

COMMISSARIAT A L'ENERGIE ATOMIQUE

F.10

**LES SCENARIOS DU DEVELOPPEMENT DE
L'ENERGIE NUCLEAIRE A L'HORIZON 2000**

APPLICATION DE LA METHODE SMIC 74

par

*Jean-Claude DUPERRIN, Michel GODET,
Louis PUISEUX*

Commissariat à l'Energie Atomique

**ÉTUDES
ÉCONOMIQUES**

Rapport CEA-R-4684

JUILLET 1975

Fa

SERVICE DE DOCUMENTATION

C.E.N. - SACLAY B.P. n° 2, 91 190 - GIF-sur-YVETTE - France

PLAN DE CLASSIFICATION DES RAPPORTS ET BIBLIOGRAPHIES CEA

(Classification du système international de documentation nucléaire SIDON/INIS)

A 11	Physique théorique	C 30	Utilisation des traceurs dans les sciences de la vie
A 12	Physique atomique et moléculaire	C 40	Sciences de la vie : autres études
A 13	Physique de l'état condensé	C 50	Radioprotection et environnement
A 14	Physique des plasmas et réactions thermonucléaires		
A 15	Astrophysique, cosmologie et rayonnements cosmiques	D 10	Isotopes et sources de rayonnements
A 16	Conversion directe d'énergie	D 20	Applications des isotopes et des rayonnements
A 17	Physique des basses températures		
A 20	Physique des hautes énergies	E 11	Thermodynamique et mécanique des fluides
A 30	Physique neutronique et physique nucléaire	E 12	Cryogénie
		E 13	Installations pilotes et laboratoires
B 11	Analyse chimique et isotopique	E 14	Explosions nucléaires
B 12	Chimie minérale, chimie organique et physico-chimie	E 15	Installations pour manipulation de matériaux radioactifs
B 13	Radiochimie et chimie nucléaire	E 16	Accélérateurs
B 14	Chimie sous rayonnement	E 17	Essais des matériaux
B 15	Corrosion	E 20	Réacteurs nucléaires (en général)
B 16	Traitement du combustible	E 30	Réacteurs nucléaires (types)
B 21	Métaux et alliages (production et fabrication)	E 40	Instrumentation
B 22	Métaux et alliages (structure et propriétés physiques)	E 50	Effluents et déchets radioactifs
B 23	Céramiques et ciments		
B 24	Matières plastiques et autres matériaux	F 10	Economie
B 25	Effets des rayonnements sur les propriétés physiques des matériaux	F 20	Législation nucléaire
B 30	Sciences de la terre	F 30	Documentation nucléaire
		F 40	Sauvegarde et contrôle
C 10	Action de l'irradiation externe en biologie	F 50	Méthodes mathématiques et codes de calcul
C 20	Action des radioisotopes et leur génétique	F 60	Divers

Rapport CEA-R-4684

Cote-matière de ce rapport : F.10

DESCRIPTION-MATIERE (mots clefs extraits du thesaurus SIDON/INIS)

en français

ENERGIE NUCLEAIRE
PREVISIONS
DEVELOPPEMENT ECONOMIQUE

en anglais

NUCLEAR ENERGY
FORECASTING
ECONOMIC DEVELOPMENT

CEA-R-4664 - DUPERRIN Jean-Claude, GODET Michel, PUISEUX Louis
LES SCENARIOS DU DEVELOPPEMENT DE L'ENERGIE NUCLEAIRE A L'HORIZON 2 000:
APPLICATION DE LA METHODE SMIC 74

Sommaire.- Le but de cet article est de présenter les résultats d'un travail d'équipe mené conjointement par le Département des Programmes du C.E.A. (MM. THIRIET, DUPERRIN et GODET) et par le Service des Etudes Economiques Générales de l'E.D.F. (M. PUISEUX) depuis 1973. Dans une première étape, une soixantaine de variables ont été retenues d'un commun accord comme pouvant influencer directement ou indirectement le développement à long terme de l'énergie nucléaire (progrès technique, contraintes écologiques, données économiques et politiques...). Une "matrice d'analyse structurelle" a ensuite été dressée pour repérer l'influence (ou l'absence d'influence) de chaque variable sur chacune des autres. A l'issue de cette première étape les aspects essentiels du développement de l'énergie nucléaire à l'horizon 2 000 ont été résumés par six événements ou situations pouvant survenir et influencer ce développement. A partir des probabilités subjectives (individuelles et conditionnelles) estimées par les personnes interrogées sur ces six événements, la nouvelle méthode d'impacts croisés "SMIC 74" fournit trois types de résultats : en premier lieu, elle établit la cohérence, en terme de probabilités de toutes réponses données par un expert sur les événements étudiés. En second lieu, elle construit et hiérarchise

./.

CEA-R-4664 - DUPERRIN Jean-Claude, GODET Michel, PUISEUX Louis
SYNOPSIS OF NUCLEAR ENERGY DEVELOPMENT FOR THE YEAR 2 000 : APPLICATION
OF THE SMIC 74 METHOD

Summary.- This article reports the results of a joint study conducted by the C.E.A. Programmes Department (MM. THIRIET, DUPERRIN and GODET) and the E.D.F. Service of General Economics Research (M. PUISEUX) since 1973. In the first stage about sixty variables were taken by common consent as liable to influence directly or indirectly the long-term development of nuclear energy (technical progress, ecological obligations, economic and political factors...). A "structural analysis matrix" was then drawn up to find out the influence (or lack of influence) of each variable on each of the others. At the end of this first stage the main aspects of nuclear energy development by the year 2 000 were summed up by six events or situations which may arise and influence it. From the subjective probabilities (individual and conditional) estimated by people questioned on these six events the new method of crossed impacts "SMIC 74" gives three kinds of results : firstly it established the consistency in probability terms of all replies given by an expert on the events studied. Secondly it builds and grades the possible nuclear energy development synopses of which there are $64 = 2^6$, i.e. as many as there are combinations of events. Thirdly it performs a strategical sensitivity analysis, i.e. an estimate can be made

./.

les scénarios possibles du développement de l'énergie nucléaire : il y en a $64 = 2^6$ c'est-à-dire autant que de combinaisons d'événements. En troisième lieu, elle réalise une analyse stratégique de sensibilité, c'est-à-dire qu'elle permet d'évaluer les effets sur tout le système d'événements des actions qui peuvent être entreprises par le décideur pour favoriser ou retarder le développement de tel ou tel événement.

1975

67 p.

Commissariat à l'Energie Atomique - France

of the way in which the whole system of events is affected by any actions taken by decision-makers to promote or delay the development of one event or another.

1975

67 p.

Commissariat à l'Energie Atomique - France

- Rapport CEA-R 4684 -

Commissariat à l'Énergie Atomique
Département des Programmes

LES SCENARIOS DU DEVELOPPEMENT
DE L'ENERGIE NUCLEAIRE A L'HORIZON 2000

APPLICATION DE LA METHODE SMIC 74

par

Jean-Claude DUPERRIN (C.E.A.)
Michel GODET (S.E.M.A.)
Louis PUISEUX (E.D.F.)

- Juillet 1975 -

LISTE DES RAPPORTS ECONOMIQUES DU J.A. PARIS :

161	1967	RECHERCHES ECONOMIQUES SUR LES REACTEURS A NEUTRONS LENTS ET "INTERMEDIRES"	EVALUATION OF THE ECONOMIC CAPITAL INVESTMENT IN FAST REACTORS AND "INTERMEDIATE" REACTORS	J. GARDIENS	November 1967
162	1967	ANALYSE ECONOMIQUE DES REACTEURS A NEUTRON LENTS ET "INTERMEDIRES"	A STUDY OF AN OPTIMUM FUEL POLICY FOR A FAST REACTOR RESEARCH REACTOR	Dr. A. de P. GARDIENS	May 1968
163	1967	RECHERCHES ECONOMIQUES SUR LES REACTEURS A NEUTRON LENTS ET "INTERMEDIRES"	AN ECONOMIC STUDY OF THE SITE OF REACTORS	R. DUBREUIL	April 1967
164	1967	RECHERCHES ECONOMIQUES SUR LES REACTEURS A NEUTRON LENTS ET "INTERMEDIRES"	LONG TERM PROSPECTS OF FRESHWATER NUCLEAR POWER PRODUCTION USING OPTIMUM FUEL POLICY AND SITE	J. THIRIET R. GARDIENS	April 1967
165	1967	RECHERCHES ECONOMIQUES SUR LES REACTEURS A NEUTRON LENTS ET "INTERMEDIRES"	"EFFECTS OF THE PRICE OF FRESHWATER WATER IN FRANCE"	J. GARDIENS R. BOVIN	April 1967
166	1967	RECHERCHES ECONOMIQUES SUR LES REACTEURS A NEUTRON LENTS ET "INTERMEDIRES"	THE ECONOMIC ASPECTS OF THE USE OF PLANTS IN COMPLEX SEPARATION AND FRESHWATER ADJUSTMENT IN FRANCE	J. GARDIENS R. GALLEY	April 1968
167	1967	RECHERCHES ECONOMIQUES SUR LES REACTEURS A NEUTRON LENTS ET "INTERMEDIRES"	COST OF TRANSFORMING PRELATERALIZED IRRADIATED FUEL INTO FRESHWATER AND THE COST OF TREATMENT OF THE FUEL	R. MONTELLIER	April 1968
168	1967	RECHERCHES ECONOMIQUES SUR LES REACTEURS A NEUTRON LENTS ET "INTERMEDIRES"	ECONOMIC ASPECTS OF FRESHWATER AND INDUSTRIAL WASTE TREATMENT REACTORS	J. GARDIENS R. DUBREUIL F. DUBREUIL F. GARDIENS	April 1968
169	1967	RECHERCHES ECONOMIQUES SUR LES REACTEURS A NEUTRON LENTS ET "INTERMEDIRES"	THE FAST NEUTRON REACTOR SITES IN FRANCE	J. GARDIENS R. GARDIENS R. GARDIENS	April 1968
170	1967	RECHERCHES ECONOMIQUES SUR LES REACTEURS A NEUTRON LENTS ET "INTERMEDIRES"	LONG TERM ASPECTS OF NUCLEAR THAN NUCLEAR REACTOR SITES	J. GARDIENS R. TANCY R. L'Y	April 1968
171	1967	RECHERCHES ECONOMIQUES SUR LES REACTEURS A NEUTRON LENTS ET "INTERMEDIRES"	SITES OF THE LONG TERM VALUES AND POLICY OF DISTRIBUTION A SIMPLIFIED PARAMETRIZED MODEL	J. GARDIENS R. GARDIENS	May 1967
172	1967	RECHERCHES ECONOMIQUES SUR LES REACTEURS A NEUTRON LENTS ET "INTERMEDIRES"	FUEL FUEL OPTIMISATION - NUCLEAR ASPECTS OF FUELS	J. GARDIENS R. de LAFITTE	April 1968
173	1967	RECHERCHES ECONOMIQUES SUR LES REACTEURS A NEUTRON LENTS ET "INTERMEDIRES"	CAPITAL AND RUNNING COSTS OF PLANTS FOR REPRODUCING OR FRESHWATER NUCLEAR REACTORS	J. THIRIET J. GARDIENS J. GARDIENS R. GARDIENS	January 1968
174	1967	RECHERCHES ECONOMIQUES SUR LES REACTEURS A NEUTRON LENTS ET "INTERMEDIRES"	A MATHEMATICAL MODEL FOR COST OF ENERGY BY NUCLEAR APPLICATIONS IN REPRODUCTION OF NUCLEAR REACTORS	J. GARDIENS	May 1968
175	1967	RECHERCHES ECONOMIQUES SUR LES REACTEURS A NEUTRON LENTS ET "INTERMEDIRES"	CHOICE OF OPTIMUM SIZE OF INSTALLATIONS FOR IDEAL FRESHWATER PRODUCTION OF DESALINATED WATER AND ELECTRICITY USING NUCLEAR POWER	J. GARDIENS	September 1968
176	1967	RECHERCHES ECONOMIQUES SUR LES REACTEURS A NEUTRON LENTS ET "INTERMEDIRES"	PROBLEMS OF FRESHWATER PRODUCTION OBTAINED FROM A SEA WATER DESALINATION PLANT	J. GARDIENS	October 1967
177	1967	RECHERCHES ECONOMIQUES SUR LES REACTEURS A NEUTRON LENTS ET "INTERMEDIRES"	OPTIMAL SIZES AND MIXTURE OF NUCLEAR AND FRESHWATER PLANTS	J. THIRIET	April 1967
178	1967	RECHERCHES ECONOMIQUES SUR LES REACTEURS A NEUTRON LENTS ET "INTERMEDIRES"	TECHNICAL AND ECONOMIC PROBLEMS RELATED TO THE DEVELOPMENT OF NUCLEAR THERMAL WATER PRODUCTION AND UTILIZATION THROUGHOUT	J. THIRIET J. GARDIENS J. GARDIENS	February 1968
179	1967	RECHERCHES ECONOMIQUES SUR LES REACTEURS A NEUTRON LENTS ET "INTERMEDIRES"	EFFECTS OF THE DESALINATED WATER MARKET IN FRANCE FOR SMALL SIZES	J. DUBREUIL R. GARDIENS	May 1968
180	1967	RECHERCHES ECONOMIQUES SUR LES REACTEURS A NEUTRON LENTS ET "INTERMEDIRES"	CONDITIONS OF COMPETITION BETWEEN THE PRODUCTION OF WATER BY DESALINATION AND NUCLEAR REACTORS	J. GARDIENS	July 1968
181	1967	RECHERCHES ECONOMIQUES SUR LES REACTEURS A NEUTRON LENTS ET "INTERMEDIRES"	EFFECTS OF INCURRING DEFICITS IN THE PROFITABILITY OF USING NUCLEAR ENERGY IN DESALINATION OF WATER	J. THIRIET R. TANCY	July 1968
182	1967	RECHERCHES ECONOMIQUES SUR LES REACTEURS A NEUTRON LENTS ET "INTERMEDIRES"	EFFECTS OF THE RATE OF NUCLEAR REACTORS DISTRIBUTION ON THE NUCLEAR PROGRAM STRUCTURE	J. GARDIENS R. GALLEY	October 1967
183	1967	RECHERCHES ECONOMIQUES SUR LES REACTEURS A NEUTRON LENTS ET "INTERMEDIRES"	METHOD FOR A LONG TERM ECONOMIC COMPARISON OF NUCLEAR REACTORS AND FRESHWATER PRODUCTION AS A PART OF THE FUEL POLICY OF REACTORS	J. THIRIET	September 1970
184	1967	RECHERCHES ECONOMIQUES SUR LES REACTEURS A NEUTRON LENTS ET "INTERMEDIRES"	A THEORETICAL AND PRACTICAL ANALYSIS OF SAFETY CONSIDERATIONS IN POWER PRODUCTION	R. PUYER R. GARDIENS R. BONNET	April 1971
185	1967	RECHERCHES ECONOMIQUES SUR LES REACTEURS A NEUTRON LENTS ET "INTERMEDIRES"	A DEFERS THERMOPUR APPLICATION MODEL FOR DEVELOPMENT POSSIBILITIES OR ARTIFICIAL HEATING	J. C. DEJAN R. GARDIENS R. de VERMOREL R. VIAL	November 1970
186	1967	RECHERCHES ECONOMIQUES SUR LES REACTEURS A NEUTRON LENTS ET "INTERMEDIRES"	A NEW METHOD FOR QUANTIFYING THE VALUE OF INNOVATIONS	J. THIRIET	October 1970
187	1967	RECHERCHES ECONOMIQUES SUR LES REACTEURS A NEUTRON LENTS ET "INTERMEDIRES"	AN ATTEMPT AT FORECASTING NUCLEAR ENERGY SYSTEMS WITH THEIR SOCIAL CONTEXT	J. C. DEJAN R. GARDIENS	October 1970
188	1967	RECHERCHES ECONOMIQUES SUR LES REACTEURS A NEUTRON LENTS ET "INTERMEDIRES"	SIMULATION MODEL OF ELECTROCHEMICAL INDUSTRY DEVELOPMENT	J. GARDIENS R. GARDIENS J. GARDIENS	October 1970
189	1967	RECHERCHES ECONOMIQUES SUR LES REACTEURS A NEUTRON LENTS ET "INTERMEDIRES"	NUCLEAR ENERGY DEVELOPMENT SCENARIOS AT 2000 : APPLICATION OF SMC TO NUCLEAR ENERGY	J. C. DEJAN R. GARDIENS R. GARDIENS	February 1970

LISTE DES RAPPORTS ECONOMIQUES A PARAITRE :

EXTENSION DE LA PROGRAMMATION DYNAMIQUE A DES PROCESSUS NON QUANTIFIABLES - APPLICATION AU CAS D'UN INVESTISSEMENT OPTIMAL DANS L'INDUSTRIE NUCLEAIRE

EXTENSION OF DYNAMIC PROGRAMMING TO NON QUANTIFIABLE PROCESSES - AN APPLICATION TO PLANT OPTIMAL SIZING

ANALYSE METHODOLOGIQUE DES FAUCES ET DES COUTS DE L'ENERGIE

METHODOLOGICAL ANALYSIS OF ENERGY FAUCES AND COSTS

R. BOURDIEUX
R. BONNET

S O M M A I R E

AVANT-PROPOS	
INTRODUCTION	p. 1
I - DETERMINATION DES VARIABLES QUI COMMANDENT LE DEVELOPPEMENT A LONG TERME DE L'ENERGIE NUCLEAIRE	p. 1
A) Liste des variables	p. 3
B) Matrice d'analyse structurelle	p. 8
C) Hiérarchisation des éléments d'un système : méthode MIC-NAC	p. 9
D) Interprétation des résultats	p. 13
E) Conclusions	p. 16
II - LES SCENARIOS DU DEVELOPPEMENT DE L'ENERGIE NUCLEAIRE A L'HORIZON 2000	p. 17
A) Outil d'analyse : la méthode SMIC 74	p. 17
1° Information disponible	p. 17
2° L'objet et le principe de la méthode SMIC 74	p. 18
B) La construction des scénarios et l'analyse de sensibilité	p. 19
1° La liste des événements retenus	p. 19
2° Analyse d'un résultat	p. 22
C) Conclusions	p. 28
CONCLUSION GENERALE	p. 29
BIBLIOGRAPHIE	p. 30
ANNEXE I - LA NOUVELLE METHODE D'IMPACTS CROISES SMIC 74	p. I
I ₁ Position du problème	p. I
I ₂ Restrictions et champ d'application	p. IV
I ₃ Cadre d'analyse : relations probabilistes entre états et événements isolés	p. V
I ₄ Nouvelle Méthode SMIC 74	p. VIII
I ₅ Compléments d'analyse	p. X
ANNEXE II - LE QUESTIONNAIRE ET L'ENSEMBLE DES RESULTATS	p. IXX
II Questionnaire type	p. XX
II Présentation de l'ensemble des résultats	p. XXVII

AVANT - P R O P O S

A la suite des travaux sur la prospective de l'énergie nucléaire [1], entrepris durant l'année 1973 au Service des Etudes Economiques du C.E.A. sous l'égide de Monsieur THIRIET, il a été constitué un groupe "Prospective" CEA-EDF afin d'explorer les possibilités offertes par la méthode mise au point par un exemple concret : "Le Développement de l'Energie Nucléaire à l'Horizon 2000".

Au cours de nombreuses séances de travail, qui se sont déroulées durant l'année 1974, le groupe est arrivé à certains résultats que nous nous proposons d'explicitier dans ce rapport.

Le groupe s'est d'abord attaché à identifier les variables qui commandent le développement à long terme de l'Energie Nucléaire, puis dans une seconde étape il s'est consacré à l'analyse des événements qui pourraient survenir et infléchir le développement du nucléaire à l'horizon 2000.

Tout au long de cette étude, le groupe a emprunté la démarche prospective mise au point au C.E.A. par J.C. DUPERRIN et M. GODET (actuellement à la S.E.M.A.) [2] et [3] et a bénéficié du renfort de quelques cadres des Etudes Economiques Générales de l'E.D.F. et du C.E.A., animés par L. PUISEUX [9] et par les auteurs de la méthode.

LES SCENARIOS DU DEVELOPPEMENT DE L'ENERGIE NUCLEAIRE A L'HORIZON 2000

APPLICATION DE LA METHODE *Stoic* 74

INTRODUCTION :

Au fur et à mesure que l'évolution du monde s'accélère, la prévision des phénomènes énergétiques s'impose de plus en plus. En effet, plus les changements politiques, économiques, technologiques seront rapides, moins il faudra tarder pour les comprendre et mettre fin aux orientations de politique énergétique prises antérieurement.

La plupart des méthodes de prévision ont pour but de projeter des tendances passées, ce qui serait suffisant dans un univers à évolution lente, mais apparaît tout à fait illusoire dans un monde de plus en plus accéléré où les phénomènes à étudier se caractérisent par une diversité, une complexité et une interdépendance croissantes.

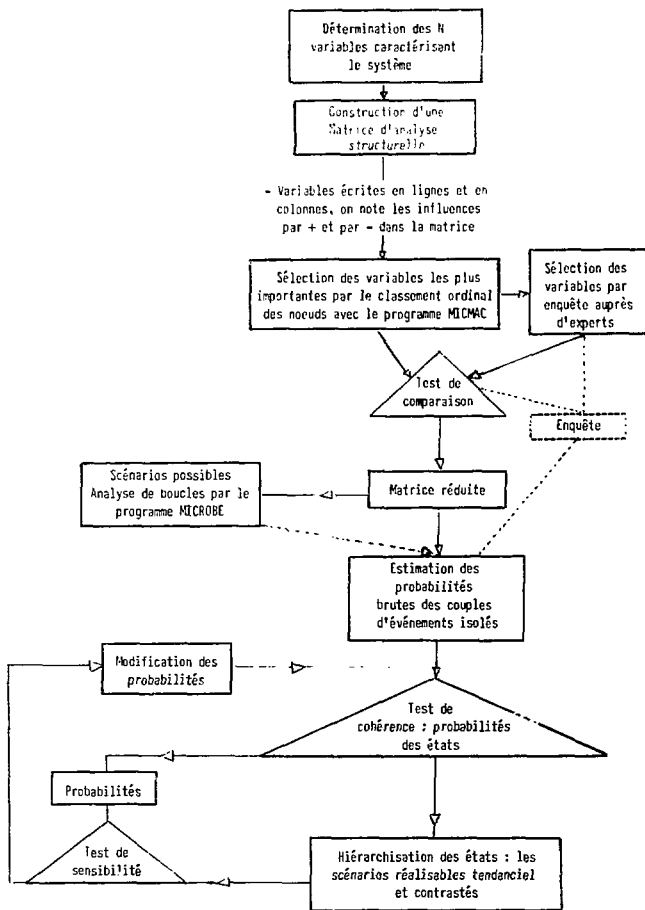
L'appréhension du futur passe donc par une prospective globale où le sujet étudié est replacé dans le système économique et social auquel il appartient. De plus, dans l'étude du devenir d'un système composé de plusieurs structures en relation, ce qui importe n'est pas d'opérer une simple homothétie de chacune de ces structures, mais de déterminer les variables susceptibles d'avoir un impact sur les liaisons. Enfin les variables retenues ne sont pas nécessairement objectives et quantifiables ; le jugement personnel est souvent le seul élément d'information accessible pour la détermination de ces variables. Aussi toute démarche prospective fait appel à des choix au niveau des hypothèses de base, et le résultat est imprégné par le système de valeur implicite ou explicite auquel on est contraint de se référer.

Pour réaliser l'étude prospective du système "Energie-Société à l'horizon 2000", nous avons suivi la démarche illustrée par le graphique suivant :

SEQUENCE METHODOLOGIQUE POUR L'ETUDE PROSPECTIVE D'UN SYSTEME

ETAPE QUALITATIVE - MICMAC -

ETAPE QUANTITATIVE - SNIC 74

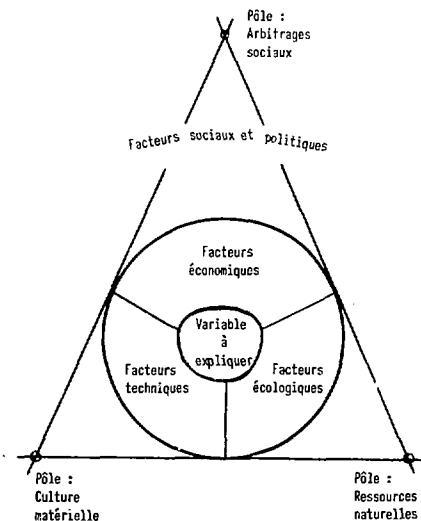


I - DETERMINATION DES VARIABLES QUI COMMANDENT LE DEVELOPPEMENT A LONG TERME DE L'ENERGIE NUCLEAIRE.

A) LA LISTE DES VARIABLES

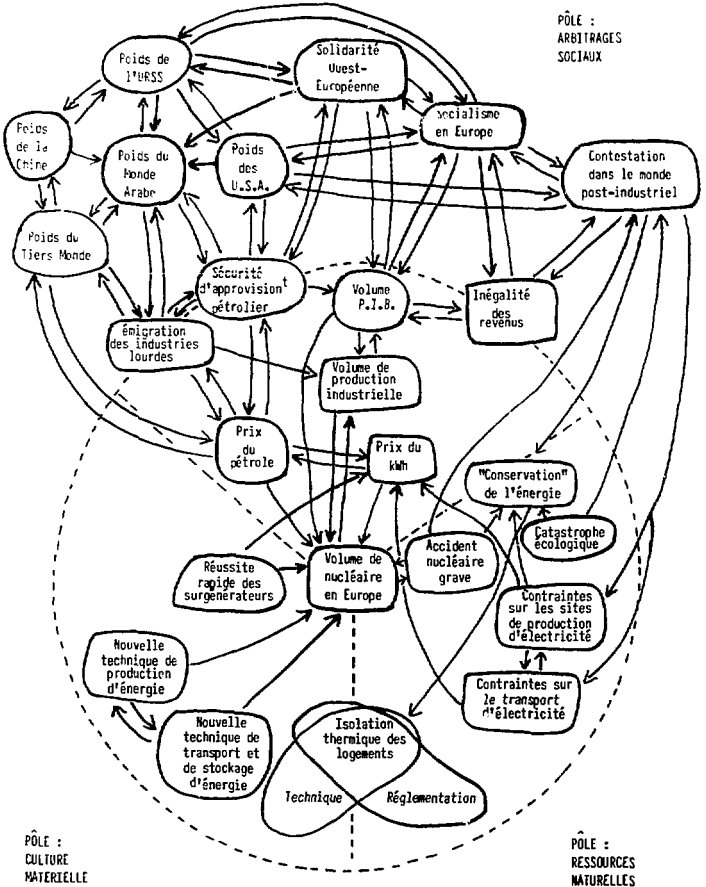
La détermination des variables constituant ce système s'est faite au sein du groupe de travail renforcé par une vingtaine d'ingénieurs d'E.D.F. et du C.E.A., au cours de nombreuses journées de réflexion.

Le groupe s'est appuyé sur la configuration suivante pour déterminer les variables.



Les 26 facteurs représentés ci-dessous ne le sont qu'à titre d'exemple :

On notera que les facteurs figurant à l'intérieur du cercle sont presque tous susceptibles de quantification : "apparition d'une nouvelle technique" pouvant s'exprimer par une baisse de prix, et "renforcement des contraintes sur ..." par une hausse de prix.



LES VARIABLES QUI COMMANDENT LE DEVELOPPEMENT
A LONG TERME DU NUCLEAIRE

a) VARIABLES ECONOMIQUES ET SOCIALES

- 1 - PIB : taux moyen d'ici 2000
- 2 - Régularité de la croissance économique
- 3 - Augmentation des temps libres : journaliers
- 4 - " " " " : hebdomadaires
- 5 - " " " " : annuels
- 6 - Taux d'actifs
- 7 - Inégalité des revenus (aggravation ou réduction de l')
- 8 - Appropriation collective des moyens de production (sociétés multinationales)
- 9 - Transport individuel (développement relatif du)
- 10 - Transport collectif (développement relatif du)
- 11 - Contraintes de financement (aggravation des)
- 12 - Conservation de l'énergie
- 13 - Immigration de main-d'oeuvre venant du Tiers Monde
- 14 - Prix des combustibles fossiles

b) VARIABLES POLITIQUES

- 15 - Régime autoritaire en Europe
- 16 - Contestation
- 17 - Pérennité de l'hégémonie américaine
- 18 - Puissance de l'URSS
- 19 - Puissance du Japon
- 20 - Politique de l'URSS
- 21 - Industrialisation des pays non rentiers
- 22 - Pays rentiers : taux de récupération de la rente
- 23 - Pays rentiers : utilisation de la rente
- 24 - Solidarité du système monétaire international
- 25 - Nombre de détenteurs de la bombe atomique
- 26 - Capacité d'exportation de la Chine (ouverture)
- 27 - Influence politique et sociale de la Chine

- 28 - Cohésion du Tiers Monde
- 29 - Famine dans le Tiers Monde
- 30 - Emigration des industries vers le Tiers Monde
- 31 - Retour aux nations en Europe (semi échec)
- 32 - Scission entre l'Europe du Nord et celle du Sud
- 33 - Réussite de l'Europe
- 34 - Hégémonie allemande
- 35 - Europe équilibrée
- 36 - Société multinationales (renforcement du pouvoir)
- 37 - Politique d'indépendance énergétique
- 38 - Poids du Monde Arabe

c) TECHNIQUES ENERGETIQUES

- 39 - Miniaturisation des moyens de production d'énergie
- 40 - Eau lourde (réussite de la filière nucléaire canadienne)
- 41 - Autonomie européenne pour l'uranium enrichi
- 42 - Géothermie (réussite des techniques)
- 43 - Gazéification du charbon (réussite des techniques)
- 44 - Energie solaire (réussite des techniques)
- 45 - Fusion nucléaire (réussite des techniques)
- 46 - Hydrogène (vecteur de transport et de stockage de l'énergie)
(réussite des techniques)
- 47 - Stockage chimique de l'énergie
- 48 - Transport souterrain de l'électricité
- 49 - Piles à combustibles
- 50 - Isolation thermique des bâtiments
- 51 - Réussite des surrégénérateurs

d) ENVIRONNEMENT

- 52 - Encombrement de l'espace
- 53 - Esthétique
- 54 - Pollution de l'air et de l'eau
- 55 - Déchets nucléaires et traitement du plutonium
- 56 - Contraintes de production et de fonctionnement des centrales
électriques
- 57 - Accident nucléaire rapproché
- 58 - Accident nucléaire éloigné

- 59 - Catastrophe écologique (autre)
- 60 - Sensibilisation à l'environnement
- 61 - Immigration intra-européenne
- 62 - Urbanisation
- 63 - Dispersion dans la taille des villes
- 64 - Contrainte sur les sites de production d'électricité

e) VARIABLE A EXPLIQUER

- 65 - Volume du nucléaire en Europe.

B) MATRICE D'ANALYSE STRUCTURELLE

On obtient la matrice d'analyse structurelle en écrivant en ligne et en colonne les 65 variables et en notant l'influence directe d'une variable sur l'autre.



En comptant le nombre d'influences de chaque variable sur toutes les autres et le nombre de variables par lesquelles chaque variable est influencée, on peut distinguer des variables plutôt "motrices" et des variables plutôt "résultats". On pourra se référer au Modèle POPOLE, exemple remarquable d'analyse structurelle réalisé par P.F. TENIERE-BUCHOT. [4]

Mais toutes les variables retenues agissent les unes sur les autres, et si une matrice d'influence peut aisément rassembler l'ensemble de ces relations binaires, il est impossible de se représenter la totalité des chaînes d'influence entre variables. Or, il importe de connaître les effets directs ou indirects qu'une action sur l'une quelconque des variables peut avoir sur d'autres variables ou sur elle-même par l'intermédiaire de boucles de réactions ou "feedbacks".

L'esprit humain étant incapable d'appréhender et de se représenter en même temps la totalité du réseau infiniment diversifié des relations à étudier, il devient extrêmement difficile de classer, dans la longue liste des variables, les points les plus sensibles du point de vue de l'évolution du système.

Nous proposons d'introduire une classification afin de réduire la complexité du système en limitant l'étude aux variables essentielles.

C) HIERARCHISATION DES ELEMENTS D'UN SYSTEME : METHODE MICMAC

Information disponible.

Nous disposons :

- d'une liste de N variables,
- d'une matrice d'influence.

En se référant à la théorie des graphes orientés, on peut définir des chaînes et des boucles d'influence.

Détermination d'un critère de choix des variables :

En vue de déterminer les variables les plus importantes, une première idée s'impose : classer les variables en fonction du nombre de

liaisons qui arrivent sur celles-ci ou qui en partent. Mais cette première idée s'avère insuffisante car seules les interactions directes sont prises en compte : il faudrait considérer les chaînes d'influence et les effets indirects qu'elles provoquent.

L'ensemble des variables retenues dans la matrice constitue un réseau complexe de relations à la fois très dense et relativement fermé puisqu'il est impossible d'imaginer une variable sur laquelle aucune autre variable n'aurait d'influence et/ou qui serait sans conséquence sur le développement des autres. Lorsqu'on a affaire à un système complexe, il ne faut pas dissocier le choix des variables du choix des relations. En effet, une variable n'existe que par rapport aux autres, et choisir des variables c'est aussi choisir des relations. Remarquons par ailleurs que les relations les plus intéressantes sont celles qui, en engendrant des feedbacks, assurent la dynamique du système. Par conséquent, il paraît normal de considérer les boucles ou circuits d'influence passant par chaque variable et de retenir comme critère de classement le nombre de boucles dans lesquelles chaque variable est impliquée.

Pour appliquer ce critère, nous avons mis au point le programme MICMAC²⁾ (Matrice d'Impacts Croisés - Multiplication Appliquée à un Classement). Ce traitement aboutit à un classement ordinal des variables considérées comme des noeuds entre boucles. Une action sur ces variables aura des retombées importantes sur tout le système ; les variables essentielles sont donc celles par lesquelles passe le plus grand nombre de boucles.

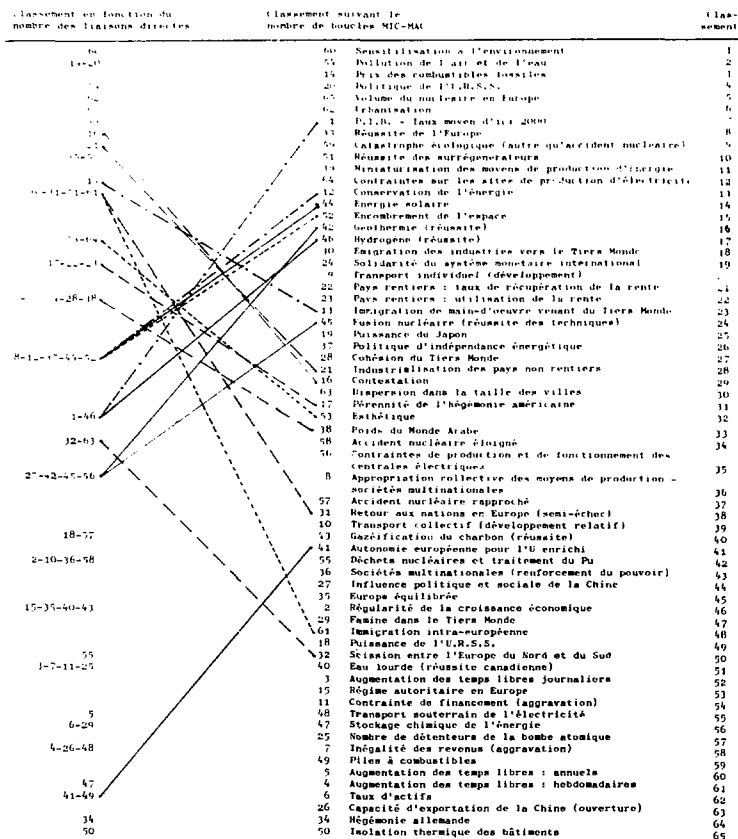
MICMAC nous donne un second classement des variables que l'on peut comparer au premier, obtenu en fonction du nombre de liaisons directes entre elles. En particulier, certaines variables qui, au niveau des impacts directs pouvaient sembler secondaires, se révèlent très importantes lorsque les effets indirects sont pris en compte par l'intermédiaire du nombre de boucles dans lesquelles chaque variable est impliquée.

2) pour un exposé plus détaillé de cette méthode on pourra se référer à [1].

Le graphe des classements se présente sous la forme suivante :

(Seuls les gros écarts entre le classement en fonction du nombre de liaisons directes et le classement suivant le nombre de boucles ont été représentés.)

GRAPHES DES CLASSEMENTS



- - - Variables politiques
 — Variables techniques énergétiques
 - - - Variables économiques et sociales
 - - - Variables environnement

D) INTERPRETATION DES RESULTATS

Les 65 variables de la matrice d'influence sont classées en fonction de deux critères (voir graphe des classements).

- en fonction du nombre de liaisons : c'est-à-dire les influences directes
- en fonction du nombre de boucles : c'est-à-dire les influences indirectes.

On peut dégager certaines tendances par groupes des variables en fonction de l'évolution de ces deux classements.

1° Variables de tête de liste

Ordre	n° de variable	par classement MICMAC
1	60	Sensibilisation à l'environnement
2	54	Pollution de l'air et de l'eau
3	14	Prix des combustibles fossiles
4	20	Politique de l'URSS
5	65	Volume du nucléaire en Europe
6	62	Urbanisation
7	1	PIB taux moyen d'ici l'an 2000
8	33	Réussite de l'Europe
9	59	Catastrophe écologique
10	51	Réussite des surrégénérateurs
11	39	Miniaturisation des moyens de production d'énergie

Par rapport au classement en fonction du nombre de liaisons, deux variables POLITIQUES n'apparaissent plus :

- n° 16 Contestation qui passe du 8ème rang au 29ème
- n° 21 Industrialisation des pays non rentiers
qui passe du 9ème rang au 28ème.

Par contre, apparaît la variable :

- n° 1 PIB : taux moyen d'ici 2000 qui passe du 32ème rang au 7ème.

Ces onze variables sont non seulement importantes par leur action directe, mais aussi par les phénomènes de "bouclage" qu'elles induisent dans tout le système du développement à long terme de l'énergie nucléaire.

Il faut remarquer que la plupart de ces variables sont exogènes aux techniques énergétiques, si ce n'est la réussite des surrégénérateurs et la miniaturisation des moyens de production d'énergie.

2° Variables de fin de liste

Ordre	n° de variable	par classement MICMAC
52	3	Augmentation des temps libres : journaliers
53	15	Régime autoritaire en Europe
54	11	Contrainte de financement
55	68	Transport souterrain de l'électricité
57	47	Stockage chimique de l'énergie
17	25	Nombre de détenteurs de la bombe atomique
58	7	Inégalité des revenus (aggravation ou réduction)
59	49	Piles à combustibles
60	5	Augmentation des temps libres : annuels
61	4	" " " " : hebdomadaires
62	6	Taux d'actifs
63	26	Capacité d'exportation de la Chine
64	34	Hégémonie allemande
65	50	Isolation thermique des bâtiments.

Parmi ces variables qui représentent celles ayant les retombées les plus faibles sur le système Energie, une seule a changé de classement de manière importante en remontant de la 62ème place à la 41ème.

n° 41 Autonomie européenne pour l'uranium enrichi.

Pour ces variables, il serait intéressant de chercher à comprendre pour quelles raisons leurs influences, directes ou indirectes, sont-relativement-si minimes (Isolation thermique des bâtiments ...)

3° Variables intermédiaires

Nous allons examiner les variables pour lesquelles l'écart entre les deux classements est important, par exemple un saut de 10 rangs.

- Les variables politiques

La baisse constatée des variables politiques laisse supposer que leur impact est moins important en termes de retombées qu'en termes d'influences directes.

n° 16	Contestation
n° 17	Pérennité de l'hégémonie américaine
n° 21	Industrialisation des pays non rentiers
n° 31	Retour aux nations en Europe (semi-échec)
n° 32	Scission entre l'Europe du Nord et du Sud
n° 38	Poids du Monde Arabe

- Les variables techniques énergétiques

n° 41	Autonomie européenne pour l'U enrichi	du 62ème rang au 41ème
n° 42	Géothermie (réussite)	du 32ème rang au 16ème
n° 44	Energie solaire (réussite)	du 27ème rang au 14ème
n° 45	Fusion nucléaire (réussite)	du 36ème rang au 24ème
n° 46	Hydrogène (réussite)	du 32ème rang au 17ème

Nous savons que ces classements sont fonction du jugement personnel des personnes qui "remplissent" la matrice d'incidence, mais il est remarquable de constater que les variables techniques énergétiques, moins bien classées que les variables politiques, en termes d'influence directe, semblent jouer un rôle primordial, alors qu'à l'évidence, ce sont ces "techniciens" qui ont apprécié leur impact. (A-t-on, dans ce cas, un exemple de "carte cognitive" représentant l'état d'esprit des décideurs ?)

- Les variables environnement

L'influence de la variable n° 61 "Immigration inter-européenne" semble négligeable en termes de retombées puisqu'elle passe du 13ème rang au 48ème. Celle-ci ne semble donc pas jouer au niveau du développement à long terme de l'énergie nucléaire.

De même, l'esthétique, variable n° 53 passe du 17ème rang au 32ème rang, ce qui indique une baisse notable.

Une exception pour la variable n° 52 : Encombrement de l'espace, qui passe du 27ème rang au 15ème.

- Variables économiques et sociales

La tendance entre les deux classements est à la hausse pour la variable n° 12 "Conservation de l'énergie" (27ème rang au 13ème) et surtout pour la variable n° 1 "PIB : taux moyen d'ici l'an 2000" (32ème rang au 7ème).

Une exception, la variable n° 13 : "Immigration de main-d'œuvre venant du Tiers Monde" dont l'influence est moins sensible que celle qui était envisagée par influence directe (12ème rang au 23ème)

E) CONCLUSIONS

Les interprétations des résultats obtenus ainsi que les tendances dégagées ci-dessus ne doivent pas être prises au pied de la lettre. Il ne s'agit là que d'indications et les incohérences sont finalement fécondes dans la mesure où elles incitent à la réflexion.

On peut cependant dire que les variables les plus importantes par leurs effets directs (classement en fonction du nombre de liaisons) sont aussi dans l'ensemble les plus importantes par leurs retombées sur le système "Energie Nucléaire".

Par ailleurs, à la lecture des résultats figurant sur le graphe I, on remarque que certaines variables, notamment celles caractéristiques des techniques énergétiques, s'avèrent plus importantes qu'il ne semblait a priori. On peut faire la remarque inverse pour les variables politiques.

Le choix d'un nombre limité de variables devrait permettre l'explicitation des boucles avec les influences positives et négatives entre les facteurs de ces boucles, agissant sur la variable "Volume du nucléaire en Europe". Il serait alors possible dans une première étape³⁾

3) cf. [1]

de sélectionner les chemins alternatifs, à la disposition du décideur, pour atteindre plus aisément un niveau de "développement du nucléaire en Europe" et dans une deuxième étape, d'effectuer une étude quantitative de sensibilité des différents facteurs mesurant leurs impacts sur "le développement du nucléaire en Europe".

II - LES SCENARIOS DU DEVELOPPEMENT DE L'ENERGIE NUCLEAIRE A L'HORIZON 2000.

A) OUTIL D'ANALYSE : LA METHODE SHIC 74⁴⁾

De même que l'on peut résumer l'histoire passée par une série d'événements marquants, on peut repérer les futurs possibles par une liste d'événements qui, s'ils se produisent à un horizon donné, traduiront soit le maintien ou la rupture d'une tendance, soit le développement d'une tendance encore en germe.

Cet ensemble d'événements constitue un "référentiel" dans lequel il y a autant d'états possibles, c'est-à-dire de scénarios, que de combinaisons d'événements.

Pratiquement, si l'on considère un système de N événements ($e_1, e_2 \dots e_N$) il y a 2^N états ou scénarios possibles pour ce système. Dire par exemple qu'à tel horizon se produisent $e_1, e_2, e_4 \dots e_N$, mais non e_3 , est l'un de ces 2^N scénarios.

1° Information disponible

L'information brute disponible se présente sous la forme

- de la liste des N événements isolés considérés comme importants pour l'objet de l'étude :

$$H = (e_1, e_2, \dots, e_N)$$

Le groupe d'experts détermine cette liste en tenant compte des résultats du programme MICMAC. Un événement étant défini comme une variable assortie d'un seuil.

4) Pour un exposé plus détaillé de cette méthode on pourra se reporter à [2] et [3] et à l'annexe n° 1.

- Des probabilités d'arrivée des événements isolés dans la période étudiée

$P(i)$ probabilité de l'événement isolé e_i ,

c'est-à-dire la probabilité que e_i se produise effectivement dans la période.

- Des probabilités conditionnelles des événements isolés pris deux à deux :

$P(i/j)$ probabilité de i si j est arrivé

$P(i/\bar{j})$ probabilité de i si j n'est pas arrivé.

En pratique, ces informations, portant sur des événements non indépendants, renferment une certaine part d'incohérence et doivent être corrigées de telle manière que les résultats nets respectent les conditions classiques sur les probabilités :

a) $0 \leq P(i) \leq 1$

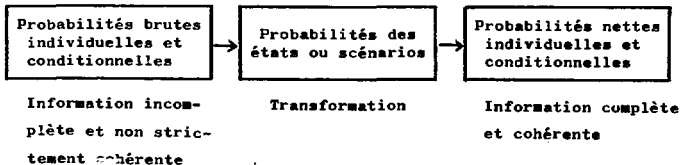
b) $P(i/j) \cdot P(j) = P(j/i) \cdot P(i) = P(i, j)$

c) $P(i/j) \cdot P(j) + P(i/\bar{j}) \cdot P(\bar{j}) = P(i)$

2° L'objet et le principe de la méthode SMIC 74

La méthode repose sur l'hypothèse que, bien que les opinions émises à la suite de certaines questions particulières portant sur des événements non indépendants renferment une certaine part d'incohérence, il existe une opinion globale, inexprimée, implicite si l'on considère l'ensemble des réponses aux autres questions, mais cohérente.

Le principe retenu est d'obtenir des probabilités nettes cohérentes à partir des probabilités des états du système d'événements, c'est-à-dire de l'opinion globale inexprimée mais implicite.



B) LA CONSTRUCTION DES SCENARIOS ET L'ANALYSE DE SENSIBILITE

1° Liste des événements retenus

Nous avons retenu six événements qui nous ont paru caractériser un certain nombre de tendances spécifiques du système Energie et Société à l'horizon 2000.

Ces six événements sont les suivants :

a) Nucléaire fort

La consommation d'énergie d'origine nucléaire (sous forme électrique, hydrogène ou vapeur) est au moins égale à 5 tonnes d'équivalent charbon par tête et par an en Europe Occidentale. (C'est le niveau de consommation toutes formes d'énergie en 1973, le niveau américain étant voisin de 13 tec.)

N.B. 1 - Cette hypothèse est compatible soit avec une consommation toutes formes d'énergie très élevée, où les combustibles fossiles occuperaient encore une place importante - soit avec une consommation totale moins élevée où le nucléaire serait déjà majoritaire, soit avec toute situation intermédiaire.

N.B. 2 - Cette hypothèse suppose à l'évidence que le nucléaire n'aura pas fait l'objet d'un processus de rejet pour motifs écologiques de la part de la population européenne, ou au moins que ce processus de rejet aura été complètement surmonté avant l'an 2000.

N.B. 3 - Cette hypothèse est évidemment favorisée par une réussite rapide des surgénérateurs.

N.B. 4 - Cette hypothèse est également favorisée par la mise au point rapide d'un processus de production économique à grande échelle de l'hydrogène à partir du nucléaire.

b) Revenu élevé

La croissance du Revenu National (ou de la P.I.B. ou du P.N.B.) par habitant en monnaie constante se sera poursuivie en Europe

Occidentale d'ici l'an 2000 à un rythme moyen supérieur à 3,5 % par an (à comparer au rythme de 4,5 à 5 % par an au cours des quinze ou vingt dernières années), ce qui correspond à un niveau de revenu au moins 2,4 fois supérieur à celui d'aujourd'hui (en évaluant le revenu selon les conventions actuelles de la comptabilité nationale, c'est-à-dire hors de toute déduction pour nuisances).

N.B. 1 - Selon ces mêmes conventions, le niveau de revenu actuel des Etats-Unis est 1,6 fois celui de la France, et 1,8 fois celui de l'ensemble de la C.E.E.

N.B. 2 - Cette hypothèse implique que le système monétaire international aura su s'adapter tant bien que mal, et au moins qu'il n'aura pas subi de crise majeure de l'ampleur de celle de 1929, et que la tendance actuelle à l'accélération de l'inflation aura été renversée.

c) Europe Unie

L'Europe Occidentale (= au moins les Neuf) n'a plus en l'an 2000 qu'une seule monnaie, un système de défense unifié, et un gouvernement fédéral ou confédéral ayant assez d'autorité interne pour pouvoir prétendre parler d'égal à égal avec les super-grands de l'époque, c'est-à-dire tenir les premiers rôles au niveau planétaire.

N.B. 1 - Cette hypothèse implique naturellement une politique énergétique commune, et la possibilité d'une unification du système énergétique européen.

N.B. 2 - Cette hypothèse semble nécessaire (mais non suffisante) pour permettre à l'Europe Occidentale une stratégie de coopération à long terme et à grande échelle avec les pays d'Afrique et du Moyen-Orient, stratégie qui conduirait à déplacer de l'autre côté de la méditerranée une partie des industries grosses consommatrices d'énergie.

d) Subordination de la croissance à la qualité

Dans le comportement des Pouvoirs Publics comme dans celui des principaux agents économiques, l'impératif de la croissance quantitative est en l'an 2000 subordonné à l'amélioration de la qualité de la vie, de l'environnement et des relations sociales.

N.B. 1 - Cette hypothèse implique une nette préférence pour des modes décentralisés de production et d'habitat, et un net resserrement de l'éventail des revenus.

N.B. 2 - Cette situation peut résulter soit d'une crise politique et/ou économique profonde d'ici l'an 2000, - soit d'un ajustement en douceur par corrections progressives, - soit de tout cheminement intermédiaire.

N.B. 3 - Elle semble impliquer en tous cas un développement sensible de la planification, et un déclin de la puissance des sociétés multinationales privées.

e) Sévères lois écologiques limitant le nucléaire

La législation nationale et internationale sur l'environnement a atteint en l'an 2000 un degré de sévérité tel, qu'il est impossible en Europe Occidentale de construire une centrale nucléaire sinon enfouie sous terre, ou éloignée en mer. Le reste à l'avenant.

N.B. - Une telle situation peut résulter d'accidents plus ou moins graves imputables au nucléaire, survenus n'importe où dans le monde, et/ou de l'opposition au nucléaire d'une partie importante de l'opinion publique dans un ou plusieurs pays concernés, opposition susceptible de mobiliser un grand nombre de personnes contre la filière électronucléaire.

f) Réussite des énergies nouvelles

La part des nouvelles formes d'énergie (solaire, géothermie, etc...) dans la consommation totale d'énergie est d'au moins 5 % en Europe Occidentale (ce qui correspond à la position relative du nucléaire en France en 1978 - 79).

N.B. 1 - Cette hypothèse est évidemment favorisée par une croissance faible de la consommation totale d'énergie toutes formes, résultant soit d'une croissance économique médiocre, soit d'une politique de conservation de l'énergie en longue période.

N.B. 2 - Elle implique qu'en développement, la part de ces énergies nouvelles dans les équipements mis en service chaque année soit très supérieure à 5 % bien avant l'an 2000.

On trouvera en Annexe II la liste des 18 experts interrogés et le questionnaire type auquel ils ont répondu.

Nous présentons ci-dessous une analyse détaillée de la réponse d'un expert, afin d'illustrer le type de résultat que peut fournir la méthode.

2° Analyse d'un résultat

a) Les données brutes

Nous nous intéressons aux réponses d'un expert au questionnaire. Celui-ci fournit :

- les 6 probabilités brutes des événements isolés $p(e_i)$ que l'on retrouve dans la diagonale principale de la matrice P
- les 30 probabilités conditionnelles $p(i/j)$: matrice P
- les 30 probabilités conditionnelles $p(i/\bar{j})$: matrice PB

	e_1 réalisé	e_2 réalisé	e_3 réalisé	e_4 réalisé	e_5 réalisé	e_6 réalisé
MATRICE P						
Probabilité nucléaire fort	0.30	0.60	0.50	0.10	0.10	0.30
" revenu élevé	0.60	0.20	0.50	0.20	0.30	0.50
" Europe unie	0.50	0.50	0.40	0.30	0.30	0.40
" qualité > croissance	0.10	0.20	0.10	0.20	0.50	0.60
" lois c/nucléaire	0.10	0.20	0.10	0.70	0.70	0.80
" énergies nouvelles	0.10	0.20	0.30	0.80	0.70	0.50

	e_1 non réalisé	e_2 non réalisé	e_3 non réalisé	e_4 non réalisé	e_5 non réalisé	e_6 non réalisé
MATRICE PB						
Probabilité nucléaire fort		0.25	0.25	0.40	0.50	0.50
" revenu élevé	0.30		0.10	0.30	0.40	0.30
" Europe unie	0.30	0.30		0.50	0.50	0.40
" qualité > croissance	0.30	0.25	0.10		0.10	0.10
" lois c/nucléaire	0.80	0.50	0.30	0.50		0.30
" énergie nouvelles	0.60	0.40	0.20	0.20	0.10	

Cette information est incohérente au sens admis précédemment (cf. 1°, p. 18).

Pour obtenir des résultats corrigés, nous calculons les probabilités d'états, ce qui nous permet en même temps de connaître les scénarios les plus vraisemblables.

b) Les valeurs nettes

Pour la commodité de l'exposé, nous allons d'abord présenter et commenter les probabilités individuelles et conditionnelles corrigées.

Nous commenterons ensuite les probabilités d'états qui ont permis de modifier l'information de départ.

Les probabilités corrigées se présentent donc sous forme de deux matrices : Nouvelle matrice P, Nouvelle matrice PB dont nous pouvons analyser les écarts par rapport aux probabilités initiales.

NOUVELLE MATRICE P

0.296	0.421	0.426	0.037	0.106	0.134
0.387	0.272	0.417	0.149	0.251	0.305
0.585	0.623	0.407	0.304	0.400	0.493
0.027	0.118	0.162	0.217	0.387	0.516
0.195	0.503	0.536	0.973	0.545	0.988
0.189	0.469	0.507	0.997	0.757	0.418

NOUVELLE MATRICE PB

	0.249	0.207	0.367	0.524	0.412
0.224		0.173	0.306	0.298	0.248
0.332	0.326		0.435	0.415	0.344
0.296	0.253	0.254		0.013	0.001
0.692	0.561	0.552	0.427		0.227
0.514	0.399	0.357	0.258	0.011	

Selon l'ensemble de ses réponses, la probabilité d'apparition d'une loi limitant le nucléaire est beaucoup plus faible que ne le pensait l'expert en répondant directement à la question correspondante : elle passe de 0,70 à 0,54.

Par ailleurs, certaines probabilités conditionnelles subissent des modifications non négligeables ; ceci s'explique aisément : il est en effet plus souvent plus facile d'estimer une probabilité individuelle qu'une probabilité conditionnelle, et l'analyse des relations entre deux événements est délicate : une relation causale est souvent confondue avec une relation conditionnelle.

Ainsi ont fait l'objet de corrections importantes :

- la probabilité d'une législation s'opposant au nucléaire à l'horizon 2000, sachant qu'à cette époque l'Europe est unie, $P(5/3)$ passe de 0.1 à 0.54 - en revanche, $P(5/\bar{3})$ passe de 0.3 à 0.55.

- la probabilité que la croissance soit subordonnée à la qualité alors que les énergies nouvelles n'ont pas réussi, $P(4/6)$ passe de 0.1 à 0.001 c'est-à-dire qu'elle devient pratiquement nulle.

La réussite des énergies nouvelles apparaît comme une condition nécessaire pour la subordination de la croissance à la qualité.

c) Les probabilités des scénarios

Pour 6 événements, il y a $2^6 = 64$ états possibles. Les 15 scénarios réalisables, c'est-à-dire ayant une probabilité non nulle, sont classés par ordre décroissant.

000111	0.121	...	France écologique
000010	0.113		
111000	0.091	...	Europe unie électronucléaire
100000	0.088	...	Nucléaire à tout prix
001011	0.072	...	Europe écologique
011011	0.055		
101000	0.059		
010000	0.044		
001000	0.039		
100011	0.035		
010011	0.027		
010111	0.024		
111011	0.013		

Les cinq premiers scénarios constituent le "noyau tendanciel"; dans l'esprit du répondant, il y a une chance sur deux que l'un de ces scénarios se réalise effectivement d'ici l'an 2000.

Les probabilités attribuées implicitement aux quatre ou cinq premiers scénarios de la liste ci-dessus ne sont pas très écartées les unes des autres. Cependant, le scénario le plus probable prévoit :

- la réussite des énergies nouvelles,
- la subordination de la croissance à la qualité
- une législation contraignante pour le nucléaire.

Selon ce scénario, que l'on peut qualifier de "France écologique", le nucléaire est faible, l'union de l'Europe n'est pas faite, et la croissance économique est ralentie.

Le scénario symétrique du précédent (111000) que l'on peut qualifier "d'Europe unie électronucléaire" fait aussi partie du noyau tendanciel.

Parmi les scénarios peu probables, la plupart envisagent l'apparition d'une loi contre le nucléaire et la réussite des énergies nouvelles : 11.

Ainsi par exemple, (010011) dont la probabilité est 0,02.

Nous sommes dans la situation suivante: l'union européenne ne s'est pas faite, ce qui n'empêche pas la croissance économique de rester soutenue. La France a renoncé à un développement massif du nucléaire et se "paye le luxe" de développer les énergies nouvelles qui représentent déjà une part non négligeable de la consommation totale d'énergie.

d) L'analyse stratégique de sensibilité

L'analyse de sensibilité consiste à mesurer la variation ΔP_j de la probabilité P_j de l'événement "j" à la suite d'une variation ΔP_i de la probabilité P_i de l'événement "i".

La construction d'une matrice d'élasticité permet de déduire des événements moteurs ou dominants et des événements dominés.

Les effets de l'action sur chaque événement sont mesurés par les coefficients d'élasticité. Par conséquent, le décideur sait sur quels événements il doit agir pour faire évoluer le système d'événements dans le sens souhaité.

A partir des résultats nets on calcule l'élasticité : $e_{ij} = \frac{\Delta P_j}{P_j} / \frac{\Delta P_i}{P_i}$

Nous rappelons pour mémoire la liste des événements :

e_1	nucléaire fort
e_2	revenu élevé
e_3	Europe unie
e_4	subordination de la croissance à la qualité
e_5	sévères lois écologiques limitant le nucléaire
e_6	réussite des énergies nouvelles

Le tableau suivant rassemble les résultats. Les calculs ont été fait avec un pas $\Delta P_i = 0,1$ pour tout "i"

	e_1	e_2	e_3	e_4	e_5	e_6	$\sum_j e_{ij} $
e_1		- 0,28	- 0,24	- 0,82	- 0,68	- 0,61	2,63
e_2	- 0,14		- 0,12	- 0,42	- 0,35	- 0,25	1,28
e_3	- 0,08	+ 0,01		- 0,53	- 0,48	- 0,27	1,37
e_4	- 0,40	- 0,38	- 0,27		- 0,06	+ 0,07	1,18
e_5	- 1,41	- 0,50	- 0,51	+ 1,64		+ 1,68	5,74
e_6	- 0,62	- 0,40	- 0,9	+ 2,16	+ 0,34		4,42
$\sum_i e_{ij} $	2,65	1,57	2,04	5,57	1,91	2,88	16,62

$\begin{matrix} j \\ \vdots \\ i \end{matrix} \left| \begin{matrix} e_{ij} \end{matrix} \right.$
 signifie valeur absolue

Le coefficient d'élasticité e_{ij} peut s'interpréter comme suit : si la probabilité de i augmente de 100 %, la probabilité de j augmente de $100 \times e_{ij}$ pour cent.

On relève par exemple que $e_{54} = 1,64$ et $e_{51} = - 1,41$, ce qui veut dire que si la probabilité de la législation contre les centrales nucléaires augmente de 100 %, la probabilité d'apparition de la qualité de la vie augmente de 160 % et celle du développement de l'énergie nucléaire diminue de 140 %.

A la lecture des totaux marginaux en ligne, on constate que l'impact de certains événements est plus important que d'autres.

Ainsi l'occurrence d'une loi contre le nucléaire a beaucoup plus d'influence que l'émergence de l'Europe. En effet, la ligne de l'événement J (Europe unie) a toutes ses élasticités inférieures à 1, alors que la législation allant à l'encontre d'un développement nucléaire influe fortement sur les autres événements, dans un sens positif ou négatif d'ailleurs. Les "décideurs" ayant la possibilité de modifier la législation dans le domaine énergétique, peuvent grâce à cette analyse de sensibilité, apprécier les conséquences de leur décision.

La lecture des totaux marginaux en colonne montre que certains événements sont plus dominés que d'autres.

C'est ainsi que la prééminence de la qualité de la vie (e_4) est très sensible aux variations de probabilités des autres événements ; ceci provient naturellement des deux coefficients e_{54} et e_{64} qui ont respectivement comme élasticité $+ 1,64$ et $+ 2,16$.

Quant à l'événement revenu élevé, il est peu dominé (la somme en colonne = 1,57) et peu influent (la somme en ligne = 1,28). Dans l'esprit de l'expert, le système d'événements étudié est peu sensible à l'occurrence ou la non occurrence de cet événement.

On peut remarquer aussi que le développement du nucléaire diminue les probabilités d'apparition de tous les autres événements.

C) CONCLUSIONS

L'analyse détaillée d'un résultat montre que l'application de la méthode SMIC 74 est riche d'enseignements et suscite de nombreux commentaires.

Non seulement SMIC 74 corrige une information brute pour obtenir des résultats nets cohérents sur les probabilités d'événements ; mais elle donne aussi les probabilités des états du système et, permet de distinguer à l'intérieur du domaine des réalisables, les scénarios les plus probables et les moins probables.

Enfin, l'analyse stratégique de sensibilité est un outil précieux pour le décideur.

En ce qui concerne la mise en oeuvre de la méthode, cette expérience permet de formuler certaines suggestions.

1° Pour éviter les distorsions dans les réponses dues à des individus ayant le même schéma de pensée, mais dont la mesure est soit plus optimiste ou plus pessimiste que la moyenne des individus, il paraît souhaitable de proposer une échelle de valeurs à 5 ou 7 niveaux.

Par exemple :

Réalisation	certaine
"	très probable
"	probable
"	égale probabilité
"	improbable
"	très improbable
"	certaine de ne pas avoir lieu.

2° Une autre question a retenu notre attention : celle de l'agrégation ou de la non agrégation des réponses.

Cette question reste à l'étude. Néanmoins nos premières conclusions sont les suivantes :

a) le problème n'est pas le même suivant que l'on a affaire à un groupe de 5, 20, ou 100 experts.

b) il ne faut pas agréger les réponses brutes et conserver la diversité et la richesse des réponses.

c) il faut trouver des classes de réponses en faisant appel par exemple à une méthode d'analyse de données.

CONCLUSION GENERALE

Le présent rapport n'avait d'autre prétention que de faire le point d'une recherche en cours, dont les modalités d'achèvement ne sont pas encore arrêtées.

Il va de soi que les résultats de ce type de recherche valent ce que valent les réponses des experts interrogés. L'interrogation d'un plus grand nombre d'experts apportera davantage de fiabilité aux réponses : cette phase nouvelle est prévue pour 1975.

Il est clair d'autre part qu'aucun expert, du fait même de sa compétence, ne peut prétendre à la neutralité ou à l'objectivité totale. Mais cela ne condamne pas la méthode proposée ci-dessus, qui peut au contraire être utilisée "à rebours", pour mettre en évidence des différences significatives entre les modes de raisonnement implicites des diverses catégories d'experts consultés, et éclairer le système de décision correspondant.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] J.C DUPERRIN - "Méthode de hiérarchisation des éléments d'un système : essai de prospective du système de l'énergie nucléaire dans son contexte sociétal"
M. GODET
Rapport économique C E A - R 4541 - décembre 1973
- [2] J.C DUPERRIN - "Prospective des systèmes et construction de scénarios à partir d'une nouvelle méthode d'impacts croisés : SMIC 74"
M. GODET
METRA vol. XIII n° 4 - 1974
- [3] M. GODET - "Les scénarios du transport aérien à l'horizon 1990
Analyse stratégique par la méthode SMIC 74"
METRA vol. XIV n° 1 - 1975
- [4] P.F TENIERE-BUCHOT - Modèle POPOLE
- Analyse et prévision - Futuribles
février - mars 1973
- [5] T.J GORDON - Initial Experiments with the cross impact matrix
method of forecasting
FUTURES - mars 1968
- [6] N. DALKEY - An elementary cross impact model
Technological forecasting and social change - 1972
- [7] HOWARD - E. JOHSON
- "Some computational aspects of cross impact matrix
forecasting"
FUTURES - juin 1970
SELWYN ENZER - FUTURES de décembre 1970 et mars 1972
- [8] J. VILLE - Etude critique de la Notion de collectif
Gauthier-Villars - Paris - 1937
- [9] L. PUISEUX - "L'énergie et le désarroi Post-industriel"
Hachette, décembre - 1973

I₁ POSITION DU PROBLEME

Les systèmes sociaux sont de plus en plus complexes et diversifiés. Les phénomènes sont de plus en plus interdépendants, les événements de plus en plus liés. Par conséquent, la maîtrise du futur passe par une connaissance immédiate de ce que pourrait être l'avenir. De même qu'on peut résumer l'histoire passée par une série d'événements marquants, on peut repérer les futurs possibles par une liste d'événements qui, s'ils se produisent, sont considérés comme importants pour un horizon donné, cet ensemble d'événements constitue un "référentiel" dans lequel il y a autant d'états possibles (de futuribles) que de combinaisons d'événements. La question à laquelle nous nous proposons de répondre est de savoir comment déterminer les événements et, par conséquent, les états les plus probables.

Il convient de rappeler qu'en face du futur, le jugement personnel est souvent le seul élément d'information accessible. Le chercheur faisant lui-même partie de la société qu'il se propose d'étudier, la plupart des idées émises sont subjectives. A ce propos, deux remarques s'imposent :

R₁ cette subjectivité s'applique à l'étude de systèmes de plus en plus complexes, et l'esprit humain est incapable de saisir et d'intégrer à sa pensée le réseau infiniment diversifié des relations à étudier.

R₂ les opinions émises à la suite de certaines questions particulières portant sur des événements non indépendants, renferment une certaine part d'incohérence par rapport à l'opinion globale, inexprimée mais implicite si l'on considère l'ensemble des réponses aux autres questions.

Ces remarques suscitent deux propositions :

- P₁ le support mathématique et le traitement informatique s'avèrent nécessaires pour prendre en compte l'ensemble des interdépendances entre événements, pour intégrer les informations partielles dans un tout.
- P₂ il faut tester la cohérence des informations rassemblées et éventuellement corriger les estimations.

Certaines méthodes comme Delphi permettent assez bien de collecter les opinions et d'aboutir à un résultat convergent. Mais cette méthode présente le défaut de ne pas tenir compte des interactions entre événements. A l'inverse, la Méthode des Impacts Croisés (M.I.C.) présente l'avantage de prendre en compte à la fois les opinions exprimées et les interdépendances entre questions posées, et offre, par conséquent, une grille de lecture plus cohérente.

La Méthode des Impacts Croisés est le terme générique d'une famille de techniques qui tente d'évaluer les changements dans les probabilités d'apparition d'un ensemble d'événements à la suite de l'apparition de l'un deux. Cette méthode se présente d'abord sous la forme d'une liste d'événements avec les probabilités de développement qui leur sont associées ; l'hypothèse de base de la méthode est que les probabilités estimées tiennent compte des interactions, mais incomplètement. La prise en compte de ces interdépendances entre événements permet de passer d'un système de probabilités brutes à un système de probabilités nettes.

Plusieurs méthodes ont été proposées. Tout d'abord l'évaluation des interactions s'est faite avec des coefficients d'impact compris entre + 10 et - 10 ([5] GORDON) ; le passage des probabilités brutes aux probabilités nettes faisant le plus souvent appel à des techniques assez sophistiquées : méthode de Monte-Carlo avec itérations successives. A la suite des travaux de GORDON, la méthode a fait l'objet d'autres approches ; on peut citer NORMAN DALKEY [6] qui s'appuie sur une matrice des probabilités conditionnelles entre tous les couples d'événements pour modifier le système de probabilités initial. Cette

approche constitue un progrès par rapport à celle de GORDON puisque les probabilités étant non plus modifiées à partir de coefficients mais à partir d'autres probabilités, les données sont plus homogènes.

Les contraintes matérielles et financières mises à part, l'utilisation de la M.I.C. telle qu'elle est proposée par GORDON et améliorée par DA. KEY reste très peu crédible. En effet, les résultats obtenus¹⁾ dépendent de la formule de passage adoptée pour le calcul des probabilités nettes. Plusieurs formules ont été proposées, souvent constituées en un savant mélange entre formes quadratiques, espérances mathématiques et coefficients de pondération subjectifs... En pratique, aucune ne s'impose et sur un même exemple, il y a autant de résultats que de formules testées. En particulier, rien ne justifie l'emploi dans ces formules de passage du produit $P_i (1 - P_i)$ qui est maximum pour P_i égal à 0,5 et minimum pour P_i égal à 0 ou 1 - et par conséquent a tendance à empêcher les modifications pour les probabilités proches de 0,5 et à faciliter celles des probabilités extrêmes.

Le souci de proposer une formule de passage qui ait un sens a conduit les différents auteurs [7] à faire appel à la théorie de l'information. L'approche est séduisante, mais l'obtention des résultats reste complexe et entachée de subjectivité (emploi de coefficients de pondération individuels et collectifs).

De plus, l'objet de la méthode devrait consister à contrôler la cohérence des estimations relativement aux contraintes classiques sur les probabilités (cf. I₃). En pratique, la plupart des méthodes, quel que soit leur degré de complexité, aboutissent à des probabilités nettes incohérentes, avec des résultats du type, par exemple, $P(i) < P(i/j) \cdot P(j)$, ce qui n'est pas compatible avec la relation $P(i) = P(i/j) \cdot P(j) + P(i/\bar{j}) \cdot P(\bar{j})$ qui doit toujours être vérifiée.

Finalement, les différentes M.I.C. mises au point jusqu'ici ne nous semblent pas satisfaisantes. C'est pourquoi il nous a paru nécessaire de reprendre la question à son point de départ et dans sa totalité.

1) bien évidemment les résultats à la sortie dépendent d'abord des données entrées, mais ceci est vrai pour tout modèle.

Dans les pages suivantes, nous allons tout d'abord préciser les limites de la méthode des impacts croisés, ensuite proposer une nouvelle approche.

I₂ RESTRICTIONS ET CHAMP D'APPLICATION

Nous nous intéressons à l'horizon t que couvre la période T et à la probabilité qu'a chaque événement de se produire pendant cette période T . Nous limitons le domaine de notre étude aux points suivants :

I₂ 1° Evénements discrets

On peut en partie supprimer l'hétérogénéité due à l'existence d'événements discrets et continus en "discrétisant" les événements continus grâce à la définition de seuils. Par exemple, pour l'événement "baisse de l'âge de la retraite", on peut délimiter certains seuils, 50 ans, 55 ans, 60 ans.

I₂ 2° Evénements non récurrents

Les événements sont considérés comme non récurrents. Si l'on s'intéresse à un horizon donné t et à la période T qui sépare le présent de cette date, un événement ne peut se produire plus d'une fois.

I₂ 3° Système sans mémoire (on ne tient pas compte de l'ordre d'arrivée des événements isolés)

Certains phénomènes, mécaniques, physiques, chimiques, etc, sont sans mémoire, mais la plupart des systèmes économiques et sociaux sont à mémoire. L'image que l'on prétend avoir du futur au travers d'un ensemble d'événements devrait donc intégrer ce concept de mémoire. Mais comme le montre le tableau ci-dessous le nombre de paramètres qu'il faut théoriquement connaître pour spécifier complètement le système étudié s'impose comme une limite insurmontable dans la mesure où c'est à l'esprit humain de fournir l'information :

Nombre d'événements	Impacts croisés	Système sans mémoire	Système avec mémoire
N	N^2	$N \cdot 2^{N-1}$	$\sum_{J=1}^N \frac{(N)!}{(J)!} \cdot n^J$
2	4	4	4
3	9	12	15
4	16	32	64
5	25	80	325
10	100	5 120	10 millions

Dans ce tableau, nous limitons nos calculs aux systèmes à événements non récurrents.

I₃ CADRE D'ANALYSE : RELATIONS PROBABILISTES ENTRE ETATS ET EVENEMENTS ISOLEES

Soit $H = (e_1, e_2, \dots, e_N)$ un ensemble fini d'événements isolés :

1) Ces événements isolés sont liés entre eux :

Il existe un ensemble R de relations tel que :

$$\forall (i, j) \exists R_{ij} \in R \quad e_i R_{ij} e_j$$

2) On considère le système S constitué par l'ensemble de ces événements isolés en relation :

$$S = (H, R) \quad R = \{R_{ij}\}$$

3) Nous considérons des événements isolés, non récurrents, c'est-à-dire ne pouvant se produire qu'une fois au plus dans la période T considérée, et nous ne tenons pas compte de leur ordre d'arrivée.

Nous appellerons état ou scénario du système d'événements isolés toute combinaison correspondant à l'arrivée d'un certain nombre d'événements isolés pendant la période considérée et de ceux-là seulement.

Soit par exemple :

$$H = (e_1, e_2, e_3)$$

$E_k = (e_1, \bar{e}_2, e_3)$ correspondant à l'arrivée de e_1 et e_3 et non e_2 .

Pour un système S de N événements isolés, il y a $2^N = r$ états possibles.

- chaque état E_k possède une probabilité inconnue π_k avec

$$\sum_k \pi_k = 1$$

$$\begin{aligned} E_1 &= (e_1, e_2, \dots, e_i, \dots, e_N) \\ E_2 &= (\bar{e}_1, e_2, \dots, e_i, \dots, e_N) \\ E_3 &= (e_1, \bar{e}_2, \dots, e_i, \dots, e_N) \\ &\vdots \\ E_r &= (\bar{e}_1, \bar{e}_2, \dots, \bar{e}_i, \dots, \bar{e}_N) \end{aligned}$$

- à chaque événement isolé e_i , on peut associer des probabilités théoriques individuelles et conditionnelles qui s'expriment en fonction des π_k .

1) Probabilité de i

$$P^*(i) = \sum_k \theta_{ik} \pi_k \quad (1)$$

avec $\theta_{ik} = 0$ si e_i ne figure pas dans E_k

$\theta_{ik} = 1$ si e_i figure dans E_k

2) Probabilité de i si j

$$P^*(i/j) = \frac{\sum_{k=1}^r t(ijk) \pi_k}{P(i)} \quad \forall (ij) \quad (2)$$

avec $t(ijk) = 1$ si e_i et e_j figurent dans E_k

$t(ijk) = 0$ si e_i ou e_j ne figure pas dans E_k

3) Probabilité de i si non j

$$P^*(i/\bar{j}) = \frac{\sum_{k=1}^r S(ijk) \cdot \frac{1}{k}}{1 - P(j)} \cdot V(i,j) \quad (3)$$

avec $S(ijk) = 1$ si e_i et e_j figurent dans E_k

$S(ijk) = 0$ si e_i ou e_j ne figure pas dans E_k

Les conditions à respecter, vérifiées par construction sont :

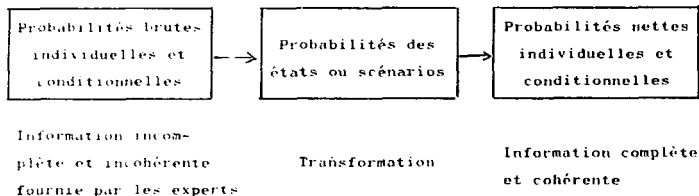
- a) $0 \leq P^*(i) \leq 1$
- b) $P^*(i/j) \cdot P^*(j) = P^*(j-i) \cdot P^*(i) = P^*(i,j)$
- c) $P^*(i/j) \cdot P^*(j) + P^*(i/\bar{j}) \cdot P^*(\bar{j}) = P^*(i)$

L'objet de la méthode consiste à contrôler la cohérence des estimations des experts relativement aux contraintes ci-dessus. C'est l'idée classique de la méthode selon laquelle chaque information apportée par les experts tient compte des interactions entre événements mais sous un angle différent, c'est-à-dire incomplètement. Par conséquent, les estimations doivent être corrigées, et la manière d'opérer pour passer au système de probabilités brutes doit être inspirée d'une règle objective, c'est-à-dire exprimant l'accord des estimations avec les contraintes imposées.

On pourrait penser à optimiser une certaine fonction des probabilités individuelles et conditionnelles sous les contraintes ci-dessus. Mais la non-linéarité des contraintes sur les probabilités des événements isolés imposant des conditions particulières à l'optimum, ceci nous conduit à nous intéresser aux probabilités des états du système d'événements isolés.

En effet, la connaissance des probabilités des états du système donne la séquence des futurs possibles les plus vraisemblables et permet de construire des scénarios.

Le principe retenu consiste à partir d'une information a priori incohérente et incomplète sur les probabilités des événements isolés, à trouver des résultats nets, complets et cohérents en passant par les probabilités des états du système isolé.



I₄ NOUVELLE METHODE : S.M.I.C. 74

(Systèmes et Matrices d'Impacts Croisés)

I₄ 1° Information disponible

Le principe de la méthode est extrêmement simple et est soumis à l'hypothèse selon laquelle les experts peuvent fournir une information sur :

a) La liste des N événements isolés considérés comme importants pour l'objet de l'étude :

$$H = (e_1, e_2 \dots \dots \dots e_N)$$

b) Les probabilités d'arrivée des événements isolés dans un horizon donné

$$P(i) \text{ probabilité de l'événement isolé } e_i$$

Avec le Professeur J. VILLE, nous "pouvons considérer une évaluation de probabilité d'un événement isolé comme un jugement subjectif en ce sens que l'on classe l'événement considéré dans une catégorie d'événements qui subjectivement ont même degré de vraisemblance. C'est donc l'expert qui, en portant ses jugements, établit les catégories". ([8] p. 139).

Ainsi quand une personne dit : "j'estime à 3/4 la probabilité de tel événement" (isolé), nous nous accordons avec le professeur VILLE pour comprendre ce jugement ainsi : "si vous notez tous les événements auxquels j'aurai attribué une probabilité égale à 3/4 et que vous observeriez pour un grand nombre de cas la fréquence de ceux où l'événement s'est effectivement produit, je prédic que cette fréquence sera voisine de 3/4. ([8] p. 17).

c) Les probabilités conditionnelles des événements isolés pris deux à deux

$P(i/j)$ probabilité de i si j est arrivé

$P(i/\bar{j})$ probabilité de i si j n'est pas arrivé.

I₄ 2° Fonction objectif

Les contraintes a, b, c, (p. 7) sont vérifiées par les probabilités théoriques, mais non par les probabilités estimées, par conséquent la fonction objectif que nous nous proposons d'optimiser consiste à minimiser la différence entre les produits $P(i/j) \cdot P(j)$ résultant des estimations fournies par les experts et les produits théoriques $P^*(i/j) \cdot P^*(j)$ qui s'expriment en fonction des π_k .

Ce qui revient à chercher les probabilités ($\pi_1, \pi_2 \dots \pi_k \dots \pi_r$) des R états possibles qui rendent minimum par exemple :

$$\left\{ \begin{array}{l} \left[\sum_{i,j} P(i/j) \cdot P(j) - \sum_{k=1}^r t(ijk) \cdot \pi_k \right]^2 \\ + \sum_{i,j} \left[P(i/\bar{j}) \cdot P(\bar{j}) - \sum_{k=1}^r S(ijk) \cdot \pi_k \right]^2 \end{array} \right\}$$

sous les contraintes :

$$\begin{array}{l} \sum_{k=1}^r \pi_k = 1 \\ \pi_k \geq 0 \quad \forall_k \end{array}$$

C'est un programme classique de minimisation d'une forme quadratique sous contraintes linéaires 2).

2) Le programme informatique de résolution a été mis au point par M. LIEUTAUD de la CISI.

I₄ 3° Résultats

Finalement la méthode SMIC permet :

a) de donner une information cohérente en termes de probabilités sur les événements qui peuvent survenir et influencer les phénomènes que l'on cherche à prévoir.

b) la construction et la hiérarchisation des scénarios. La connaissance des probabilités des états du système sert à délimiter le domaine des réalisables (c'est-à-dire celui des états ayant une probabilité non nulle et à distinguer le noyau tendanciel des scénarios moins probables.

c) la réalisation d'une analyse stratégique de sensibilité. Celle-ci consiste à évaluer les effets sur tout le système, des actions qui peuvent être entreprises par le décideur pour favoriser ou retarder le développement de tel ou tel événement. Il s'agit d'un modèle de simulation.

I₅ COMPLEMENTS D'ANALYSE

I₅ 1° Estimations des experts et contradictions

Quelle que soit l'originalité de la MIC adoptée, les estimations apportées par le groupe d'experts constituent la seule information disponible. Aussi, les résultats nets n'auront de sens que dans la mesure où les valeurs brutes seront crédibles.

Par conséquent, il nous semble utile de mettre en lumière certaines erreurs classiques parce que fréquentes, qui sont commises dans ce domaine.

a) Problèmes posés par les probabilités conditionnelles

- Réflexe mental de réversibilité des causes

Si B est une cause de A, la réponse à la question P (A/B) ne pose pas trop de problème, par contre, que dire de P (B/A) ? quelle est

la probabilité d'avoir la cause sachant que j'ai la conséquence ? Si plusieurs causes entraînent A, il est difficile de répondre immédiatement.

En pratique, l'expert interrogé ne prend pas toujours conscience qu'entre $P(B/A)$ et $P(A/B)$, il y a une probabilité qu'il peut raisonnablement estimer et une autre dont il est beaucoup moins sûr ; de fait, il risque d'appliquer ce que nous appelons le réflexe mental de réversibilité des causes et d'apporter une information fautive.

1er exemple : soit A : l'événement : je vois un parapluie ouvert.

B : l'événement : il pleut.

A la question $P(B/A)$, l'expert répondra comme si A était la cause et B la conséquence, alors qu'en fait B est normalement cause de A.

La liaison de causalité étant forte dans le sens $B \rightarrow A$, il risque de répondre par l'estimation de $P(A/B)$ lorsqu'on l'interroge sur $P(B/A)$.

2ème exemple : soit A : je tombe par la fenêtre

B : je meurs.

$P(B/A)$ peut être raisonnablement estimée. Mais on ne peut rien dire d'aussi sûr avec $P(A/B)$ probabilité que si je suis mort, ce soit en tombant par la fenêtre.

Le 1er exemple montre que l'expert interrogé risque d'inverser la causalité et de répondre à la question inverse.

Le 2ème exemple montre qu'entre les deux informations $P(B/A)$ et $P(A/B)$ une des deux informations est plus fiable que l'autre.

b) Temporalité et contradictions sur les probabilités brutes.

Soient deux événements se produisant dans la période T

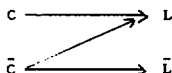
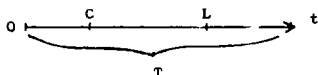
C : une catastrophe écologique

L : un règlement draconien sur l'environnement

Il est demandé au groupe d'experts d'estimer P (C), P (L) et P (C/L), P (L/C).

1er cas : C se produit avant L dans le période T.

C est une cause de L



Alors vraisemblablement

$$P (L/C) \geq P (L)$$

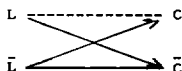
Les flèches doivent s'interpréter comme une certaine relation entre deux événements.

2ème cas :



L se produit avant C

L est une cause diminuant le risque de C



Alors vraisemblablement

$$P (C/L) \leq P (C)$$

Certaines contradictions risquent d'apparaître dans les estimations du groupe d'experts, en effet :

- un "technocrate" pensera qu'il faudrait vraiment une catastrophe écologique importante pour voir les pouvoirs publics réagir et promulguer une loi dracennienne sur l'environnement, et se placera dans le premier cas.
- un "écologue", en tant que défenseur de la nature, pensera plutôt qu'une loi viendra à temps limiter les effets d'une catastrophe éventuelle, et se placera dans le deuxième cas.
- d'autres experts se placeront, par exemple, dans le premier cas pour répondre à la question P (L/C) et dans le deuxième pour répondre à la question P (C/L).

Nous allons montrer comment cette dernière éventualité est contradictoire en termes de probabilités

- d'après le deuxième cas :

$$P (C/L) \leq P (C) \quad (a)$$

- d'après le premier cas :

$$P (L/C) = P (L) + \epsilon \text{ avec } \epsilon > 0 \quad (b)$$

or $P (C.L) = P (C/L) . P(L) = P (L/C) . P (C)$

de (a) il vient $P (C/L) . P (L) \leq P (C) . P (L)$

de (b) $P (L/C) . P (C) = [P (L) + \epsilon] P (C)$

d'où $[P (L) + \epsilon] P (C) \leq P (C) . P (L)$

ce qui est contradictoire puisque $\epsilon > 0$

Il convient de ne pas oublier que la contradiction n'existe que dans l'esprit des experts. En pratique, si "C" et "L" arrivent tous les deux dans la période T, l'un des deux se produira avant l'autre.

Quoi qu'il en soit, si ce type de contradiction est inévitable dans l'estimation des probabilités brutes puisqu'il résulte de l'hétérogénéité et de la pluridisciplinarité du groupe d'experts, il

conviendra qu'il n'apparaisse plus dans les probabilités nettes ; c'est ce que doit normalement faire la méthode SMIC puisque son but est justement de fournir à partir de l'information apportée par les experts des estimations cohérentes en termes de probabilités.

Montrons que dans les valeurs a posteriori :

$$\boxed{\bar{A} \{i \text{ et } j\} \text{ tq } \{P(i/j) < P(i) \text{ et } P(j/i) > P(j)\}}$$

ce qui s'écrit $\frac{\sum_{k=1}^r t(ijk) \pi_k}{P(j)} < P(i)$ et $\frac{\sum_{k=1}^r t(ijk) \pi_k}{P(i)} > P(j)$

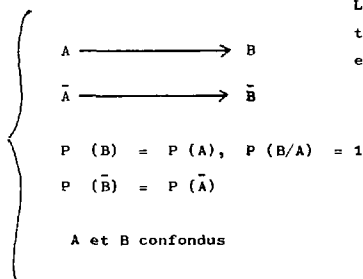
En effet, il est impossible d'avoir en même temps :

$$\sum_{k=1}^r t(ijk) \pi_k < P(i) \cdot P(j)$$

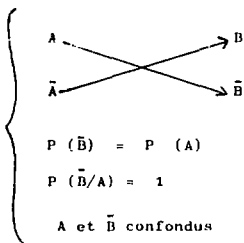
donc la contrainte de cohérence temporelle est vérifiée par les probabilités nettes.

I₅ 2° Typologie des relations entre deux événements isolés A et B : relations sur les probabilités.

a) Liaisons déterministes



Les flèches doivent s'interpréter comme une certaine relation entre deux événements.



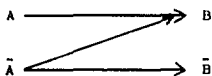
Exclusion entre A et B

$$P(\bar{B}) = P(A)$$

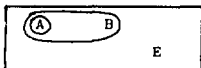
$$P(\bar{B}/A) = 1$$

A et \bar{B} confondus

b) Lien causal entre A et B



Représentation ensembliste



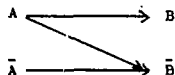
$A \subset B \Leftrightarrow$ lien causal entre A et B

$P(A/B)$	$P(A/\bar{B})$	$P(B/A)$	$P(B/\bar{A})$
$\frac{P(A)}{P(B)}$	0	1	$\frac{P(B) - P(A)}{1 - P(A)}$

Remarque : dans ce cas $P(A) \leq P(B)$

Ex. : plus l'industrie utilise d'eau, plus elle pollue.

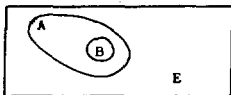
c) Lien conditionnel entre A et B



$P(A/B)$	$P(A/\bar{B})$	$P(B/A)$	$P(B/\bar{A})$
1	$\frac{P(B) - P(A)}{1 - PB}$	$\frac{P(B)}{P(A)}$	0

représentation ensembliste

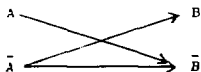
ex. : si les stations d'épuration ne sont pas raccordées par des égouts aux sources (A) de pollution (B), celle-ci ne pourra pas diminuer



$B \subset A \Leftrightarrow$ lien conditionnel entre A et B et $P(B) \leq P(A)$

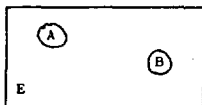
on peut remarquer qu'un lien conditionnel entre A et B est équivalent à un lien causal entre \bar{A} et \bar{B} .

d) Incompatibilité entre A et B

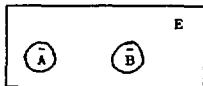
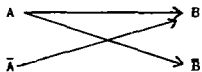


représentation ensembliste

A et B disjoints

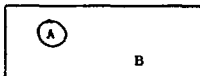


e) Incompatibilité entre \bar{A} et \bar{B}



\bar{A} et \bar{B} disjoints

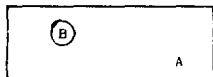
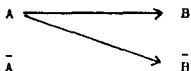
f) Cas où l'événement B est certain



B est l'ensemble fondamental $P(B) = 1$

B est un événement certain

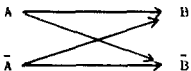
g) Cas où l'événement A est certain



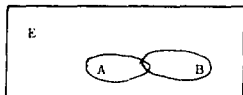
h) Cas général

- relations entre A et B et A-bar et B-bar

dépendance en probabilité



représentation ensembliste



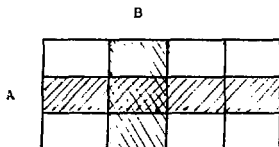
- pas de relation entre A et B

indépendance en probabilité

Le fait de connaître A ne modifie pas la connaissance que l'on peut avoir de l'événement B

$$P(B/A) = P(B)$$

$$P(A \cap B) = P(A) \cdot P(B)$$



représentation ensembliste : surfaces proportionnelles

I₅ 3° Conclusions

Compte tenu de l'existence de certains comportements psychologiques tel que le "reflexe mental de réversibilité des causes" et de la diversité des points de vue qui apparaissent normalement dans un

groupe d'experts pluridisciplinaire, il nous 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.

ANNEXE II - LE QUESTIONNAIRE ET
L'ENSEMBLE DES RESULTATS

II, QUESTIONNAIRE TYPE

HYPOTHESE 1 REALISEE

SI LA CONSOMMATION D'ENERGIE NUCLEAIRE EST SUPERIEURE A 5 TEC PAR HABITANT. EN EUROPE EN L'AN 2 000 :

quelle est à votre avis la probabilité pour que soient réalisées les hypothèses :

2. Revenu élevé ?
3. Europe Unie ?
4. Croissance subordonnée à qualité ?
5. Lois sévères sur le nucléaire ?
6. Réussite des énergies nouvelles ?

%
%
%
%
%

Observations :

HYPOTHESE 2 REALISEE

SI LA CROISSANCE DU REVENU PAR TETE EST SUPERIEURE A 3,5 % PAR AN D'ICI L'AN 2 000 EN EUROPE :

quelle est à votre avis la probabilité pour que soient réalisées les hypothèses :

1. Nucléaire fort ?
3. Europe Unie ?
4. Croissance subordonnée à qualité ?
5. Lois sévères sur le nucléaire ?
6. Réussite des énergies nouvelles ?

%
%
%
%
%

Observations :

HYPOTHESE 3 REALISEE

SI L'EUROPE OCCIDENTALE DE L'AN 2 000 A FAIT SON UNITE .

quelle est à votre avis la probabilité pour
que soient réalisées les hypothèses :

1. Nucléaire fort :
2. Revenu élevé
4. Croissance subordonnée à qualité ?
5. Lois sévères sur le nucléaire ?
6. Réussite des énergies nouvelles ?

	%

	%

	%

	%

	%

Observations :

HYPOTHESE 4 REALISEE

SI DANS L'EUROPE DE L'AN 2 000, LA CROISSANCE QUANTITATIVE EST
DESORMAIS SUBORDONNEE A LA QUALITE DE LA VIE :

quelle est à votre avis la probabilité pour
que soient réalisées les hypothèses :

1. Nucléaire fort ?
2. Revenu élevé ?
3. Europe Unie ?
5. Lois sévères sur le nucléaire ?
6. Réussite des énergies nouvelles ?

	%

	%

	%

	%

	%

Observations :

HYPOTHESE 5 REALISEE

S'IL Y A EN L'AN 2 000 UNE LEGISLATION SEVERE, D'INSPIRATION ECOLOGIQUE, LIMITANT LE NUCLEAIRE :

quelle est à votre avis la probabilité pour que soient réalisées les hypothèses :

1. Nucléaire fort ?
2. Revenu élevé ?
3. Europe Unie ?
4. Croissance subordonnée à qualité ?
6. Réussite des énergies nouvelles ?

%
%
%
%
%

Observations :

HYPOTHESE 6 REALISEE

SI LES ENERGIES NOUVELLES FONT EN L'AN 2 000 PLUS DE 5 % DE LA CONSOMMATION D'ENERGIE DE L'EUROPE :

quelle est à votre avis la probabilité pour que soient réalisées les hypothèses :

1. Nucléaire fort ?
2. Revenu élevé ?
3. Europe Unie ?
4. Croissance subordonnée à qualité ?
5. Lois sévères sur le nucléaire ?

%
%
%
%
%

Observations :

HYPOTHESE 1 NON REALISEE

SI LA CONSOMMATION D'ENERGIE NUCLEAIRE EST INFERIEURE A 5 TEC PAR HABITANT EN EUROPE EN L'AN 2 000 :

quelle est à votre avis la probabilité pour que soient réalisées les hypothèses :

2. Revenu élevé ?
3. Europe Unie ?
4. Croissance subordonnée à qualité ?
5. Lois sévères sur le nucléaire ?
6. Réussite des énergies nouvelles ?

%

%

%

%

%

Observations :

HYPOTHESE 2 NON REALISEE

SI LA CROISSANCE DU REVENU PAR TETE EST INFERIEURE A 3,5 % PAR AN D'ICI L'AN 2 000 EN EUROPE :

quelle est à votre avis la probabilité pour que soient réalisées les hypothèses :

1. Nucléaire fort ?
3. Europe Unie ?
4. Croissance subordonnée à qualité ?
5. Lois sévères sur le nucléaire ?
6. Réussite des énergies nouvelles ?

%

%

%

%

%

Observations :

HYPOTHESE 3 NON REALISEE

SI L'EUROPE OCCIDENTALE N'A PAS FAIT SON UNITE EN L'AN 2 000 :

Quelle est à votre avis la probabilité pour que soient réalisées les hypothèses :

1. Nucléaire fort ?
2. Revenu élevé ?
4. Croissance subordonnée à qualité ?
5. Lois sévères sur le nucléaire ?
6. Réussite des énergies nouvelles ?

%
%
%
%
%

Observations :

HYPOTHESE 4 NON REALISEE

SI LA CROISSANCE QUANTITATIVE N'EST PAS SUBORDONNEE A LA QUALITE DE LA VIE DANS L'EUROPE DE L'AN 2 000 :

Quelle est à votre avis la probabilité pour que soient réalisées les hypothèses :

1. Nucléaire fort ?
2. Revenu élevé ?
3. Europe Unie ?
5. Lois sévères sur le nucléaire ?
6. Réussite des énergies nouvelles ?

%
%
%
%
%

Observations :

HYPOTHESE 5 NON REALISEE

SI LA LEGISLATION CONCERNANT LE NUCLEAIRE N'EST PAS TROP SEVERE EN L'AN 2 000 :

Quelle est à votre avis la probabilité pour que soient réalisées les hypothèses :

1. Nucléaire fort ?
2. Revenu élevé ?
3. Europe Unie ?
4. Croissance subordonnée à qualité ?
5. Réussite des énergies nouvelles ?

%

%

%

%

%

Observations :

HYPOTHESE 6 NON REALISEE

SI LES ENERGIES NOUVELLES FONT EN L'AN 2 000 MOINS DE 5 % DE LA CONSOMMATION D'ENERGIE DE L'EUROPE :

Quelle est à votre avis la probabilité pour que soient réalisées les hypothèses :

1. Nucléaire fort ?
2. Revenu élevé ?
3. Europe Unie ?
4. Croissance subordonnée à qualité .
5. Lois sévères sur le nucléaire ?

%

%

%

%

%

Observations :

PROBABILITES BRUTES

Quelle est à votre avis la probabilité pour que chacune des hypothèses, prises séparément, soit réalisée en l'an 2 000 :

1. Consommation nucléaire par tête supérieure à 5 tec ?
2. Croissance du revenu par tête supérieure à 3,5 % l'an ?
3. Unité européenne accomplie ?
4. Croissance subordonnée à la qualité ?
5. Législation sévère sur le nucléaire ?
6. Réussite des énergies nouvelles ?

%

%

%

%

%

Observations :

II₂ PRESENTATION DES RESULTATS

Trop volumineux pour être reproduits ici, les résultats complets de l'enquête auprès des 18 experts et de leur traitement par le modèle SMIC, peuvent être consultés au département des programmes du C.E.A.

Nous ne présenterons ici que la liste des scénarios et des probabilités associées à chacun d'eux par chacun des 18 experts.

Comme nous avons examiné 6 événements ($N = 6$), il y a $2^N = 64$ scénarios possibles, qui sont représentés sous forme binaire :

111111 ce qui veut dire $e_1, e_2, e_3, e_4, e_5, e_6$

111101 ce qui veut dire $e_1, e_2, e_3, e_4, \text{non } e_5, e_6$

111110 ce qui veut dire $e_1, e_2, e_3, e_4, e_5, \text{non } e_6$

etc.,

PROBABILITES ATTRIBUEES PAR LES EXPERTS CONSULTES AUX DIVERS SCENARIOS POSSIBLES

Experts Scénarios	Experts																	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
111111	.04	.17	0	0	.01	-.08	.01	.02	-.02	.30	0	-.09	.01	0	-.06	0	0	0
111101	-.03	0	0	0	0	0	0	.05	0	0	-.01	0	0	0	0	0	0	0
111100	-.03	.10	0	0	0	0	0	0	0	-.09	-.09	0	0	0	0	0	0	0
111000	-.05	0	0	.02	0	-.04	.01	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
111001	0	.02	0	0	0	.07	0	.07	0	.01	.07	.18	0	0	0	0	0	0
111010	0	0	0	0	0	.04	0	0	0	0	.03	0	0	0	0	0	.04	0
111011	0	0	.01	.01	0	0	0	0	0	0	-.11	0	.03	.01	0	-.01	0	0
111020	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	.03	.02	0	0	0	0
111021	0	.02	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
101101	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	.03
101110	-.04	0	0	.09	0	0	0	0	0	-.04	0	-.04	0	0	0	-.02	0	0
101100	0	0	0	.18	0	0	-.04	0	0	0	0	0	-.02	.04	0	0	0	0
001111	-.05	0	0	-.03	-.06	-.12	0	-.12	-.07	0	0	-.07	-.04	-.09	-.02	0	-.07	-.03
001101	0	0	0	0	0	0	-.06	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
001110	0	0	0	-.06	0	0	-.03	0	.07	-.03	-.08	0	-.02	-.03	-.03	-.02	-.04	0
001100	0	0	-.01	0	0	-.03	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
110111	-.06	0	-.02	0	0	0	0	0	01	0	0	0	0	0	-.24	-.11	-.02	0
110101	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
110110	-.08	0	-.01	0	0	0	0	0	-.11	0	0	0	0	0	0	0	0	0
110100	0	0	.03	0	0	0	0	0	0	-.05	0	-.03	-.02	0	-.04	-.06	0	0
010111	-.03	0	0	0	-.02	0	0	-.06	-.03	0	-.07	0	0	0	0	-.08	-.02	-.03
010101	0	0	0	0	0	0	-.02	0	0	0	0	0	-.05	.02	0	0	0	0
010110	0	.01	.04	0	0	0	-.02	0	0	0	.04	0	0	0	0	0	0	0
010100	0	.02	0	0	0	0	-.04	0	0	0	0	0	0	0	0	0	.03	0
100111	0	0	.02	0	0	-.05	0	0	-.02	0	0	0	0	.04	0	-.06	0	0
100101	0	0	0	-.01	0	0	0	-.03	-.03	0	0	0	0	-.02	0	0	.02	0
100110	-.13	0	0	-.03	0	0	0	.07	0	-.01	0	0	-.01	0	0	0	0	0
100100	0	0	-.05	-.02	0	-.05	-.03	-.02	-.03	-.02	0	0	-.04	0	0	.12	0	0
000111	-.07	.05	-.02	0	-.12	0	-.07	.01	-.03	-.08	-.02	-.08	-.12	-.15	0	0	0	-.12
000101	0	.02	0	0	-.01	-.04	0	0	0	0	-.01	0	0	0	0	0	0	0
000110	-.02	0	-.03	-.02	0	-.07	-.08	-.07	0	0	-.18	0	0	0	0	0	-.08	0
000100	0	-.07	-.12	0	0	-.01	0	0	0	0	0	0	-.01	0	0	0	0	-.15

On peut noter qu'un certain nombre de scénarios ont une assez forte probabilité moyenne (sur l'ensemble des experts). En particulier six scénarios ont une probabilité supérieure à 4 %, que l'on pourrait dénommer comme suit :

probabilité moyenne	scénarios		
9,8 %	110000	} réussite nucléaire dans la prospérité }	} Europe désunie Europe unie
7,1 %	111000		
5,2 %	100000	réussite nucléaire sans prospérité	
5,2 %	000111	France écologique	
4,5 %	111111	Utopos	
4,3 %	001111	Europe écologique	

Mais si pour certains scénarios, les probabilités de chaque expert sont du même ordre de grandeur, ce n'est pas le cas pour tous. En particulier pour le scénario 111111 "Utopos", dont la probabilité moyenne est de 4,5 %, deux experts donnent une probabilité de 17 % et un troisième de 30 %.

- pour le scénario 000111 "France écologique" (probabilité moyenne : 5,2 %), trois experts donnent une probabilité de 12 % et un troisième de 15 %.

- pour le scénario 111000 "Réussite nucléaire dans une Europe unie et prospère" (probabilité moyenne : 7,1 %), on trouve 4 probabilités individuelles supérieures à 14 % (2 fois 14 % et 2 fois 15 %).

- pour le scénario 110000 "scénario technocratique" (probabilité moyenne : 9,8 %), on trouve 5 probabilités individuelles supérieures à 16 % (2 fois 16 %, une fois 18 %, 23 % et 25 %).

De même, pour certains scénarios dont la probabilité moyenne est très faible, on trouve parfois des probabilités individuelles assez fortes. Par exemple, pour le scénario 110111 dont la probabilité moyenne est de 2,5 %, un expert a donné une probabilité de 11 % et un autre de 24 %. De même pour le scénario 000000 (probabilité moyenne de 2,1 %) on trouve une probabilité individuelle de 13 % et une autre de 24 %.

Manuscrit reçu le 23 mai 1975

Achevé d'imprimer
par
le CEA, Service de Documentation, Saclay
Juillet 1975

DEPOT LEGAL
3ème trimestre 1975

La diffusion, à titre d'échange, des rapports et bibliographies du Commissariat à l'Energie Atomique est assurée par le Service de Documentation, CEN-Saclay, B.P. n° 2, 91 190 - Gif-sur-Yvette (France).

Ces rapports et bibliographies sont également en vente à l'unité auprès de la Documentation Française, 31, quai Voltaire, 75007 - PARIS.

Reports and bibliographies of the Commissariat à l'Energie Atomique are available, on an exchange basis, from the Service de Documentation, CEN-Saclay, B.P. n° 2, 91 190 - Gif-sur-Yvette (France).

Individual reports and bibliographies are sold by the Documentation Française, 31, quai Voltaire, 75007 - PARIS.

Edité par
le Service de Documentation
Centre d'Etudes Nucléaires de Saclay
Boîte Postale n° 2
91190 - Gif-sur-YVETTE (France)