens plus démocratiques, puis d'avoir « médisé », « laconisé », « philippisé » (1). Il a subsisté, cependant, plus de mille ans, ne disparaissant qu'après la mise hors la loi du paganisme (du VII<sup>e</sup> avant J.-C. au IV<sup>e</sup> après).

Le mécanisme était très complexe : la Pythie, en général une vieille femme ignorante (il y en a eu jusqu'à trois aux époques prospères), exprimait *en transe*, assise sur un trépied au-dessus de la célèbre exhalaison, des paroles incohérentes, recueillies, rédigées et conservées par un des *prophètes*. Des *exégètes* se chargeaient ensuite d'expliquer le sens de l'oracle aux intéressés. Prophètes et exégètes étaient des fonctionnaires du culte, à la tête duquel étaient placés deux *prêtres*. Plutarque fut le plus célèbre d'entre eux (90 à 126 après J.-C.).

Comme on le voit, rien à envier à la complexité de nos équipes modernes; bien au contraire, celles-ci auraient souvent intérêt à distinguer les rôles de Pythie (collectrice de données), prophète au sens grec (mise en ordre) et exégète (discussion et conclusions).

Les sondages « politiques » ont, tout récemment encore, démontré leur insuffisance totale en « exégètes »; leur technique de cueillette est indiscutable, mais les problèmes posés par la prévision ne sont même pas esquissés. Les sondages « économiques », aussi nombreux, sont plus ambitieux et font de grands efforts. Une méthode particulière, la méthode Delphi, au nom pythien, est aujourd'hui très à la mode.

Elle consiste dans une double consultation, de nombreux experts permettant à ceux-ci avant leur avis final de prendre connaissance de certains résultats préliminaires d'ensemble. De nombreuses questions sont posées à la fois (200 par exemple). Les Anciens utilisaient

1. C'est-à-dire d'avoir été successivement favorable aux Mèdes, aux gens de Sparte et enfin à Philippe de Macédoine.

aussi parfois cette consultation multiple et l'histoire du stratège Nicias est connue de tous. (Fustel de Coulanges, *La Cité antique*; Plutarque, *Vies parallèles*). Rappelons-la brièvement. En 415 avant J.-C., l'Assemblée des citoyens athéniens délibérait sur l'opportunité d'une expédition en Sicile contre Syracuse. Alcibiade était pour, Nicias contre. Les devins du premier prédisaient que les Athéniens trouveraient la gloire, ceux de Nicias annonçaient que tous les présages étaient défavorables. L'oracle d'Ammon, en Lybie, consulté par ambassade, annonça que les Athéniens feraient prisonniers tous les Syracusains. L'oracle de Dodone et d'autres nombreux présages furent soigneusement cachés à l'Assemblée; l'expédition fut décidée. Cette consultation « d'experts », cette méthode Delphi avant la lettre, se termina par le désastre total d'Athènes et la mort de Nicias et de tous les Athéniens ou leur emprisonnement dans les célèbres Latomies.

Les adeptes de Delphi tentent de trouver un « consensus » entre les experts sur l'ensemble des questions en recherchant des experts-*types* et même un expert-*central* ou en prenant des moyennes. Nous en verrons les résultats dans IV. Il semble que ce soit une impasse qu'il n'y ait pour le moment aucune bonne méthode automatique et qu'il faille se contenter de remarques de bon sens au vu des résultats.

Le retour à l'*oracle unique* se remarque, aujourd'hui, dans les remarquables travaux d'une équipe commune E. D. F.-C. E. A. qui (III) pense déterminer les quelques facteurs dominant l'avenir dans un ensemble de facteurs possibles. Un jugement est porté par un individu sur l'existence ou non d'une influence positive ou négative d'un facteur sur un autre. Pour 51 facteurs, on dispose ainsi d'une matrice  $51 \times 51$ , rassemblant les 2 601 réponses.

Une étude statistique de ces influences, grâce à un programme spécial sur ordinateur permet de structurer ces liaisons et de mettre en évidence les plus intéressantes. Pour le moment, il semble que l'on en soit resté au plan qualitatif. C'est un grand pas, certes, mais il devra être complété sur le plan quantitatif.

Toutes ces recherches ont obligatoirement une philosophie sous-jacente. Ainsi, pour l'équipe C. E. A.-E. D. F., il s'agit « de la prise en compte dans la mesure du possible du qualitatif en plus du quantitatif, du rejet de l'explication causale, du présent envisagé comme un état dynamique et concret de tension entre les forces orientées vers l'avenir et leur blocage par des forces agissant en sens contraire qui tendent à empêcher son développement ».

Nous sommes là très voisins, avec ces liens spéciaux du passé et du futur, de la philosophie des Stoïciens sur les oracles, pour lesquels « aucun fait n'existe qui ne soit rattaché par des rapports nécessaires à tout l'ensemble des faits présents, passés ou futurs. L'homme ne peut lever un doigt, disaient-ils, sans que l'effet n'en retentisse dans le monde entier. Les rapports sont cachés à la raison humaine, mais ils n'en existent pas moins » (R. Flacelière). En bref, l'état actuel du monde contiendrait « en puissance » tous ses états futurs. Nous avons, dans les écrits C. E. A.-E. D. F., aussi une notion de blocage. Elle était nette déjà chez Plutarque, supérieur hiérarchique de la Pythie : « L'exhalaison fait tomber les barrières entre l'homme et Dieu. » Naturellement, il reste des problèmes. « L'âme de la Pythie est pour le Dieu un instrument. La nature de cet instrument n'est pas indifférente, le Dieu doit en tenir compte et sa pensée ne nous parvient ainsi qu'à travers un écran plus ou moins épais, elle en est toujours contaminée, de même que la lune nous renvoie les rayons du soleil, mais non pas exactement tels qu'elle les a reçus. »

Constatation bien étrange, tous les grands philosophes grecs s'efforcent inlassablement de justifier rationnellement les oracles. Platon pour qui « la raison prime tout grâce à la dialectique, l'explique par un obscurcissement de la raison », théorie de « l'enthousiasme » au sens premier du mot (dans le Larousse, exaltation produite par l'inspiration divine).

Aristote, plus obscur, veut lier l'« enthousiasme » aux tempéraments « mélancoliques » créés par un excès de bile noire. Avouons que c'est un peu dommage, mais tout cela explique les incohérences. Incohérences dont, en forçant peut-être un peu la note, nous l'avouons, nous avons retrouvé la notion très bien exploitée, toujours par la même équipe C. E. A.-E. D. F., dans la méthode Delphi (III).

En effet, on questionne l'expert, par exemple, sur l'arrivée possible de certains événements qui semblent dominants pour l'avenir dans un problème donné. On lui demande non seulement la probabilité de l'arrivée d'un événement, mais aussi celles de l'arrivée de cet événement si un autre est réalisé ou s'il ne l'est pas. Avec six événements nous avons six probabilités simples et deux fois trente probabilités conditionnelles, au total 37 nombres-réponses liés par toute la série des relations mathématiques bien connues entre probabilités simples et conditionnelles. L'expert naturellement a répondu de bonne foi au mieux et ses réponses ne respectent pas ces lois. C'est son « incohérence ». Il fallait à la Pythie un « prophète » pour les corriger et introduire la cohérence. Il faut à la méthode Delphi un programme d'ordinateur qui, naturellement (et ceci à notre grand regret, car nous n'aimons pas la méthode des moindres carrés) va tout simplement minimiser la somme des carrés des écarts et de là en tirera les probabilités des  $2^6 = 64$  scénarios que l'on peut construire avec les six événements.

Dernière analogie entre les Grecs et nous; presque tous, ils attribuaient les valeurs prophétiques à l'*enthousiasme*, personnellement nous les attribuons à l'*optimisme*, vertu plus sereine, mais voisine. En effet (II), la comparaison sur un même problème avec la méthode Delphi de plusieurs méthodes classiques ne comportant pas de consultation d'experts montre que ceux-ci sont résolument optimistes. Nous essayons dans la suite (II) de le justifier par les conditions psychologiques de la consultation montrant que ceci les amène à être plus près de la vérité que d'autres méthodes faisant moins de part à l'intuition ou à l'émotion. (La comparaison avec les conditions de la Pythie paraîtra évidente.)

Tout ceci va être discuté sur le plan statistique dans ce qui suit et notre conclusion pour reprendre le titre d'un des dialogues de Plutarque, sera que « la Pythie ne rend plus ses oracles en vers »; elle s'exprime, hélas aujourd'hui en prose; trop de difficultés sont encore sur sa route mais des efforts sérieux sont faits et il ne convient pas d'être comme Diogène Le Cynique qui « quand il voit des interprètes des songes et des devins est tenté de considérer l'homme comme la plus sotte créature qui fût au monde ».

## II — Un oracle moderne : Delphi

Nous prendrons, comme exemple d'oracle moderne, une société d'ingénieurs-conseils S. C. I. E. N. C. E., fondée par d'anciens directeurs ou chefs de services d'Euratom et leurs études sur l'avenir de l'hydrogène comme vecteur énergétique <sup>(1)</sup> <sup>(2)</sup> et ceci pour trois raisons :

1. Nous y avons pris part, ayant été un des experts consultés et pouvons ainsi traiter des problèmes psychologiques correspondants.

2. Deux méthodes différentes ont été utilisées successivement en parallèle avec Delphi. La comparaison est très instructive.

1. Scénarios pour une économie de l'hydrogène en 1985 et en 2000 par C. Valette, L. Valette, M. Siebker, J. Leclercq. Journées internationales d'études sur l'Hydrogène (Liège, 15-18 novembre 1976).

2. Étude prolongée récemment pour le compte d'EURATOM (Document Ispra, 15 février 1978). Nous y reviendrons, en IV, l'esprit étant très différent.

3. Le sujet de l'hydrogène est très à la mode <sup>(1)</sup>. Il touche de près les problèmes aujourd'hui essentiels de la croissance économique, du développement de l'électronucléaire et de la qualité de la vie. Chacun pourra ainsi juger de l'intérêt des résultats obtenus par ces mécanismes de prévision. Mais trois problèmes difficiles réclameront, à la fin de cette description, des solutions statistiques aussi sûres que possible : cohérence des diverses réponses d'un expert donné, cohérence entre experts et recherche d'un consensus éventuel, recherche automatique des variables principales. Ainsi seulement notre prévision pourrait être structurée comme à Delphes (Pythie, prophètes, exégètes et prêtres). Hélas, nous en sommes encore loin.

#### 1. Première méthode

On lui a donné le nom de Delphi, évoquant la filiation pythique : 86 personnalités de 13 pays différents, experts dans le domaine de l'hydrogène, secteur énergétique (consommateurs et producteurs), secteur de la planification économique, énergétique ou politique, ont chacun répondu, fin 1974, à près de 200 questions demandant des réponses chiffrées :

- structure de la consommation d'énergie primaire en 1985 et 2000;
- production, stockage et utilisation de l'hydrogène en 1985 et 2000, contribution des différentes sources d'énergie primaire utilisables et des différents procédés de production;
- date de pénétration dans les différents secteurs, etc., etc.

Dans un premier tour, les réponses ont été classées, médianes et interquartiles pour chaque question calculée. Le tout a été communiqué à chaque expert qui a pu, ainsi, les comparer à sa propre réponse. On le priait, cependant, de rédiger ses raisonnements, s'il était pour certaines questions en dehors des interquartiles et maintenait cependant son point de vue (son attention était attirée dans ce cas par la reproduction en rouge des chiffres de sa réponse). Cela aurait conduit pour le deuxième tour à réduire l'espace interquartile et, déclare S. C. I. E. N. C. E. « à mettre en évidence » une sorte de « consensus » sur les différents aspects de la pénétration de l'hydrogène dans le marché énergétique. Or, ce « consensus » est loin d'être clairement exprimé et la *cohérence* entre les experts reste une notion difficile et encore obscure <sup>(2)</sup>.

Voici, par exemple, les pourcentages d'après l'ensemble des experts de l'importance relative des sources d'énergie primaire. (Voir tableau page suivante.)

La somme des médianes ne fait pas 100 % comme il convient, ce qui stupéfie toujours les profanes. Les écarts relatifs, pour la part de la fission nucléaire, sont plus grands en 1985 qu'en l'an 2000. L'accord est mieux réalisé sur l'arrivée du nucléaire, avec 50 %, que sur sa date de pénétration réelle.

1. Nous avons fait une conférence, le 11 janvier 1978, à l'Institut français de l'énergie sous le titre provocateur « La civilisation de l'hydrogène ». Les propriétés de l'hydrogène, en effet, vis-à-vis de l'environnement sont très précieuses. Sa combustion dans l'oxygène donne simplement de l'eau, oh ! merveille ! Sa forme gazeuse facilite considérablement le stockage, le transport et l'utilisation. L'hydrogène remplaçant le pétrole dans les automobiles et les avions ; l'hydrogène rajeunissant, grâce à ses excellentes propriétés de réducteur, de nombreuses industries, particulièrement la sidérurgie ; l'hydrogène procédé discret de chauffage, d'éclairage et de force motrice dans nos maisons. Seul obstacle, mais de taille : son coût de production actuel à partir de l'eau est trop élevé. Deux méthodes sont étudiées avec force : l'électrolyse et les cycles thermochimiques (chaleur et eau). Voir aussi l'ensemble d'articles sur l'hydrogène dans *Sciences et Techniques*, n° 19, décembre 1976, pp. 9 à 50.

2. Cf. dans l'introduction l'affaire Nicias.



TABLEAU I

## Source d'énergie primaire

| Pourcentage                  | 1985    |                      | 2000    |                      |
|------------------------------|---------|----------------------|---------|----------------------|
|                              | médiane | espace interquartile | médiane | espace interquartile |
| Combustible solide . . . . . | 90      | 80-99                | 40      | 30-55                |
| Fission nucléaire . . . . .  | 6       | 1-15                 | 50      | 35-65                |
| Hydroélectricité . . . . .   | 0       | 0-0                  | 0       | 0-2                  |
| Solaire . . . . .            | 0       | 0-0                  | 0       | 0-8                  |
| Géothermie . . . . .         | —       | —                    | —       | 0-1                  |

2.

L'approche précédente, représentative de la méthode Delphi, était dite *intuitive*. S. C. I. E. N. C. E. en a utilisé deux autres dites *semi-quantitative* et *quantitative*. La première consiste à analyser les contraintes techniques, économiques, socio-économiques et d'environnement liées à la pénétration de l'hydrogène et, en les classant, à préciser les hypothèses à retenir. Ceci relève de la classification automatique, liée étroitement comme on le sait à l'analyse des données, donc d'un degré de sophistication statistique nettement supérieur au précédent. Un premier modèle, dit MIC-MAC <sup>(1)</sup>, a été appliqué à 68 variables — 26 économiques et sociales, 13 politiques, 23 techniques et 6 écologiques. Il a pour but de déterminer des variables dites « principales ». Ensuite, un autre modèle, dit « SMIC 74 » <sup>(2)</sup> permet de définir de nouveau par consultation d'experts (ici dix seulement) les scénarios « les plus probables » du développement de l'hydrogène et de calculer les probabilités de leurs apparitions. Nous les expliquerons plus loin.

Voici les six hypothèses donnant *a priori*, par des réponses oui ou non, naissance à  $2^6 = 64$  scénarios :

- H<sub>1</sub> : Hydrogène commercialisé, relativement bon marché.
- H<sub>2</sub> : Tension sur les prix d'énergie primaire.
- H<sub>3</sub> : Nouvelles orientations dans les investissements des compagnies pétrolières vers d'autres sources d'énergie et/ou vers d'autres vecteurs d'énergie.
- H<sub>4</sub> : Changement significatif des coûts relatifs à la conversion de l'énergie primaire en électricité et à sa distribution.
- H<sub>5</sub> : Réduction du taux de croissance de la consommation en énergie.
- H<sub>6</sub> : Mise en œuvre de politiques nationales ou régionales en vue de réduire la dépendance

1. Méthode de hiérarchisation des éléments d'un système. Essai de prospective du système de l'énergie nucléaire dans son contexte sociétal. J.-Cl. Duperrin, M. Godet C. E. A., R 4541, décembre 1973.

2. Les scénarios du développement de l'énergie nucléaire à l'horizon 2000. Application de la méthode SMIC 74, par J.-Cl. Duperrin, M. Godet, Louis Puiseux. C. E. A., R 4684, juillet 1975. Voir aussi dans le compte rendu de la Journée de l'A. F. C. E. T. du 21 avril 1976 sur « L'analyse de systèmes », la communication de M. Godet : « L'analyse de système en prospective. »



Un des scénarios les plus probables défini, nous verrons comment plus loin, serait le suivant :

TABLEAU II

|              | $H_1$ | $H_2$ | $H_3$ | $H_4$ | $H_5$ | $H_6$ |
|--------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 1985 . . . . | non   | oui   | non   | non   | non   | oui   |
| 2000 . . . . | oui   | non   | oui   | oui   | non   | oui   |

C'est un avenir où, à long terme, on n'accepte pas de réduction de la croissance ( $H_5$ ), mais où on poursuit des politiques d'indépendance nationale ( $H_6$ ), le bas coût de l' $H$  n'intervenant qu'en 2000 ( $H_1$ ) au moment où cesse la tension sur les prix ( $H_2$ ), où les pétroliers s'orientent différemment ( $H_3$ ) et où les coûts relatifs de l'électricité changent de façon significative ( $H_4$ ). *A priori*, pourquoi pas ! Il n'est pas déraisonnable.

3.

Ce scénario a été choisi et utilisé dans une troisième méthode dite « quantitative », utilisant un modèle d'optimisation du secteur énergétique <sup>(1)</sup> pour déterminer la structure optimale de la production et de la consommation d'énergie. Il est en dehors du champ de cette étude.

4.

Par contre, nous insisterons sur la comparaison des résultats obtenus par les trois méthodes. En effet, la première est nettement plus optimiste dans tous les domaines.

Avec elle, contrairement aux méthodes semi-quantitative et quantitative :

a) les processus nouveaux existent plus tôt : électrolyse à partir de 1985 et cycles thermodynamiques avant 2000;

b) l'hydrogène apparaît à l'horizon 2000 dans les secteurs économiques autres que la chimie et le pétrole;

c) en moyenne aux mêmes dates, les consommations sont nettement plus élevées (cinq fois).

Une explication de ce comportement a été donnée à Liège par S. C. I. E. N. C. E. : « les réponses optimistes d'experts... pouvaient être dues à l'époque à laquelle l'enquête a eu lieu, époque qui suivait de peu l'augmentation subite du prix du pétrole. Aussi, devait-il être implicitement admis dans l'esprit des experts un prix du pétrole pour l'an 2000 plus proche de 30 que de 15 dollars le baril; ce qui naturellement, entraînait une pénétration de l'hydrogène plus rapide ». En quelque sorte, il y aurait eu un scénario préétabli dans l'esprit de tous les experts.

L'explication précédente ne nous paraît pas exacte, en tout cas elle n'a pas joué pour nous. Nous croyons, par contre, aux problèmes psychologiques inhérents à la méthode Delphi elle-même. En effet, un expert, par définition très occupé, qui répond bénévolement à près de 200 questions numériques sans avoir besoin, tout au moins au premier tour, de justifier ses réponses, se laisse aller un peu par facilité à son intuition, à ses espoirs et tient

1. Modèle mathématique pour un système énergétique européen, par D. Finon, Institut économique et juridique de l'énergie (C. N. R. S., Grenoble).

inconsciemment compte de l'ensemble en général très complexe de tous les problèmes liés directement ou indirectement à celui sur lequel il est interrogé; ainsi il utilise sans crainte son acquis dû à des décennies d'expériences, des milliers de pages lues et digérées, des discussions sans nombre déjà oubliées, etc., toutes choses qu'il n'aurait pu faire entrer dans un avis officiel écrit si celui-ci avait été demandé.

Les experts ont raison à notre avis parce qu'ils ont inconsciemment tenu compte ainsi des questions politiques ou socio-économiques environnant ce problème de l'hydrogène. On trouvera nos arguments plus développés dans notre conférence donnée à la fin des Journées de Liège <sup>(1)</sup>.

### III — Cohérence interne des réponses d'un expert

a) Chacun de nous désire naturellement qu'il n'y ait pas de contradiction entre ses réponses aux diverses questions (200, avons-nous vu) et il veille inconsciemment à éviter qu'il n'y en ait pas d'apparentes. Mais peut-on aller plus loin et mettre en évidence des incohérences de nature mathématique et effectuer des corrections.

La méthode SMIC 74 (cf. note 2, p. 318) fournit la solution pour le cas où les réponses sont des probabilités  $p(i)$  pour qu'un événement  $i$  arrive ou  $p(i/j)$  pour ce même événement mais dans le cas où  $j$  a eu lieu. (L'expression  $\bar{j}$  vise le cas où on sait que l'événement  $j$  n'a pas eu lieu.)  $p(i, j)$  est la probabilité d'existence simultanée des deux événements  $i$  et  $j$ . Les conditions à respecter, pour de telles probabilités, sont évidentes :

$$\begin{aligned} p(i | j) p(j) &= p(j | i) p(i) = p(i, j) \\ p(i | j) p(j) + p(i | \bar{j}) p(\bar{j}) &= p(i) \end{aligned}$$

L'idée est de minimiser la différence entre les produits  $[p(i/j) p(j)]$  donnés par un expert et ceux théoriques. En effet, on peut exprimer ces dernières en fonction des probabilités  $\pi_k$  des divers scénarios  $E_k$ . (Dans le cas de l'hydrogène, nous avons  $k = 2^6 = 64$  scénarios pour chaque année étudiée.)

On aurait évidemment :

$$\left[ \begin{aligned} p(i) &= \sum \delta_{ik} \pi_k \quad \begin{cases} \delta_{ik} = 0 \text{ si l'hypothèse } H_i \text{ n'est pas dans le scénario } E_k, \\ \delta_{ik} = 1 \text{ si elle y figure.} \end{cases} \\ p(i | j) p(j) &= \sum \delta'_{ijk} \pi_k \quad \begin{cases} \delta'_{ijk} = 0 \text{ si } H_i \text{ ou } H_k \text{ n'est pas dans le scénario } E_k, \\ \delta'_{ijk} = 1 \text{ si } H_i \text{ et } H_k \text{ y sont} \end{cases} \\ p(i | \bar{j}) [1 - p(j)] &= \sum \delta''_{ijk} \pi_k \text{ même définition avec } \bar{j} \text{ au lieu de } j. \end{aligned} \right.$$

La méthode SMIC 74, à notre grand regret (cf. notre première partie), n'a pas résisté à la tentation de rendre minimum la somme des carrés des différences. (Nous aurions aimé voir d'autres tentatives plus « robustes ».)

$$\sum_{i,j} [p(i | j) p(j) - \sum_k \delta'_{ijk} \pi_k]^2 + \sum_j [p(i | \bar{j}) p(\bar{j}) - \sum_k \delta''_{ijk} \pi_k]^2$$

avec les contraintes :

$$\sum \pi_k = 1 \quad \pi_k \geq 0$$

1. Conclusions des Journées d'étude de Liège 1976 sur l'hydrogène et ses perspectives, par Robert Gibrat, t. III, p. 323.

ce qui permet, on le sait, de calculer les  $\pi_k$ . L'expert a ainsi fait un choix *implicite* de probabilités des 64 scénarios.

b) L'étude de S. C. I. E. N. C. E., pour Ispra (*cf.* note 2, p. 316) aurait utilisé cette méthode de cohérence pour l'hydrogène, mais le document ne donne aucun résultat intermédiaire. Une analyse même sommaire n'est pas possible, aussi nous la ferons sur un mémoire original du Commissariat à l'énergie atomique de juillet 1975 (*cf.* note 2, p. 318) qui recherche des scénarios pour le développement éventuel en 2000 de l'énergie nucléaire (sujet fortement lié à l'avenir de l'hydrogène). Six hypothèses avaient été retenues :

1 — Nucléaire fort.

2 — La croissance du revenu national par tête en monnaie constante aura pu être maintenue en Europe occidentale à un niveau moyen supérieur à 3,5 % par an.

3 — Europe unie (au moins les neuf) ayant une politique énergétique commune.

4 — L'amélioration de la qualité de la vie, de l'environnement, des relations sociales, a le pas sur l'impératif de la croissance.

5 — Sévères lois écologiques limitant le nucléaire, c'est-à-dire impossible en Europe occidentale de construire une centrale nucléaire, sinon sous terre ou dans des parcs océaniques.

6 — Réussite des énergies nouvelles (leur part dans les mises en service est supérieure à 5 % bien avant l'an 2000).

c) 18 experts avaient été interrogés, le questionnaire demandait à chacun : 6 probabilités directes des événements isolés et 60 probabilités conditionnelles.

Les réponses de l'expert n° 5, choisi par nous au hasard, sont données dans le tableau III, ci-dessous :

TABLEAU III

*Probabilités conditionnelles*

|                                       | Événement supposé réalisé |    |    |    |    |    | Événement supposé non réalisé |    |    |    |    |    |
|---------------------------------------|---------------------------|----|----|----|----|----|-------------------------------|----|----|----|----|----|
|                                       | 1                         | 2  | 3  | 4  | 5  | 6  | 1                             | 2  | 3  | 4  | 5  | 6  |
| 1. Nucléaire fort . . . . .           | 30                        | 60 | 50 | 10 | 10 | 30 | —                             | 25 | 25 | 40 | 50 | 50 |
| 2. Revenu élevé . . . . .             | 60                        | 20 | 50 | 20 | 30 | 30 | 30                            | —  | 10 | 30 | 40 | 30 |
| 3. Europe unie . . . . .              | 50                        | 50 | 40 | 30 | 30 | 40 | 30                            | 30 | —  | 50 | 50 | 50 |
| 4. Qualité > croissance . . . . .     | 10                        | 20 | 10 | 20 | 50 | 60 | 30                            | 25 | 10 | —  | 10 | 10 |
| 5. Lois contre le nucléaire . . . . . | 10                        | 20 | 10 | 70 | 70 | 80 | 80                            | 50 | 30 | 50 | —  | 30 |
| 6. Énergies nouvelles . . . . .       | 10                        | 20 | 30 | 80 | 70 | 50 | 60                            | 40 | 20 | 20 | 10 | —  |

L'information est *incohérente* au sens donné plus haut. Nous le voyons sur l'exemple du croisement entre lois contre le nucléaire (5) et qualité de vie préférée à la croissance (4).

$$P(5 | 4) P(4) + P(5 | \bar{4}) P(\bar{4}) = 0,54 \quad \text{or} \quad P(5) = 0,70$$

$$P(4 | 5) P(5) + P(4 | \bar{5}) P(\bar{5}) = 0,38 \quad \text{or} \quad P(4) = 0,20$$

La cohérence est loin d'être bonne, on l'avouera.

Les chiffres corrigés par la méthode précédente sont les suivants :

TABLEAU IV  
Valeurs cohérentes (Probabilités conditionnelles) expert n° 5

|   | Événement réalisé |      |      |      |      |      | Événement non réalisé |      |      |      |      |      |
|---|-------------------|------|------|------|------|------|-----------------------|------|------|------|------|------|
|   | 1                 | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    | 1                     | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    |
| 1 | 29,6              | 42,1 | 42,6 | 3,7  | 10,6 | 13,3 | —                     | 24,9 | 20,7 | 36,7 | 52,4 | 41,2 |
| 2 | 38,7              | 27,2 | 41,7 | 14,9 | 25,1 | 30,5 | 22,4                  | —    | 17,3 | 30,6 | 29,8 | 24,8 |
| 3 | 58,5              | 62,3 | 40,7 | 30,4 | 40,0 | 49,3 | 33,2                  | 32,6 | —    | 43,5 | 41,5 | 34,4 |
| 4 | 2,7               | 11,8 | 16,2 | 21,7 | 38,7 | 51,6 | 29,6                  | 25,3 | 25,4 | —    | 1,3  | 0,1  |
| 5 | 19,5              | 50,3 | 56,6 | 97,3 | 54,5 | 98,8 | 69,2                  | 56,1 | 55,2 | 42,7 | —    | 22,7 |
| 6 | 18,9              | 46,9 | 50,7 | 99,7 | 75,7 | 41,8 | 51,4                  | 39,9 | 35,7 | 25,3 | 1,1  | —    |

On a évidemment :

$$p(\bar{j}) = 1 - p(j)$$

La cohérence (5,4) est, cette fois, parfaite mais au prix du passage de  $p(5,4)$  de 70 à 97,3 % et de  $p(5)$  de 70 à 54,5 %. (Ce qui est vraiment très différent.) La probabilité de l'arrivée de lois antinucléaires dans un monde de croissance obstinée  $p(5,2)$  passe de 20 à 50,3 %, la même probabilité dans une « Europe unie »  $p(5,3)$  passe de 10 à 53,6 %, tous résultats stupéfiants.

Nous avons relevé peut-être les écarts les plus impressionnants <sup>(1)</sup>, mais il reste difficile, sinon impossible, d'admettre que le deuxième tableau reflète les jugements de l'expert de façon acceptable. L'étude C.E.A. (cf. note 2, p. 318) contient des réflexions intéressantes sur les modes de « réflexion implicite » des diverses catégories d'experts consultés et estime que ceci peut « éclairer » le système de décision correspondant. Cela nous paraît optimiste. Un expert est, par nature, fondamentalement « incohérent » au sens statistique du mot. (On se reportera avec fruit aux philosophies grecques de l'« enthousiasme » et de la « mélancolie », fruit de l'inspiration divine.) Il ne faut jamais oublier qu'il peut être amené inconsciemment à mélanger dans ses réponses ce qu'il souhaite et ce qu'il croit devoir arriver. La séparation est très difficile. On va le voir nettement dans les choix « implicites » de scénario.

d) Les calculs donnent automatiquement les probabilités  $\pi_k$  des 64 scénarios, 49 auraient une probabilité nulle <sup>(2)</sup>. Treize ont une probabilité supérieure à 1 %, deux seulement sont supérieurs à 10 %.

$$[000111] \quad 12,1 \% \quad \text{et} \quad [000010] \quad 11,3 \%$$

Les trois premiers zéros et le un en position cinq, communs aux deux scénarios, signifient l'absence de fort nucléaire, une croissance faible ou nulle (revenu faible), pas d'Europe unie dans une politique énergétique, des lois contre le nucléaire. Dans le premier cas, on aura, avec les deux réponses suivantes — hypothèses 4 et 6 —, un scénario cohérent : qualité de vie préférée à la croissance, développement d'énergies nouvelles; mais dans le deuxième cas il y a, par contre, accord pour sacrifier la qualité de vie à la croissance et

1. Sans vouloir pousser trop loin la comparaison des tableaux, on notera encore dans le tableau des valeurs corrigées les quasi-certitudes  $p(5,6)$  98,8 % et  $p(6,4)$  99,7 % en face des valeurs proposées 80 et 80 %. Le lien corrigé est devenu trop serré.

2. Dans le grand tableau récapitulatif des probabilités des scénarios il y a seulement 46 zéros pour l'expert n° 5 et le total des probabilités est de 0,87 au lieu de 1,00, ceci étant sans doute dû à l'arrondissement au chiffre le plus voisin.

refus d'énergies nouvelles. (Ce qui est étrange.) La probabilité d'un tel scénario devrait être voisine de zéro, elle est cependant, ici, en deuxième position : résultat du calcul ou opinion profonde de l'expert?

En construisant artificiellement une cohérence des réponses d'un expert, on a de toute évidence introduit l'incohérence dans le classement correspondant des scénarios. La recherche d'une bonne méthode d'utilisation des réponses brutes reste donc actuelle. Impasse ou échec, nous ne savons pas encore <sup>(1)</sup>. Aussi, nous ne retiendrons pas la méthode d'analyse « stratégique de sensibilité », présentée dans le même travail, utilisant une matrice de coefficients d'élasticité. Cela nous paraît largement prématuré en face des incohérences obligatoires et naturelles des réponses brutes. Nous ne retiendrons pas non plus les notions proposées de scénarios « de référence » et de scénarios « contrastés ».

### III — Variables dominantes

Dans un long travail d'équipe, en 1973 et 1974 (cf. notes 1 et 2, p. 318), un groupe d'études dirigé par Thiriet, a cherché à définir les variables qui commandent le développement à long terme de l'énergie nucléaire. Pour eux, le système économique et social est formé de très nombreux facteurs structurés en sous-systèmes avec des relations évoluant avec le temps et il faut chercher parmi tous les facteurs possibles, politiques, économiques, technologiques, psychologiques, sociologiques ou liés à l'environnement, ceux capables d'avoir un impact sur ces relations, l'évolution de ces dernières définissant une transformation possible du système à étudier.

Les données sont des jugements portés par un expert (ou une équipe X) sur l'apparition d'événements et l'influence des uns sur les autres. On aura donc à analyser une matrice dite d'analyse structurelle ayant pour lignes et pour colonnes les  $N$  facteurs retenus au départ précisant l'ensemble des  $N^2$  liaisons des facteurs deux à deux <sup>(2)</sup>. Ici, pas de probabilités dans la case, mais un plus ou un moins suivant que l'événement  $E_i$  influence  $E_j$  positivement ou négativement, un blanc s'il n'y a aucune influence.

Dans l'étude de décembre 1973, il y a 51 facteurs avec 2 601 liaisons possibles, visant l'aspect énergétique (20), social (22), écologique (9). Ils ont ensuite été classés suivant les angles politique (3,6 et 1), économique (11,0 et 2), technologique (6,0 et 0), psychologique (0,4 et 1) sociologique 0,12 et 0) et lié à l'environnement (0,0 et 5). Par exemple, pour les divers angles politiques on a

(P) aspect énergétique :

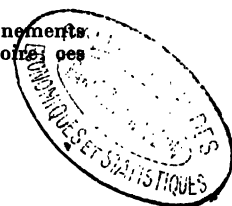
1. Objectif d'indépendance économique.
2. Décentralisation des industries de base vers les zones périphériques.
3. Commerce mondial libre avec les pays du monde communiste.

1. L'analyse psychologique, donnée par le C. E. A. en conclusion de son annexe V, mérite réflexion et « ouvre la porte aux recherches nécessaires ». Compte tenu de l'existence de certains comportements psychologiques, tels que « le réflexe mental de réversibilité des causes » et de la diversité des points de vue qui apparaissent normalement dans un groupe d'experts pluridisciplinaires, il semble nécessaire de préciser au préalable avec les experts la nature des relations entre événements et de dégager, par exemple, un certain consensus sur certaines relations intéressantes, liaisons causales, conditionnelles qui ont un sens probabiliste. Mais tout cela va compliquer terriblement la méthode et, pour le moment, les outils statistiques manquent. Les Grecs avaient résolu cette partie du problème des « oracles » en ne posant jamais qu'une question à la fois...

2. L'équipe est allée plus loin dans son analyse de 1975 (cf. note 2, p. 318) distinguant les événements non récurrents (un événement ne peut se produire plus d'une fois) et les systèmes sans ou avec mémoire, les derniers beaucoup plus nombreux :

$$N \cdot 2^{N-1} \text{ et } \sum_j \left( \frac{N!}{(N-j)!} \right),$$

mais les applications ont été bornées aux premières.



(S) aspect social :

21. Décentralisation.
22. Remise en question de la croissance.
23. Instabilité politique des zones périphériques.
24. Grippage des rouages institutionnels sociopolitiques.
25. Catastrophe mondiale.
26. Société plus planifiée, plus organisée.

(E) Aspect écologique.

43. Législation draconienne sur l'environnement.

(Dans l'étude plus récente (*cf.* note 2, p. 318) juillet 1975, relative au nucléaire, il y a 65 variables, la 65<sup>e</sup> étant la variable à expliquer — volume du nucléaire en Europe.)

Les pourcentages des relations, définies par la matrice (fig. 1), sont donnés par le tableau V.

FIG. 1. — Matrice générale

TABLEAU V

*Pourcentage des relations*

| Influence de | sur | P    | S    | E    |
|--------------|-----|------|------|------|
|              |     |      |      |      |
| P            |     | 17,2 | 2,9  | 14,0 |
| S            |     | 6,8  | 13,6 | 7,0  |
| E            |     | 9,3  | 8,0  | 24,6 |

L'influence de *P* sur *S*, aspect énergétique sur aspect social, apparaît très réduite au moins en diversité, car elle se mesure par huit liaisons positives et cinq négatives pour 440 possibles. Au total, sur les vingt événements de *P* (énergétiques), quatorze n'ont aucune liaison avec *S* (sociologiques). C'est assez inattendu.

L'influence en sens inverse, *S* sur *P*, est plus riche : quinze positives, quinze négatives sur 440 possibles. Au total, sur les vingt-deux événements sociologiques, onze n'ont aucune liaison avec l'énergétique.

Enfin, l'unique liaison *reciproque* entre *P* et *S* lie les événements 2 (décentralisation des industries de base vers les zones périphériques) et 32 (20 millions d'étrangers en France en 2000). Qui l'aurait cru ?

Mais la quantité n'est pas suffisamment caractéristique, même si elle a valeur de diversité. La valeur des liaisons ne saurait être négligée, ainsi le niveau de croissance est, a priori, *essentiel*; cela paraît évident.

Pour aller plus loin, la méthode va réduire la liste des 51 facteurs en recherchant les plus importants, le critère adopté étant le nombre de boucles d'influences passant par un facteur <sup>(1)</sup>. Par exemple l'événement 29 (sensibilité croissante aux effets externes) influence le n° 35 (disparition des valeurs traditionnelles) qui influence à son tour le 29 : on a donc une boucle d'ordre 2. Le programme MIC-MAC de l'équipe C. E. A.-E. D. F., programme de multiplication matricielle,  $A^n$ , donne par ses éléments diagonaux le nombre de boucles d'ordre  $n$ , ( $A$  étant la matrice originelle). Les auteurs de la méthode ont observé qu'avec le nombre de boucles le classement devient stable, mais que, malheureusement, la signification d'une boucle décroît avec  $n$ . Finalement, ils conservent deux classements : celui par nombre de relations  $N_l$  et celui par nombre de boucles de longueur 13.

Le tableau VI donne, à titre d'exemple, le classement des neuf facteurs écologiques sur les 51 événements possibles suivant le nombre de liaisons  $N_l$  et le nombre de boucles  $N_b$  pour  $n = 4$  et  $n = 13$ .

Si le très bon classement de 43 paraît normal <sup>(2)</sup>, le mauvais classement des croissances des diverses pollutions ou des changements climatiques étonne.

On pourrait multiplier les exemples. Nous avons là une analyse fine des relations entre les facteurs possibles, le critère du nombre de boucles ne doit pas être rejeté a priori, et la discussion du classement ainsi obtenu permet certainement une meilleure compréhension des structures. Mais l'approche reste purement qualitative malgré les essais d'introduction

1. On pense, ici, irrésistiblement à la théorie des chaînes de Markov finies. Mais son introduction, quoiqu'elle paraisse évidente et nécessaire, ne semble pas avoir apporté jusqu'ici grand appui à l'analyse des données en sciences humaines. On les retrouve partout cependant.

2. L'événement 43 influence 14 facteurs et est influencé par 6 (sensibilité croissante aux événements externes).

TABLEAU VI  
*Classement des facteurs*

| Système écologique : E                                                      | N <sub>i</sub> | N <sub>b</sub> |    |
|-----------------------------------------------------------------------------|----------------|----------------|----|
|                                                                             |                | 4              | 11 |
| 43. Législation draconienne sur l'environnement . . . . .                   | 3              | 3              | 3  |
| 44. Catastrophe nucléaire accidentelle . . . . .                            | 26             | 13             | 15 |
| 45. Gaspillage, épuisement des ressources naturelles . . . . .              | 5              | 18             | 16 |
| 46. Changement intolérable du cadre de vie actuel d'ici l'an 2000 . . . . . | 8              | 13             | 14 |
| 47. Croissance de la pollution thermique . . . . .                          | 26             | 24             | 21 |
| 48. Croissance de la pollution chimique . . . . .                           | 26             | 20             | 20 |
| 49. Croissance de la pollution par déchets . . . . .                        | 16             | 19             | 17 |
| 50. Problèmes de site (esthétique) . . . . .                                | 32             | 16             | 19 |
| 51. Changements climatiques . . . . .                                       | 24             | 29             | 23 |

d'une « élasticité » mesurée par le nombre de boucles. Aussi, l'équipe concluait en décembre 1973 (*cf.* note 1, p. 318), après un essai à vrai dire infructueux d'approfondissement par un programme spécial dit Microbe (mise en évidence des boucles utilisant certains facteurs définis à l'avance), qu'il convenait de « dépasser l'approche purement qualitative en quantifiant les liaisons ».

L'étude plus récente de juillet 1975 (*cf.* note 2, p. 318), portant cette fois sur 65 variables, n'a pas quantifié, mais a montré à nouveau que cette méthode ne peut donner que des indications d'ailleurs souvent précieuses. L'équipe C. E. A.-E. D. F. a créé un nouvel outil dont le champ d'action semble devoir être précisé. Un essai systématique des différentes méthodes actuelles d'analyse de données et de classification automatique permettrait sans doute d'aller plus loin. A côté de la Pythie, à Delphes, il y avait prophètes, exégètes et prêtres...

#### IV — *Opinion moyenne ou opinion centrale*

L'étude du C. E. A. (*cf.* note 2, p. 318) se refuse à agréger les réponses. On le comprendra en consultant le tableau VII, résumant pour les quatre scénarios préférés par l'expert n° 5, les opinions des 18 autres experts ou encore en notant que sur les 64 scénarios deux seulement ont été classés premier ou second par les experts plus de trois fois, le 110000 sept fois et le 111000 six fois et 45 scénarios ne l'ont jamais été. Le C. E. A. propose de « trouver des classes de réponses » en faisant appel, par exemple, à une méthode d'analyse de données. Impasse donc pour le moment.

TABLEAU VII  
*Nombre d'experts correspondant à certaines classes de  $\pi_k$*

|                  |                                  | $\pi \geq 10 \%$ | $\pi \leq 5 \%$ | $\pi$ nulle |
|------------------|----------------------------------|------------------|-----------------|-------------|
| 000111 . . . . . | France écologique (*)            | 4                | 10              | 5           |
| 000010 . . . . . | Front du refus                   | 2                | 15              | 10          |
| 111000 . . . . . | Europe unie électronucléaire (*) | 6                | 7               | 6           |
| 100000 . . . . . | Europe écologique (*)            | 3                | 11              | 6           |

(\*) Ces trois expressions sont de S. C. I. E. N. C. E., la quatrième est de nous-même.

Pour aller plus loin dans cette difficile question, nous exposerons les grandes lignes d'une étude récente (novembre 1977) de S. C. I. E. N. C. E., destinée à l'Euratom (*cf.* note 2, p. 316), sur le marché potentiel de l'hydrogène dans l'Europe des Neuf. Beaucoup plus complète que celle de 1974 et beaucoup plus audacieuse que l'équipe C. E. A.-E. D. F., elle s'est attaquée



au problème du consensus entre experts en introduisant des experts-types et un expert-central, et en donnant un sens aux moyennes de probabilités de scénarios, toutes notions évidemment délicates *a priori* <sup>(1)</sup> et <sup>(2)</sup>. On a vu que l'existence de deux tours de consultation avait déjà pour but de restreindre les divergences éventuelles. Cette fois, on va exercer, dans le même but, une certaine pression psychologique préalable.

#### a) Questionnaire

Vingt-trois experts, choisis dans divers secteurs professionnels et dans les divers pays de la Communauté (*cf.* note 1, p. 317), dont nous-mêmes et un ami d'E. D. F., ont fourni pour les années 1985 et 2000 les probabilités simples et conditionnelles de six événements ou hypothèses un peu différents des précédents ( $H_1$  à  $H_6$ ) par suite de l'évolution de la situation.

$A_1$  Accroissement du prix du pétrole.

$A_2$  Réorientation des investissements des compagnies s'occupant de la production d'énergie.

$A_3$  Moratoire nucléaire.

$A_4$  Accroissement du coût moyen de conversion en électricité.

$A_5$  Réduction du taux de croissance énergétique dans les Communautés européennes au-dessous de 2 % par an.

$A_6$  Politique d'indépendance énergétique de la Communauté par utilisation de sources énergétiques nouvelles.

$A_1, A_2, A_4, A_5, A_6$  sont les anciens  $H_2, H_3, H_4, H_5, H_6$ . Par contre,  $A_3$  est nouveau,  $H_1$  ( $H$  à bon marché) a disparu. Ici, encore, il s'agit d'événements que l'on pense avoir une influence déterminante pour l'avenir. De plus, on a précisé aux experts, restreignant donc leur liberté, que l'on supposait *a priori* :

1. Une intensification des efforts dans l'exploration des combustibles fossiles.
2. Une certaine maturité des techniques de gazéification du charbon après 1985.
3. Des conditions politiques et économiques convenables pour exploiter l'hydroélectricité et la géothermie.

4. Des mises au point techniques, terminées dès 1990 (réacteur nucléaire à hautes températures, énergie solaire produisant l'électricité sur une grande échelle et la convertissant en hydrogène, production de l'hydrogène dès 1995 par cycles thermochimiques à partir de l'eau).

5. Politiques dominées de plus en plus par le souci de l'environnement.

#### b) Influence d'un événement sur les autres

Chaque expert a donc donné, pour chacune des années 1985 et 2000, six probabilités simples d'arrivée des événements,  $A_1$  à  $A_6$ , et noté pour les mêmes années l'influence jugée positive ou négative de l'existence de  $A_i$  sur l'arrivée de  $A_j$  comme nulle, réelle mais faible, moyenne ou forte (sept notations, 30 réponses).

1. En Frise, la population est formée à l'Est des Groterpiens brachycéphales et à l'Ouest des Friterpiens dolicocephales. Un Frison « central » aurait ainsi peu de signification, de même un Frison « moyen ».

2. Au dernier Congrès mondial de l'énergie (Istanbul, 19-23 septembre 1977), P. Desprairies, président de l'Institut français du pétrole, a présenté une étude sur les limites de l'approvisionnement pétrolier mondial en utilisant la méthode Delphi (29 réponses/21 questions). Les documents distribués à Istanbul ne permettent pas une discussion approfondie du consensus éventuellement atteint.

En exposant, dès maintenant, des résultats de l'étude nous trouvons pour 1985 en nous bornant aux influences *fortes* que l'élévation du prix du pétrole, pour 1985, renforce les chances d'une réorientation des investissements des compagnies s'occupant de la production d'énergie et d'une réduction du taux de croissance au-dessous de 2 %, mais diminue celle d'un moratoire nucléaire. En sens inverse, le seul facteur pouvant freiner de façon importante un accroissement du prix du pétrole serait une politique d'indépendance énergétique de la Communauté (ressources nouvelles). (Tout cela paraît bien normal.)

c) *Distances entre experts*

Mais S. C. I. E. N. C. E. a considéré que le traitement des données des 23 experts était trop lourd. Aussi, les a-t-il classé en sept groupes en prenant pour définition de la distance de deux experts dans l'espace de dimension six des probabilités *simples* la somme des écarts absolus des coordonnées. (Les 30 réponses d'influences  $A_i/A_j$  ne sont donc pas intervenues). Des seuils ont permis la classification en groupes.

Par exemple, l'expert de S. C. I. E. N. C. E. (n° 23), celui d'E. D. F. (n° 11) et nous-même (n° 10) avons formé un des groupes et le tableau VIII donne nos écarts pour 2000.

TABLEAU VIII  
*Probabilités simples en dixièmes en 2000*

| Événement           | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |                             |
|---------------------|---|---|---|---|---|---|-----------------------------|
| Expert 10 . . . . . | 9 | 9 | 2 | 2 | 4 | 9 | $\Delta (10 \cdot 11) = 7$  |
| Expert 11 . . . . . | 8 | 8 | 2 | 2 | 2 | 7 | $\Delta (10 \cdot 23) = 14$ |
| Expert 23 . . . . . | 7 | 8 | 3 | 4 | 1 | 5 | $\Delta (11 \cdot 23) = 7$  |
| Expert 2 . . . . .  | 8 | 7 | 4 | 4 | 6 | 5 |                             |

(Pour les 23 experts, cela varie de 1 à 30.) L'examen de tous nos écarts personnels pour 2000 montre que c'est bien le n° 11 le plus proche et celui des écarts du n° 11 qu'il y en a un autre aussi près de nous, précisément le n° 23. Par contre, en 1985, dix autres experts sont aussi rapprochés ou plus proches de nous que l'expert E. D. F. et neuf dans la liaison inverse. Nous avons ajouté, dans le tableau VIII, l'expert n° 2 qui sera promu plus loin « expert-central ».

On peut se demander si les méthodes modernes de classification automatique et Dieu seul en connaît le nombre n'auraient pas donné des résultats moins fragiles. S. C. I. E. N. C. E. en a certes le sentiment, car il aurait vérifié son classement en prenant la somme des distances d'un expert par rapport à tous les autres et en utilisant un seuil relatif (accroissement du prix du pétrole) à  $A_1$  considéré comme l'événement le plus important <sup>(1)</sup>, puis en appliquant l'analyse par correspondances pour les trois premiers axes vectoriels (aucun calcul de valeurs propres, taux d'inertie, contributions relatives ou absolues, n'est fourni), (fig. 2).

d) *Choix des experts-types*

S. C. I. E. N. C. E. va prendre, dans chacun des sept groupes, un expert-type (dans notre groupe, ce sera l'expert E. D. F.) et restreindre les calculs à neuf experts. La procédure de choix n'est pas très claire. Il semble que l'on soit parti des six probabilités simples. Pour

1. Pour l'an 2000 et pour  $A_1$ , il y a neuf probabilités à 0,9, sept à 0,8, trois à 0,7 et quatre en dessous (0,5; 0,3; 0,3 et 0,1).

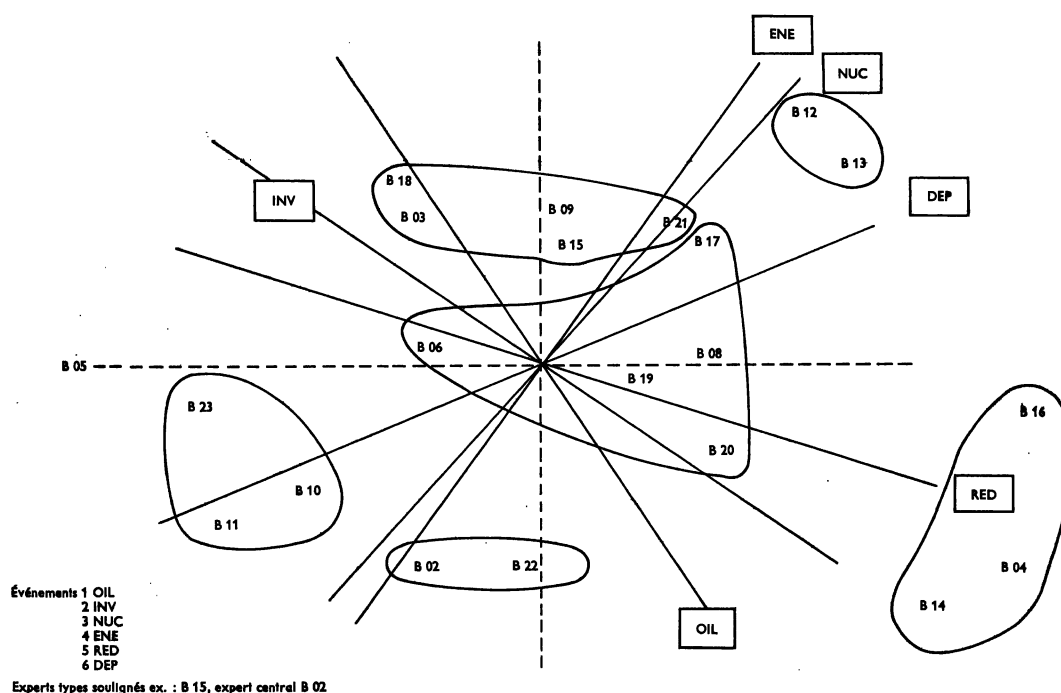
chacune d'elle et pour chaque groupe d'experts, on a déterminé le *mode*, défini aussi pour chaque groupe une réponse « type » et un expert-« type » celui-ci s'en rapprochant le plus et vérifié sur le plan des deux premiers axes factoriels qu'il n'y avait rien de choquant. Puis, on a ajouté deux experts supplémentaires dont la représentation était aux extrémités de ces axes.

Ce processus a le grand mérite d'être simple <sup>(1)</sup> et pratiquement sans calcul mais sur quoi se fonde la valeur précise de la réponse type qui sert au choix mais qui n'apparaîtra plus ensuite et surtout comment justifier l'absence, dans le processus, des probabilités conditionnelles dont le rôle va être essentiel dans la suite?

Ce choix fait, la méthode SMIC 74, appliquée aux neuf experts retenus et rétablissant la cohérence des réponses individuelles, fournit les probabilités corrigées et celles des 64 scénarios <sup>(2)</sup> comme plus haut.

Les corrections sur les probabilités simples <sup>(2)</sup> semblent ici faibles, la « distance » en dixièmes est, par exemple, de 0,7 pour l'expert E. D. F. (n° 11); 0,11 pour le n° 2, 2,19 pour le n° 7. A notre avis, cette restriction aux experts-types ne se justifie que par un souci d'argent et correspond purement et simplement à un abandon d'une partie des données. Il va évidemment rendre moins difficile la recherche d'un consensus.

FIG. 2. — Plan des axes factoriels 1 et 2 pour 2000



1. Le tableau VIII montre que le triangle construit avec les trois distances de notre groupe se réduit à un segment de droite. L'expert E. D. F. était à mi-chemin de S. C. I. E. N. C. E. et de nous-même. Le choix du n° 11 s'imposait donc dans l'optique de l'étude.

2. Les chiffres donnés dans le mémoire qui nous a été communiqué ne permettent de comparer que les probabilités simples pour 2000 (brutes et corrigées).

e) *Choix d'un expert central*

Aucune indication précise n'est donnée pour son choix, « on a procédé à une analyse de proximité et les corrections ont été faibles dans son cas ». En fait, il n'occupe pas de position « centrale » dans le plan des deux premiers axes factoriels. Il n'est que le septième en 2000 et le sixième en 1985 dans la liste de classement suivant le total des écarts à l'ensemble des experts. Le n° 8 arrive par contre en tête des deux classements et est le plus « central » des experts-types sur le plan factoriel. Il y a donc là un petit mystère. Le document estime sans justification que l'expert-central montre dans ses prédictions une « parfaite logique », reliant ainsi deux notions distinctes : représentativité d'un groupe et logique interne d'un individu. L'étude des scénarios ne confirmera pas cette conclusion.

f) *Scénarios les plus probables*

Le document fournit, pour les neuf experts-types, pour 1985 et 2000, les soixante-quatre probabilités des scénarios. Finalement, S. C. I. E. N. C. E. considère que « les probabilités de l'expert-central peuvent être considérées comme représentatives d'une vision de l'avenir acceptable par l'ensemble des experts ».

Est-il vraiment possible de constater un consensus et de donner ainsi un sens soit à la moyenne des probabilités données pour chaque scénario par chacun des neuf experts, soit à celles de l'expert-central. Le tableau IX donne les quatre scénarios les plus probables *en moyenne*, schéma choisi par S. C. I. E. N. C. E. pour sa discussion (1).

TABLEAU IX  
*Scénarios les plus probables en moyenne (2000)*

(en millièmes)

|                  | Moyenne | Expert<br>central<br>n° 2 | 7  | 8   | 11  | 13  | 16  | 3   | 8 | 15 |
|------------------|---------|---------------------------|----|-----|-----|-----|-----|-----|---|----|
| 111111 . . . . . | 123     | 80                        | 15 | 55  | 0   | 554 | 299 | 115 | 0 | 63 |
| 110001 . . . . . | 77      | 215                       | 0  | 48  | 419 | 26  | 5   | 24  | 0 | 0  |
| 111101 . . . . . | 47      | 0                         | 0  | 60  | 58  | 0   | 0   | 243 | 0 | 88 |
| 110111 . . . . . | 39      | 0                         | 0  | 333 | 45  | 0   | 0   | 0   | 0 | 0  |

Faut-il vraiment commenter ce tableau? Il y a 64 scénarios et la *moyenne* en met quatre en tête avec 28,6 % de probabilité totale. Or, la probabilité *zéro* est attribuée aux quatre par le n° 8, à trois d'entre eux par le n° 7 et à deux d'entre eux par le n° 2 (l'expert central!) 13, 16 et 15. *Sept experts-types sur neuf* donnent zéro au quatrième choix et cinq au troisième choix. On ne peut nier que sur neuf experts-types, six y compris l'expert-central désavouent la moyenne. Il est évident que le classement par la moyenne est influencé par les « grosses » probabilités d'un ou deux experts (les n°s 13 et 16 pour 110001, etc.).

Prenons, dans les quatre scénarios classés en tête par l'expert-central (tableau X), les probabilités affectées (voir tableau page suivante).

Ici, seul scénario commun avec le classement précédent : 110001. Mais la probabilité *zéro* est attribuée aux quatre scénarios par le n° 7, à trois par le n° 13 et à deux par les n°s 3 et 8; quatre experts-types sur huit « désavouent » le neuvième (le « central »). Ceci est confirmé

1. Notre étude n'a pas été facilitée par les nombreuses erreurs de reproduction et de calculs du document. Ainsi, le total des probabilités, de 1985 par exemple, pour les neuf experts est de 9,868, alors qu'il est évidemment égal à 9 exactement. De ce fait, la moyenne des probabilités individuelles dans le document est de 0,10125 fois la somme de celles-ci au lieu de 0,11111 (*idem* pour 2000).

par le fait que quatre experts sur huit donnent zéro aux deuxième, troisième et quatrième du classement de l'expert-central.

TABLEAU X

*Scénarios les plus probables pour l'expert-central année 2000*

(en millièmes)

|                | Expert<br>central | 7 | 8  | 11  | 13 | 16 | 3  | 8  | 15 | Moyenne |
|----------------|-------------------|---|----|-----|----|----|----|----|----|---------|
| 110001 . . . . | 215               | 0 | 48 | 419 | 26 | 5  | 24 | 0  | 0  | 77      |
| 110010 . . . . | 115               | 0 | 25 | 3   | 0  | 0  | 0  | 0  | 10 | 16      |
| 101011 . . . . | 98                | 0 | 65 | 23  | 0  | 41 | 0  | 0  | 19 | 26      |
| 111100 . . . . | 88                | 0 | 0  | 0   | 0  | 44 | 26 | 88 | 16 | 27      |

La notion d'expert-central ou de moyenne n'a donc pas grand sens et le problème de l'agrégation devra être repris avec les moyens les plus puissants de la statistique moderne.

Aussi, n'insisterons-nous pas sur les classements de scénarios présentés par S. C. I. E. N. C. E., ni sur les scénarios *tendanciels*, ni sur la détermination de *cheminement* des diverses hypothèses.

#### CONCLUSION

Nous l'avons déjà présentée à la fin de l'introduction. Un pas a été fait, il en reste beaucoup à faire. Beaucoup de réflexion est nécessaire, beaucoup de prudence aussi avant de lancer une consultation d'expert (au singulier et au pluriel). L'idée de structurer l'avenir, par des scénarios construits chacun sur l'arrivée ou non d'un certain nombre d'événements est féconde et doit être poursuivie. Elle se prête très bien aux consultations d'expert (au singulier et au pluriel) pour deux raisons fondamentales : d'une part, elle permet à l'expert d'utiliser toute la richesse de sa pensée grâce aux appréciations conjointes de probabilité simple et de probabilités conditionnelles en évitant toute ambiguïté, d'autre part elle permet l'application au dépouillement et à la mise en ordre des données, des méthodes les plus modernes et les plus efficaces de la statistique mathématique (analyse de données, classification automatique, etc.).

La recherche d'une opinion « moyenne » est encore aujourd'hui dans l'enfance; la notion de « distance » entre experts dans l'espace des réponses doit être approfondie et il n'est pas sûr qu'au bout de la recherche, il y ait une solution. L'idée de choisir un expert « central » pour l'excellence relative de sa logique interne nous apparaît aujourd'hui curieuse, mais elle aurait passionné Platon et peut-être modifié sa théorie de « l'enthousiasme ».

Nos amis C. E. A.-E. D. F. ont écrit, en renversant le problème : « Nous connaissons assez bien les forces du passé, mais pour expliquer le présent il faut, en plus, connaître l'avenir. » Pour Cicéron : « Si les Dieux ne révèlent pas l'avenir c'est qu'ils n'existent pas. Or les Dieux existent, donc ils le révèlent. »

Notre philosophie personnelle se place quelque part entre celle d'Épicure, adversaire des Stoïciens, qui parle parfois comme un disciple de Pascal : « les prophètes jettent et dispersent des paroles sans fondement *dans l'infini des possibles* » et celle de Plutarque accusant les incrédules « d'aveuglement et de sottise puérile ». Comme l'a écrit, en 1976, M. Godet : « L'avenir est fait par le jeu des déterminismes, mais aussi par la liberté des hommes. »

Décidément, la Pythie ne rend toujours pas ses oracles en vers...