

**Zeitschrift:** Ingénieurs et architectes suisses  
**Band:** 105 (1979)  
**Heft:** 7

**Artikel:** La Suisse et l'agence internationale de l'énergie  
**Autor:** Toinet, Jean-Michel  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-73819>

#### Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

#### Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

#### Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

**Download PDF:** 22.02.2026

**ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>**

# La Suisse et l'Agence internationale de l'énergie<sup>1</sup>

par Jean-Michel Toinet, Lausanne

**En 1973, l'OPEP décidait une forte hausse des prix du pétrole. Les pays industrialisés grandement dépendants des combustibles liquides éprouverent le besoin d'unir leurs efforts, jusqu'alors individuels, et de promouvoir une coopération internationale en créant l'Agence internationale de l'énergie (AIE) en 1974.**

**Les objectifs de l'AIE sont les suivants :**

**sécurité des approvisionnements en pétrole,**

**promotion des relations avec l'OPEP,**

**réduction de la dépendance en pétrole par différentes actions, telles que :**

**économies d'énergie,**

**développement accéléré de technologies faisant appel à d'autres agents énergétiques,**

**recherche et développement dans le domaine énergétique,**

**études sur l'uranium, l'enrichissement et le cycle du combustible nucléaire.**

Le groupe Analyse des systèmes de l'AIE a été formé pour contribuer à la recherche et au développement en matière énergétique. Son objectif est d'évaluer les nouveaux processus énergétiques et de définir ceux qui auront un effet optimal dans le futur.

Il est composé des délégués des pays formant l'AIE. Deux groupes de travail ont été constitués, l'un à Brookhaven (USA) et l'autre à Jülich (RFA).

La Suisse participe aux travaux de Jülich. M. Bernard Saugy et l'auteur y sont délégués à temps partiel par l'Office fédéral de l'économie énergétique et par l'Ecole polytechnique fédérale de Lausanne, dans le cadre du projet SYSTEM de l'Institut de production d'énergie de Lausanne :

**Le projet a été divisé en trois phases principales :**

**la phase 1, terminée en 1977, consistant à établir les prévisions de consommation et de demande d'énergie ;**

**la phase 2, actuellement en développement, déterminant les techniques optimales dans le futur pour une stratégie donnée et les impacts de ces dernières ;**

**la phase 3 définissant des critères de choix et de classification entre les stratégies développées et leurs effets.**

**Le travail consiste en quatre principales tâches :**

**collecte des données,**

**structure des données,**

**coordination et analyse des informations,**

**évaluation de l'impact des stratégies possibles et de leur aptitude à satisfaire aux besoins futurs.**

## 1. La demande d'énergie (phase 1)

Les prévisions de consommation sont à la base de toute étude de système énergétique. Partant d'une demande d'énergie, on peut remonter aux ressources en passant par l'intermédiaire de technologies — constituant une chaîne énergétique — grâce auxquelles on détermine la combinaison (ou une combinaison) des agents énergétiques. Les technologies à considérer dépendent de plusieurs

facteurs, pour chaque pays, tels que leurs niveaux minimal et maximal d'implantation, les formes de la demande, les ressources disponibles, les possibilités de substitution et de compétition, etc.

Tous ces paramètres sont eux-mêmes dépendants de contraintes plus globales intéressant non plus uniquement des phénomènes techniques mais des phénomènes économiques et sociaux, comme

la démographie, la croissance économique, les impacts de mesures d'économies d'énergie, etc.

Une rétroaction de l'économie sur le choix et l'implantation de nouvelles technologies est donc nécessaire pour évaluer l'impact de stratégies.

C'est ainsi que des variantes haute et basse de demande d'énergie ont été élaborées afin de prendre en compte ces interactions avec un environnement plus large.

La représentation de demandes futures d'énergie et la structure du système énergétique s'est faite grâce au « Reference Energy Balance Format (REBF) » et au « Reference Energy System (RES) ». Le REBF est employé pour décrire la combinaison des agents énergétiques aptes à satisfaire une demande, ceci des ressources jusqu'à la demande.

La demande considérée est une consommation finale (ou distribuée) répartie en quatre secteurs :

le secteur industriel,

le secteur résidentiel,

le secteur commercial,

le secteur transports.

Le passage de l'énergie distribuée à l'énergie utile est fonction des combinaisons de technologies d'utilisation choisies, et donc n'est pas uniforme pour l'ensemble des pays.

Le RES est la forme graphique du REBF d'où une interprétation et une vision globale peuvent être facilement tirées. Chaque pays a développé ces tables pour les années 1974 (à partir des statistiques de l'OCDE), 1985 (hypothèses haute et basse) et 2000 (hypothèses haute et basse).

Les projections de la demande pour la Suisse ont été fournies par l'Office fédéral de l'économie énergétique.

Le tableau II donne le RES pour la Suisse en 1974 (voir page 64)<sup>2</sup>.

Les variantes étudiées pour 1985 et 2000 font appel aux hypothèses suivantes :

L'hypothèse basse prend en considération les économies d'énergie possibles et la substitution du pétrole par le nucléaire. L'hypothèse haute considère un taux d'accroissement plus faible que celui de ces dernières années mais avec un plus petit effort d'économies d'énergie et de substitution.

Les impacts de nouvelles technologies et leur niveau d'implantation ont été aussi étudiés pour des stratégies différentes. L'intérêt du chauffage à distance et des mesures d'économies d'énergie (abaissement de la température des locaux) s'est manifesté dans cette étude.

<sup>1</sup> Communication de l'IPEN (Institut de production d'énergie) de l'Ecole polytechnique fédérale de Lausanne.

<sup>2</sup> Tiré de : *An Initial Multi-National Study of Future Energy Systems and Impacts of Some Evolving Technologies — Data appendix of Switzerland*, par B. SAUGY — 1<sup>er</sup> février 1977.

## 2. Les travaux de modélisation (phase 2)

La phase 2 du projet consiste à modéliser le système énergétique de chaque pays de l'AIE afin d'estimer quelles seront les technologies les plus compétitives dans le futur, ceci en respectant plusieurs contraintes ou objectifs différents (coût, environnement, sécurité). Les caractéristiques des technologies énergétiques ont dû être définies pour permettre le choix. Leur niveau d'implantation dépend du système économique et de son inertie et offre ainsi des contraintes sur la pénétration de chaque technologie sur le marché. Des paramètres essentiels, tels que le prix du pétrole et son évolution sont importants à connaître afin de pouvoir apprécier les possibilités de substitution des technologies, ceci dans le cadre de scénarios mondiaux où les grandeurs représentant la croissance économique sont des facteurs essentiels. Le système de la phase 2 peut être représenté par le schéma de la figure 1.

### 2.1 Les caractéristiques des technologies

Les technologies existantes et nouvelles doivent être définies par des paramètres technologiques, permettant la comparaison de procédés techniques, des paramètres économiques pour la détermination des coûts et des prix, et des paramètres de l'environnement pour l'étude des impacts sur les systèmes globaux. Le tableau I donne une liste de ces caractéristiques nécessaires à la connaissance d'une technologie.

Pour chaque technologie un tel tableau est développé. Une révision par les experts de chaque pays est effectuée, permettant ainsi une caractérisation où la précision des données s'accroît. Une estimation de l'évolution des caractéristiques au cours du temps peut ainsi être donnée et les changements pouvant intervenir dans les cinquante prochaines années sont ainsi trouvés.

Une première liste des technologies existantes et nouvelles caractérisées est dressée ci-contre. D'autres technologies pourront être ajoutées par la suite.

La Suisse est intéressée par un certain nombre de ces nouvelles technologies, en particulier les réacteurs haute température, les énergies douces (solaire, bois, géothermie, biomasse), les centrales chaleur-force et à ordures, les technologies d'utilisation (isolation, pompes à chaleur, chauffage à distance).

Les possibilités de substitution entre le nucléaire et les centrales à charbon semblent envisageables et une augmentation des importations de charbon pour les usines de conversion et le résidentiel doit être prise en compte.

Le travail est organisé de la façon suivante : chaque représentant est responsable de quelques technologies dont les

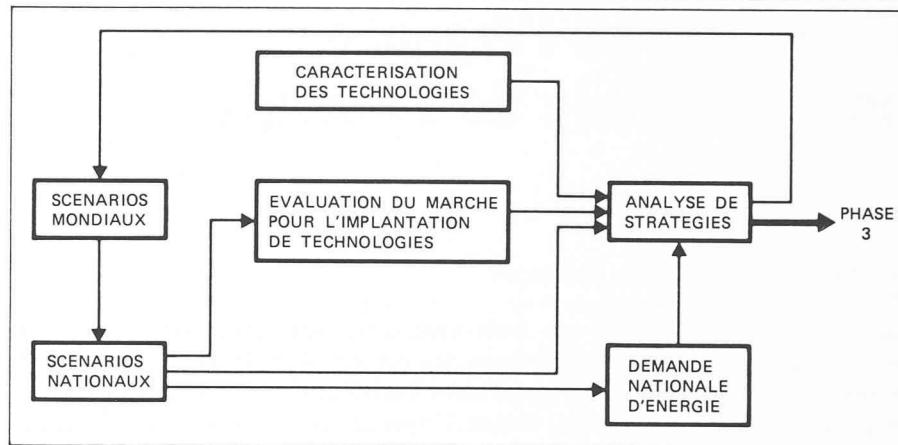


Fig. 1. — Schéma de la modélisation (phase 2).

TABLEAU I

	Paramètres techniques	Paramètres économiques	Paramètres de l'environnement
Inputs annuels	Coût et temps de construction		Poussières
Outputs annuels	Intérêt durant la construction		NO <sub>x</sub>
Rendements	Coût total d'investissement		SO <sub>x</sub>
Facteur de disponibilité	Intérêt à long terme		CO <sub>2</sub>
Facteur de capacité	Durée de vie économique		Krypton 85
Durée de vie technique	Annuité de capital		Emprise territoriale
Autres	Charges fixes		Radiation
	Frais fixes d'opération et d'entretien		Autres
	Frais variables d'opération et d'entretien		
	Coût du combustible		
	Coût de production total		

### Technologies existantes

Extraction	<table border="0"> <tr> <td>mines charbon (ciel ouvert/souterrain)</td><td>Conversion</td><td>Cokeries</td></tr> <tr> <td>mines lignite (ciel ouvert)</td><td></td><td>Raffineries</td></tr> <tr> <td>forage pétrole (onshore/offshore)</td><td>Hydro-électricité</td><td>Centrales à accumulation</td></tr> <tr> <td>forage gaz (onshore/offshore)</td><td></td><td>Centrales au fil de l'eau</td></tr> </table>	mines charbon (ciel ouvert/souterrain)	Conversion	Cokeries	mines lignite (ciel ouvert)		Raffineries	forage pétrole (onshore/offshore)	Hydro-électricité	Centrales à accumulation	forage gaz (onshore/offshore)		Centrales au fil de l'eau			
mines charbon (ciel ouvert/souterrain)	Conversion	Cokeries														
mines lignite (ciel ouvert)		Raffineries														
forage pétrole (onshore/offshore)	Hydro-électricité	Centrales à accumulation														
forage gaz (onshore/offshore)		Centrales au fil de l'eau														
Centrales Combustibles Fossiles	<table border="0"> <tr> <td>Charbon</td><td>Résidentiel</td><td>Chauffage électrique</td></tr> <tr> <td>Lignite</td><td>Commercial</td><td>Ventilation</td></tr> <tr> <td>Pétrole</td><td>Utilisation</td><td>Brûleurs (pétrole, charbon, gaz)</td></tr> <tr> <td>Gaz</td><td></td><td></td></tr> <tr> <td>Ordures</td><td>Stockage</td><td>Centrales de pompage</td></tr> </table>	Charbon	Résidentiel	Chauffage électrique	Lignite	Commercial	Ventilation	Pétrole	Utilisation	Brûleurs (pétrole, charbon, gaz)	Gaz			Ordures	Stockage	Centrales de pompage
Charbon	Résidentiel	Chauffage électrique														
Lignite	Commercial	Ventilation														
Pétrole	Utilisation	Brûleurs (pétrole, charbon, gaz)														
Gaz																
Ordures	Stockage	Centrales de pompage														

### Technologies nouvelles

Charbon	<table border="0"> <tr> <td>Liquéfaction</td><td>Nucléaire</td><td>Production thermo-chimique d'hydrogène</td></tr> <tr> <td>Gazéification (haute, moyenne, basse/souterraine)</td><td></td><td>Réacteurs à eau LWR</td></tr> <tr> <td>Combustion</td><td></td><td>Réacteurs haute température</td></tr> <tr> <td>Magnétohydrodynamique</td><td></td><td>Surgénérateurs</td></tr> <tr> <td>Cellules</td><td></td><td>Fusion</td></tr> </table>	Liquéfaction	Nucléaire	Production thermo-chimique d'hydrogène	Gazéification (haute, moyenne, basse/souterraine)		Réacteurs à eau LWR	Combustion		Réacteurs haute température	Magnétohydrodynamique		Surgénérateurs	Cellules		Fusion	<table border="0"> <tr> <td>Géothermie (Hot dry rock — Electricité/chaleur)</td><td></td></tr> <tr> <td>Isolation</td><td></td></tr> <tr> <td>Pompes à chaleur</td><td></td></tr> </table>	Géothermie (Hot dry rock — Electricité/chaleur)		Isolation		Pompes à chaleur	
Liquéfaction	Nucléaire	Production thermo-chimique d'hydrogène																					
Gazéification (haute, moyenne, basse/souterraine)		Réacteurs à eau LWR																					
Combustion		Réacteurs haute température																					
Magnétohydrodynamique		Surgénérateurs																					
Cellules		Fusion																					
Géothermie (Hot dry rock — Electricité/chaleur)																							
Isolation																							
Pompes à chaleur																							
Pétrole Gaz	<table border="0"> <tr> <td>Pétrole et gaz : récupération accélérée</td><td>Economies d'énergie</td><td>Amélioration de rendement</td> </tr> <tr> <td>Sables et schistes bitumeux</td><td></td><td>Autres combustibles</td> </tr> <tr> <td>Méthane</td><td></td><td>Nouveaux systèmes : auto électrique</td> </tr> </table>	Pétrole et gaz : récupération accélérée	Economies d'énergie	Amélioration de rendement	Sables et schistes bitumeux		Autres combustibles	Méthane		Nouveaux systèmes : auto électrique	<table border="0"> <tr> <td>Nouveaux systèmes : autres</td><td></td></tr> </table>	Nouveaux systèmes : autres											
Pétrole et gaz : récupération accélérée	Economies d'énergie	Amélioration de rendement																					
Sables et schistes bitumeux		Autres combustibles																					
Méthane		Nouveaux systèmes : auto électrique																					
Nouveaux systèmes : autres																							
Solaire	<table border="0"> <tr> <td>Résidentiel et commercial</td><td>Transport</td><td>Nouveaux systèmes : autres</td> </tr> <tr> <td>Vent</td><td></td><td></td> </tr> <tr> <td>Marées</td><td></td><td></td> </tr> <tr> <td>Biomasse</td><td></td><td></td> </tr> <tr> <td>Electricité centralisée/décentralisée</td><td>Industries</td><td></td> </tr> </table>	Résidentiel et commercial	Transport	Nouveaux systèmes : autres	Vent			Marées			Biomasse			Electricité centralisée/décentralisée	Industries		<table border="0"> <tr> <td>Management chaleur</td><td></td></tr> <tr> <td>Procédés spécifiques (aluminium, cimenteries, etc.)</td><td></td></tr> <tr> <td>Centrale de chauffage à distance</td><td></td></tr> </table>	Management chaleur		Procédés spécifiques (aluminium, cimenteries, etc.)		Centrale de chauffage à distance	
Résidentiel et commercial	Transport	Nouveaux systèmes : autres																					
Vent																							
Marées																							
Biomasse																							
Electricité centralisée/décentralisée	Industries																						
Management chaleur																							
Procédés spécifiques (aluminium, cimenteries, etc.)																							
Centrale de chauffage à distance																							

caractéristiques lui sont facilement accessibles au niveau de son pays et qui intéressent particulièrement ce dernier. Il dresse donc un tableau des paramètres, avec commentaires, après consultation des experts nationaux de la technologie, et recherche de sources bibliographiques, revues spécialisées, etc.

Cette première version est ensuite adressée à d'autres représentants du groupe qui peuvent faire une première analyse et un contrôle des valeurs avec l'appui de leurs propres experts nationaux. La technologie étant alors bien caractérisée, elle est distribuée à l'intérieur de tout le groupe pour une vérification générale.

Les principales difficultés auxquelles chacun se heurte sont les suivantes :

Choix de la puissance pour laquelle on caractérise la technologie. Cette valeur est très importante car, en règle générale, chaque paramètre dépend de la puissance et n'est pas une fonction linéaire. La comparaison de valeurs définies pour des puissances différentes doit donc faire l'objet d'un examen attentif.

Définition du système intégrant la technologie. Les limites doivent être claires afin de déterminer avec précision quels sont les inputs et outputs annuels, donc les rendements, dont dépendent les autres paramètres.

Unité monétaire commune pour toutes les technologies. Il a été choisi le dollar de 1975. Les données de chaque pays dans l'unité monétaire nationale d'une certaine année doivent être converties en \$ 1975. Pour cela, il a été décidé de tenir compte de l'inflation ou de la déflation de l'unité monétaire nationale pour 1975 et alors de faire la conversion en \$ 1975.

Choix du taux d'intérêt et de l'annuité. Ceux-ci diffèrent de manière fort sensible d'un pays à l'autre, du fait de la variation du taux lui-même et de la durée de vie économique prise en considération. Une valeur du taux d'intérêt de 6 % a été retenue. Homogénéité des paramètres entre différentes technologies. Une comparaison de ce type doit être effectuée pour éliminer les divergences évidentes. Un exemple en est le prix des agents énergétiques (combustibles) qui, pour calculer le coût de production total doit être le même pour des technologies compétitives.

Définition des unités dans lesquelles sont exprimés les impacts sur l'environnement, en vue de leur utilisation dans le programme d'allocation.

Ainsi, c'est grâce à la collaboration des représentants des pays de l'AIE que les paramètres caractérisant les technologies peuvent être trouvés et que le complètement des données (évolution des paramètres dans le temps) peut être estimé.

## 2.2 Niveau d'implantation des technologies

L'inertie du système économique limite le taux d'implantation d'une technologie sur le marché. Si un niveau de saturation et l'allure de la courbe d'implantation de chaque technologie peuvent être retenus grâce à des considérations faisant intervenir les aspects économiques (capacité industrielle de production, compétitivité), les aspects démographiques, les

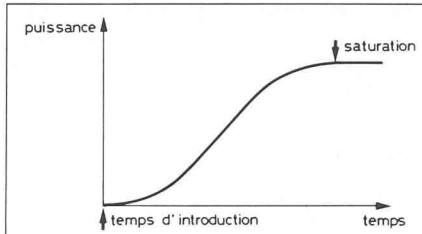


Fig. 2. — Courbe d'implantation d'une technologie.

structures sociales, et les aspects géographiques d'un pays, c'est une contrainte prenant aussi en compte ces causes qui permet d'obtenir la variation du taux d'implantation d'une technologie. L'allure usuelle de ces phénomènes est une courbe logistique (fig. 2). De telles courbes dressées pour chaque technologie permettent de vérifier l'homogénéité des données (capacité et taux d'accroissement à une date donnée) reçues de diverses sources. L'allure de la courbe et son lissage représentant les possibilités de développement d'une technologie, est effectuée pour la Suisse à l'Institut de production d'énergie.

Chaque technologie est ainsi caractérisée par son niveau d'implantation et son taux d'implantation en 1985, 2000 et 2020, fournissant ainsi une contrainte pour le modèle d'allocation.

## 2.3 Le modèle d'allocation des flux (MARKAL)

Le système énergétique peut être représenté par un réseau où les barres sont des technologies. Partant d'une demande, on peut déterminer les ressources une fois qu'est choisi un concept de génération des flux. Le modèle MARKAL est basé sur les méthodes de la programmation linéaire où une fonction objectif est optimisée dans tout le système en respectant certaines contraintes. De même structure que les modèles BESOM (développé au Brookhaven National Laboratory — USA), DESOM (version dynamique de BESOM) et KFA optimization model (développé à Jülich — RFA), MARKAL est dynamique et développé de manière à intégrer les objectifs exacts de l'AIE (prise en compte des technologies caractérisées et traitement de diverses stratégies). L'élément dynamique est incorporé en considérant des périodes de cinq ans, de 1980 à 2020 dans lesquelles ont lieu les investissements et les variations des coûts des combustibles, les émissions de polluants (dépendants des capacités), les importations, etc.

MARKAL choisit alors le système énergétique optimal sur la durée considérée par l'analyse (40 ans).

La fonction objectif à minimiser peut être :

le coût total actualisé à mi-1978,  
les importations de pétrole,  
les émissions de polluants.

Les contraintes sont données par des contraintes sur la production, la capacité, l'environnement et l'élément dynamique, telles que :

- Equilibres d'agents énergétiques
- Equilibres de demande
- Equilibres d'agents énergétiques pour les technologies de conversion
- Disponibilité des ressources
- Accroissement de la production d'un agent énergétique
- Capacité d'utilisation de chaque technologie
- Capacité totale fonction des investissements
- Taux de croissance de la capacité
- Pointes journalières et saisonnière. Réserve
- Capacité saisonnière au cours du temps. Réserve
- Extraction de chaleur dans la production couplée (limitation technique)

La fonction objectif en coûts prend en compte les éléments suivants : prix des agents énergétiques à l'importation et à l'exportation, coûts d'extraction, de traitement, de stockage, de distribution, de capital, d'exploitation, d'entretien. Les prix des combustibles en particulier étant variables au cours du temps et déterminants dans une telle approche (cas du pétrole), il s'agit de les estimer dans le futur.

## 2.4 Les scénarios mondiaux

Plusieurs scénarios mondiaux peuvent être étudiés à l'aide du taux d'accroissement du produit mondial brut, de l'évolution du prix du pétrole au cours du temps et des réserves de pétrole.

On détermine alors les impacts sur la demande d'énergie, le taux d'accroissement du prix des agents énergétiques, celui des nouvelles technologies, les mesures des économies d'énergie, etc... Cette étude a été menée sur la base des résultats du Rapport WAES (Workshop on Alternative Energy Strategies — Global Prospects 1985-2000).

Elle permet d'éliminer les scénarios dénués de sens et d'éclairer l'évolution des structures mondiales grâce à laquelle chaque pays de l'AIE peut élaborer ses propres scénarios nationaux.

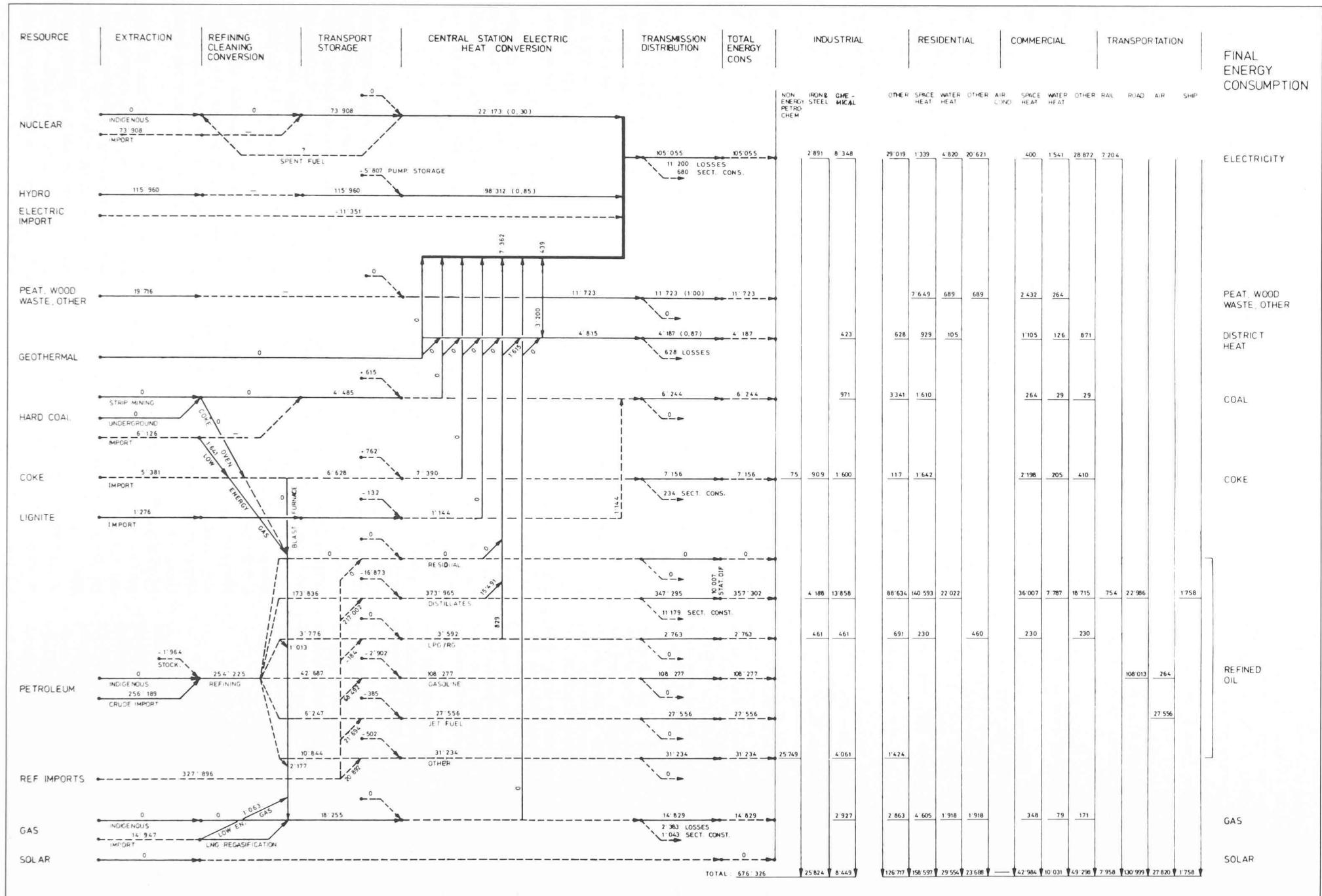
## 2.5 Les scénarios nationaux

Afin de connaître la demande nationale d'énergie et sa variation, chaque pays détermine les variables nationales importantes (économiques, les secteurs de demande...) et sélectionne les actions possibles du gouvernement et les stratégies nationales.

Le passage de la demande utile à la demande finale dépendant des technologies d'utilisation doit être estimée par chaque pays afin de préparer les inputs directs au modèle.

Les données de la Suisse sont fournies pour une part par l'Office fédéral de l'économie énergétique. Plusieurs scénarios sont à l'étude, allant des tendances actuelles à des restrictions strictes. Les secteurs de demande sont définis et les données sont préparées en termes d'énergie finale.

TABLEAU II : « Reference Energy System » pour la Suisse



### 2.6 Les stratégies énergétiques

Un certain nombre de stratégies sont prévues afin de donner un poids différent aux contraintes agissant sur :

les prix,  
la sécurité,  
l'environnement.

Des analyses de sensibilité feront varier :  
la quantité des ressources,  
les prix de l'énergie,  
l'environnement (nucléaire et CO<sub>2</sub>),  
le produit national brut.

De plus, les technologies sont classées en catégories permettant de simuler une

date d'introduction accélérée sur le marché et un taux d'implantation accéléré<sup>3</sup>.

### 3. Conclusion

Le modèle décrit est actuellement appliquée à quelques pays (USA, Royaume-

<sup>3</sup> Voir à ce sujet : *An International Programme for Evaluating Energy Technologies and Strategies*, par F. ALTDORFER, M. FINNIS, St. RATH-NAGEL, présenté à la Conference on Energy and Community development, Athènes, 10-15 juillet 1978.

Uni, RFA, Japon) pour éliminer les stratégies sans fondement. Dans un deuxième temps, chaque pays de l'IAE choisira ses stratégies et c'est ensuite qu'un modèle global sera conçu. Les résultats, objet de la phase 3, seront prêts en 1979, après que des critères de choix aient été explicités.

Adresse de l'auteur :

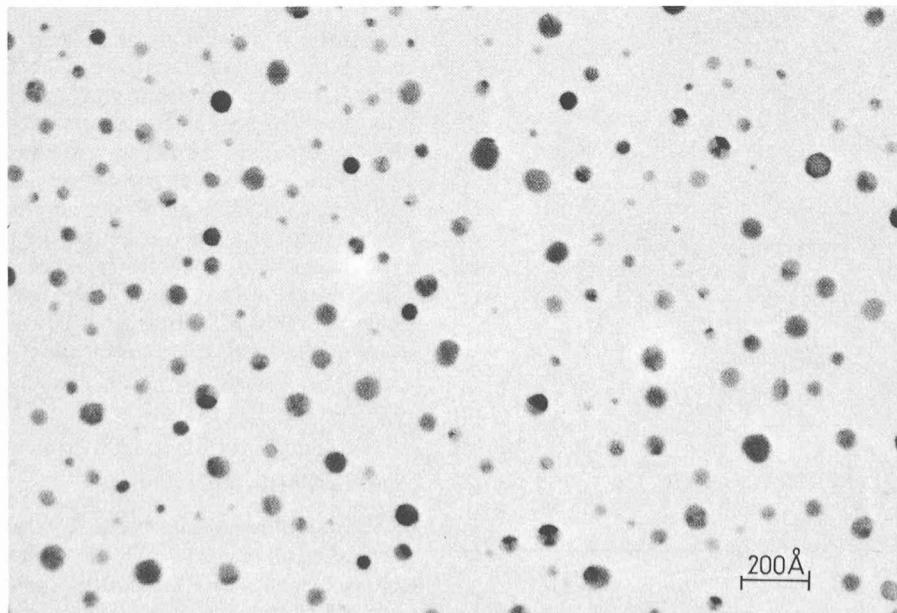
Jean-Michel Toinet  
Institut de production d'énergie  
de l'Ecole polytechnique fédérale  
Avenue Dapples 17  
1006 Lausanne

# Détermination de la taille de petits cristaux par diffraction électronique

par Christian Solliard et Pierre Duc, Lausanne

La physique des petits agrégats (ou petits cristaux) étudie les propriétés de systèmes composés de quelques atomes jusqu'à quelques milliers d'atomes, soit des tailles comprises entre quelques angströms et quelques centaines d'angströms (1 Å = 10<sup>-10</sup> m). Pour de tels systèmes, l'importance de la surface par rapport au volume conduit à l'apparition de propriétés nouvelles que l'on appelle « effet de taille » (dans un agrégat de 150 atomes, soit une taille d'environ 15 Å, plus de 60 % des atomes sont à la surface). On aura ainsi un effet de taille thermodynamique, par exemple l'abaissement de la température de fusion lorsque la taille des cristaux diminue, effet mis en évidence expérimentalement en particulier pour l'or [1]<sup>1</sup>. On peut également observer un effet de taille « structural » lorsque l'énergie superficielle devient comparable à certaines énergies de volume (énergie de déformation...).

Fig. 1. — Micrographie électronique d'un échantillon d'or obtenu par évaporation sous vide sur un film mince de carbone amorphe. Taille moyenne: 70 Å.



### Abstract :

The size of small crystals has sometimes been determined by electron diffraction, using the Scherrer formula  $D = \lambda/\Delta\theta$  which is a relation between the angular width of the Debye-Scherrer diffraction rings, the crystal diameter  $D$  and the electron wavelength. By electron diffraction and microscopy measurements, we have shown that this method does not apply in that simple way in the case of gold crystals smaller than 200 Å. These results can be understood in considering the particular structure of the crystals.

### Effet de taille structural

La forme d'équilibre pour un cristal est celle bien connue de Wulff [2] qui minimise l'énergie de surface. Pour plusieurs métaux cubiques à faces centrées (abréviés cfc), la forme de Wulff est un cubooctaèdre avec des plans (111) et (100) à l'extérieur. Pourtant, l'observation en microscopie électronique de petits cristaux de métaux cfc (Or, Argent, etc.) fait apparaître à l'intérieur des cristaux des contrastes, généralement en forme de triangle ou de losange, qui ne peuvent être expliqués par ce modèle (fig. 1). L'observation des figures de diffraction électronique obtenues à partir d'échantillons d'or fabriqués par évaporation sous vide sur une face fraîchement clivée de NaCl a permis à Ino [3] de concevoir un modèle de particule dite « multimâclée » expliquant ces contrastes. En particulier, le modèle icosaédrique est constitué d'un empilement de 20 tétraèdres (structure cfc, plans (111) à l'extérieur) ayant un sommet commun et séparés entre eux par des mâcles (faute d'empilement des plans (111)). Cet édifice de symétrie quinaire (on ne peut plus parler de cristal au sens de la cristallographie classique) ne « remplit » pas l'espace : le « défaut de fermeture » existant entre les tétraèdres serait comblé par une déformation du réseau de

<sup>1</sup> Les chiffres entre crochets renvoient à la bibliographie en fin d'article.