

# ENERGIE ET ECONOMIE: LA FORMATION DE CAPITAL PHYSIQUE

THÈSE N° 422 (1982)

PRÉSENTÉE AU DÉPARTEMENT DE GÉNIE CIVIL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE FÉDÉRALE DE LAUSANNE

POUR L'OBTENTION DU GRADE DE DOCTEUR ÈS SCIENCES

PAR

**JEAN-MICHEL TOINET**

Ingénieur civil EPFL  
de nationalité française

acceptée sur proposition du jury :

Prof. Dr A. Gardel, rapporteur  
Prof. Dr F. L. Perret, corapporteur  
Prof. Dr P. Suter, corapporteur  
Prof. Dr A. Holly, corapporteur

Lausanne EPFL  
1982



## REMERCIEMENTS

Ce travail n'aurait pu aboutir sans l'appui de nombreuses personnes et je tiens à remercier tout particulièrement :

- M. le professeur A. Gardel qui m'a fait découvrir, lorsque j'étais étudiant, le domaine complexe de l'économie énergétique, qui a su m'y intéresser et qui, par la suite, a assumé la tâche difficile de Directeur de thèse en ne ménageant ni ses encouragements ni ses critiques parfois dures mais toujours constructives.
- MM. les professeurs A. Holly, F.L. Perret, P. Suter pour l'intérêt qu'ils ont montré à l'égard de ce travail et l'appui qu'ils lui ont apporté en qualité de corapporteurs.
- Les collaborateurs de l'IENER et, en particulier, M. B. Saugy qui m'a initié à la modélisation énergétique et m'a grandement aidé à placer les questions énergétiques dans un contexte plus large, MM. J.A. Hertig, J.M. Giovannoni et Th. Zimmermann pour les fructueuses et quelquefois difficiles discussions que nous avons eues.
- MM. R. Codoni et P. Staub du Centre de Recherches Economiques de l'ETH, Zurich, Mlle G. Antille et M. C. Spierer du Centre d'Econométrie de l'Université de Genève pour m'avoir permis d'élargir le champ de mes connaissances.
- L'Office Statistique des Communautés Européennes du Luxembourg, et plus spécialement MM. Darragon et Dewaleyne pour m'avoir très aimablement et très diligemment fourni sous la forme désirée les données économiques et énergétiques que je désirais.
- Enfin, j'adresse toute ma reconnaissance à Mme M. Aviolat et à MM. S. Walczak et A. Willimann qui ont su donner un graphisme attrayant au texte et aux dessins de ce travail.





## TABLE DES MATIÈRES

### INTRODUCTION ET RESUME

#### 1. LIAISONS ENERGIE - ECONOMIE

##### 1.1 SYSTEME ECONOMIQUE : PRESENTATION ET DEFINITIONS

- 1.1.1 Définitions
- 1.1.2 Le tableau des échanges inter-industriels et le modèle Entrées-Sorties
- 1.1.3 Elasticité : définitions
- 1.1.4 Fonctions de production

##### 1.2 SYSTEME ENERGETIQUE : DEFINITIONS ET QUESTIONS

- 1.2.1 Définitions de termes énergétiques
- 1.2.2 Questions relatives à l'énergie primaire, à l'énergie intermédiaire et à l'énergie utile

##### 1.3 LIAISONS ENERGIE - ECONOMIE

- 1.3.1 Relation "Consommation d'énergie - PIB"
- 1.3.2 Fonctions KLEM et modèle Entrées-Sorties
- 1.3.3 Approche générale : les flux d'énergie dans le système économique
- 1.3.4 Simplifications progressives de l'approche générale

##### 1.4 CONCLUSIONS

#### 2. LE PROCESSUS ECONOMIQUE

##### 2.1 RAPPEL DE NOTIONS DE THERMODYNAMIQUE ET INTRODUCTION A LA THERMODYNAMIQUE DES PROCESSUS IRREVERSIBLES

- 2.1.1 Notions de thermodynamique
- 2.1.2 Flux généralisés et forces généralisées
- 2.1.3 Relations phénoménologiques entre forces généralisées et flux généralisés

##### 2.2 ETUDE D'UN INTERFACE OFFREUR - DEMANDEUR

- 2.2.1 Définitions : contenus énergétiques et prix
- 2.2.2 Transfert d'un bien entre un offreur et un demandeur. Flux physique, flux d'énergie. Forces généralisées.
- 2.2.3 Interprétation 1 : le profit
- 2.2.4 Interprétation 2 : variation de la demande
- 2.2.5 Interprétation 3 : aspect production
- 2.2.6 Conclusion

## 2.3 ETUDE DU PROCESSUS ECONOMIQUE

- 2.3.1 Succession de machines de transformation de l'énergie
- 2.3.2 La formation de capital physique
- 2.3.3 Puissances utilisables d'entrée et de sortie du processus économique
- 2.3.4 Le processus économique en état stationnaire

## 2.4 CONCLUSION

# 3. LE CONTENU EN ENERGIE UTILE DE LA FORMATION DE CAPITAL PHYSIQUE

## 3.1 PRESENTATION ET RAPPELS

## 3.2 LE CONTENU ENERGETIQUE PAR UNITE DE VALEUR DE DEMANDE FINALE

- 3.2.1 La méthode de R.A. Herendeen
- 3.2.2 Intégration des pertes d'énergie

## 3.3 LA GENERATION DE LA CONSOMMATION PRIVEE

- 3.3.1 Le multiplicateur et l'analyse Entrées-Sorties
- 3.3.2 L'endogénéisation de la consommation privée

## 3.4 LE CONTENU ENERGETIQUE PAR UNITE DE VALEUR DE FORMATION DE CAPITAL PHYSIQUE

## 3.5 LE CONTENU ENERGETIQUE DES IMPORTATIONS

## 3.6 CONCLUSIONS

# 4. APPLICATIONS : UNE COMPARAISON DES CONTENUS ENERGETIQUES DANS PLUSIEURS PAYS EUROPEENS

## 4.1 LES CONTENUS ENERGETIQUES DANS QUELQUES PAYS DES COMMUNAUTES EUROPEENNES, 1970

- 4.1.1 Les tables de dissipation énergétique
- 4.1.2 Les contenus en énergie primaire par unité de valeur de demande finale
- 4.1.3 Les contenus en énergie primaire par unité de valeur de formation de capital physique
- 4.1.4 Les contenus en énergie utile par unité de valeur de formation de capital physique

- 4.2 LES CONTENUS ENERGETIQUES EN SUISSE, 1970
  - 4.2.1 Estimation d'une table Entrées-Sorties par la méthode de cadrage "rAs"
  - 4.2.2 Les contenus énergétiques en Suisse, 1970
- 4.3 LES BALANCES ENERGETIQUES DE QUELQUES PAYS EUROPEENS, 1970
- 4.4 CONCLUSIONS

## 5. CONCLUSIONS GENERALES

---

### ANNEXE A : PRESENTATION DES DONNEES ENERGETIQUES : LES TABLES DE DISSIPATION ENERGETIQUE

- A.1 LA REPRESENTATION DES TRANSFORMATIONS ENERGETIQUES SOUS FORME DE TABLEAU
  - A.1.1 Produits dérivés
  - A.1.2 Présentation des statistiques énergétiques OSCE-EUROSTAT
  - A.1.3 Les tables de transformations énergétiques de quelques pays des Communautés européennes
- A.2 LE DOUBLE COMPTAGE ENERGETIQUE
  - A.2.1 Présentation
  - A.2.2 La dissipation de l'énergie dans les secteurs énergétiques
- A.3 LA DISTRIBUTION DE L'ENERGIE DANS LES INDUSTRIES
  - A.3.1 Choix des secteurs industriels
  - A.3.2 Les tables de dissipation de l'énergie dans les secteurs industriels et les ménages
- A.4 LES TABLES DE DISSIPATION DE L'ENERGIE

ANNEXE B : PREPARATION DES DONNEES ECONOMIQUES ET ENERGETIQUES  
POUR LA SUISSE, 1970

B.1 FORMATION DES VECTEURS DE CONSOMMATION INTERMEDIAIRE ET D'ENTREES  
INTERMEDIAIRES

- B.1.1 Choix des secteurs suisses
- B.1.2 Formation des vecteurs suisses

B.2 LA CONSOMMATION D'ENERGIE DISTRIBUEE EN SUISSE, 1970

- B.2.1 La consommation d'énergie par groupe de consommateurs
- B.2.2 La table de dissipation de l'énergie en Suisse, 1970

B.3 LA STRUCTURE DES IMPORTATIONS SUISSSES, 1970

- B.3.1 Provenance des importations suisses, 1970
- B.3.2 Les importations de biens
- B.3.3 Les importations de services
- B.3.4 Récapitulation

ANNEXE C : NOMENCLATURE ET CORRESPONDANCE DES GROUPES NACE - CLIO  
ET NACE - CLIO - R44

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

## LISTE DES PRINCIPAUX SYMBOLES UTILISÉS

### Flux

- Les grandeurs en valeur sont toujours symbolisées par des lettres majuscules.
- Les flux sont symbolisés par un point surmontant les grandeurs, sauf au chapitre 2 où les notations usuelles des économistes ont été gardées.

$\dot{B}, \dot{M}$	importations
$\dot{C}$	consommation privée
$\dot{D}$	demande finale
$\dot{E}$	énergie
$-\dot{E}_i$	vitesse de destruction d'exergie
$\dot{K}$	formation de capital physique
$\dot{N}$	formation brute de capital fixe
$\dot{P}, \dot{P}'$	pertes énergétiques
$\dot{P}$	flux physique
$\dot{V}$	valeur
$\dot{X}$	production totale
$\dot{Y}$	production

### Matrices

A	matrice des coefficients d'entrée (dimension $n \times n$ )
$\bar{A}$	matrice des coefficients d'entrée (dimension $n+1 \times n+1$ )
a	matrice des coefficients techniques (dimension $n \times n$ )
$\bar{a}$	matrice des coefficients techniques (dimension $n+1 \times n+1$ )
$\bar{a}'$	matrice des coefficients techniques énergétiques
B	matrice de distribution des importations
C	matrice des propensions à consommer
M	matrice des propensions à importer

$0^r, 0^s$	matrice des intensités énergétiques brutes
$r, s$	matrice des intensités énergétiques nettes
$0^{t'}$	matrice des contenus en énergie primaire par unité de demande finale
$t'$	matrice des contenus énergétiques utiles par unité de valeur de demande finale
$t$	matrice des contenus en énergie utile par unité de valeur de formation de capital physique
$W$	matrice de distribution des revenus

### Autres symboles

#### Lettres majuscules

$E$	énergie
$K$	capital physique
$L$	travail humain
$MP$	matières premières
$MI$	matières intermédiaires
$Y$	production

#### Lettres minuscules

$e$	contenu énergétique par unité de valeur
$0^{e'}$	contenu en énergie primaire par unité de valeur de demande finale
$0^e$	contenu en énergie primaire par unité de valeur de formation de capital physique
$e^*$	contenu énergétique par unité physique
$p$	prix, coût

#### Lettres grecques

$\alpha, \beta, \gamma$ (fig. 1.11)	rapports entre l'énergie contenue dans les facteurs primaires, les produits intermédiaires et l'énergie contenue dans les biens produits
$\alpha', \beta', \gamma'$ (fig. 1.11)	parts de l'énergie contenue dans des biens destinées aux activités de consommation et de formation de capital physique
$\bar{\alpha}, \bar{\beta}, \bar{\gamma}, \bar{\delta}, \bar{\varepsilon}$ (tableau A.29)	rapports entre l'énergie délivrée à un secteur faisant partie d'un ensemble de secteurs et l'énergie totale délivrée à cet ensemble de secteurs

$\eta$	rendement énergétique
$\mu$	taux de dépréciation économique du capital physique
$\mu_E$	taux d'usure physique du capital physique
$\pi$	profit





## INTRODUCTION ET RÉSUMÉ

### 1. PRESENTATION DE L'OBJECTIF DE LA THESE

Le but de ce travail est de comprendre, dans une vision générale, le rôle de l'énergie dans le système économique. Tout au long de son évolution, l'humanité a créé des structures dont le système économique est une représentation. L'établissement de ces structures a nécessité de l'énergie au même titre qu'elle exige d'autres facteurs : matériaux, travail humain et capital. Même plus, sans énergie, les autres facteurs ne sauraient exister.

Or, la théorie macro-économique a souvent considéré comme seuls facteurs le travail humain et le capital, faussant en particulier le véritable rôle de l'énergie : celle-ci n'y est que l'équivalent d'un bien de consommation (ou de production, à la rigueur, pour les industries) avec une valeur d'échange. Au vu des difficultés que rencontrent les économies à la fois au niveau économique et au niveau énergétique, il semble intéressant de se demander si l'énergie n'a pas un rôle plus important que celui généralement perçu par la théorie économique et les modélisateurs. L'objectif de la thèse est alors :

- de proposer un modèle dans lequel l'énergie joue un rôle primordial pour le déroulement de ce qui sera appelé le processus économique,
- d'introduire les concepts qui permettent de comprendre le déroulement du processus économique,
- d'appliquer pratiquement à de nombreux pays, dont la Suisse, les concepts élaborés.

## 2. DESCRIPTION DU PROCESSUS ECONOMIQUE

### 2.1 Quelques voies de recherche en science économique

- (i) En science économique, le "système économique" est souvent considéré comme suivant un cycle dynamique où interviennent producteurs, consommateurs et les opérations associées telles que production, consommation, travail, formation de capital, etc... La croissance est alors due à deux facteurs primaires : le capital et le travail humain.
- (ii) Certains économistes (E.R. Berndt et D.O. Wood, 1974; E.A. Hudson et D.W. Jorgenson, 1976; ...) ont intégré dans les fonctions de production, en plus du capital et du travail humain, l'énergie et les matières premières qui sont tout aussi indispensables pour la production de biens. Ces fonctions sont non-linéaires et il est possible d'étudier par exemple la substitution de l'énergie par les autres facteurs primaires. Néanmoins, l'énergie n'est pas, dans ces études, considérée avec toutes les spécificités que lui confèrent à juste titre les ingénieurs.
- (iii) D'autres économistes (P.A. Samuelson, 1971; T. de Montbrial, 1974;...) ont tenté d'expliquer quelques phénomènes économiques en établissant un parallèle avec des phénomènes physiques et, en particulier, thermodynamiques. Mais ces parallèles présentent les caractéristiques suivantes :
- ils sont ponctuels et ne s'intègrent pas dans un ensemble plus global,
  - ils sont proches de la "thermodynamique de l'équilibre", c'est-à-dire qu'il n'y a pas d'évolution possible,
  - ils sont souvent dus à une analogie de forme mathématique entre l'économie analytique et la thermodynamique analytique et non à une réalité objective.
- (iv) Il est bien sûr intéressant d'aborder la science économique sous un angle physique, permettant l'application de lois physiques et de raisonner par analogie. Une approche technique de phénomènes économiques

a permis, à un niveau plus global que précédemment, de faire quelques parallèles avec les phénomènes électriques et les schémas développés en électricité (O.I. Franksen, 1972, 1974; H.T. Odum, 1967, 1972; C.A. Hall et al., 1977). Toutefois, les progrès de l'analyse des systèmes (L. von Bertalanffy, 1973) mettent le poids sur l'importance qu'il y a à considérer des phénomènes évolutifs, et l'on comprend que c'est primordial quand il s'agit de science économique.

(v) Finalement, certains auteurs (N. Georgescu-Roegen, 1971, 1978; H.E. Koenig et T.C. Edens, 1977) ont insisté ces dernières années sur le caractère fondamental du processus économique : la loi de l'entropie règne sur le processus économique et son évolution. C'est dire que l'on revient à la thermodynamique. En particulier, les pertes d'énergie rendent le processus économique irréversible. Dans ce cadre, nous proposerons :

- une analyse des flux d'énergie entre les différentes activités qui composent le processus économique,
- un formalisme mathématique simple qui permette de comprendre la nature irréversible du processus économique,
- quelques développements qui permettent d'explorer les possibilités qu'offre notre approche au niveau de la science économique,
- quelques applications qui permettent de tirer des conclusions pratiques au niveau de la consommation d'énergie.

(vi) Il doit être clair que nous ne chercherons pas, dans un tel domaine, l'exhaustivité. Ainsi peut-on mentionner — pour mémoire — les recherches effectuées entre la thermodynamique statistique, l'économie et la théorie de l'information (W. Häfele, 1977; J. Thoma, 1977; C. Marchetti, 1978). D'autre part, nous n'aborderons pas :

- les incidences possibles au niveau de la théorie économique de l'équilibre général que certains économistes souhaiteraient revoir (F. Perroux, 1975),
- les incidences qu'impliquerait un approfondissement lié au second volet de la thermodynamique du non-équilibre, à savoir les structures dissipatives (P. Glansdorff et I. Prigogine, 1971).

(vii) Nous garderons tout au long de ce travail une approche d'ingénieur. Notre but n'est pas de nous substituer à l'économiste mais de montrer comment quelques résultats établis dans les sciences de l'ingénieur peuvent être utilisés pour améliorer la compréhension de certains phénomènes économiques. C'est à ce titre que nous n'emploierons que les concepts économiques qui seront nécessaires à notre démarche. Nous laissons à l'économiste le soin d'améliorer ces concepts et souhaitons que notre approche ne lui sera pas inutile. Il est un fait que devant la difficulté des problèmes énergétiques à résoudre à l'heure actuelle, les recherches pluri-disciplinaires en économie énergétique prennent une importance décisive. Mentionnons ici les travaux de A. Gardel (1979), B. Saugy (1979) et B. Fritsch et al. (1980) qui nous ont permis de nous familiariser avec ce vaste domaine qu'est celui de l'économie énergétique. Nous espérons alors contribuer à la compréhension de cette discipline complexe.

## 2.2 Le processus économique

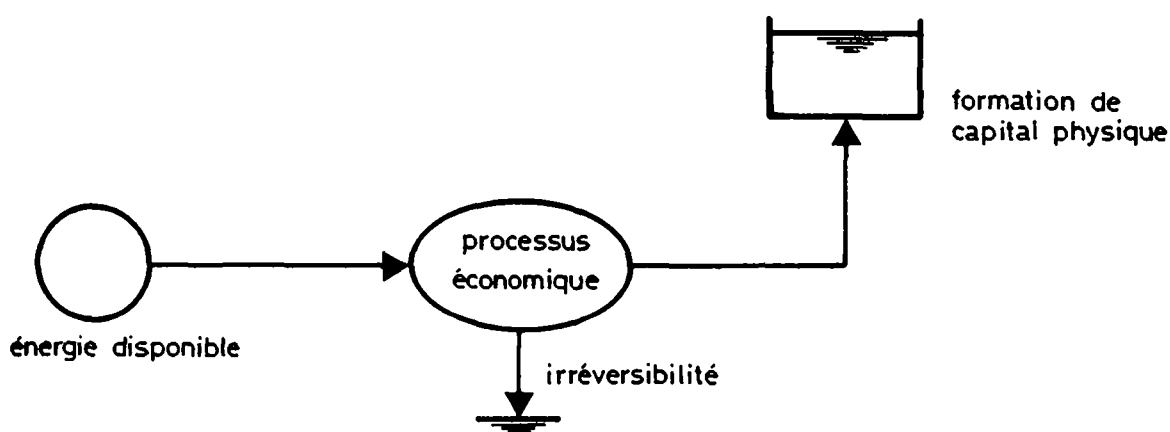
Le système économique est apparenté à un système thermodynamique ouvert, échangeant matière et énergie avec l'extérieur. Au sein du système économique se déroule le processus économique qui :

- prélève de l'énergie et de la matière à l'environnement,
- transforme énergie, matière, capital et travail humain.

Nous nous intéresserons à la formation de capital physique qui est une conséquence du processus économique et qui est une condition pour que les activités de production et de consommation soient satisfaites. Par capital physique, il faut entendre ce qui correspond physiquement au capital économique, c'est-à-dire par exemple les constructions, usines, équipements, etc. Il faut relever que :

- le capital physique constitue un "stock" qui subsiste d'une époque de temps à une autre, si l'on ne tient pas compte de son usure physique et de son obsolescence. Au contraire, le travail humain constitue un flux dépendant de l'époque considérée,
- la formation de capital physique permet le changement des structures économiques.

De manière simplifiée, le processus économique peut être représenté de la façon suivante :



Entre l'entrée et la sortie du processus économique, il y a perte de puissance (nous parlerons de vitesse de destruction d'exergie) caractérisant l'irréversibilité du processus. Cette irréversibilité est due aux pertes d'énergie qui ont lieu lors de chaque opération.

Cette approche physique de l'économie présente l'avantage d'introduire une comptabilité en termes d'énergie (joules) ou de puissance (watts) associée à une comptabilité en valeur (par exemple francs), seule considérée dans la science économique.

Ainsi, pour former du capital physique, de l'énergie doit être utilisée. On pourra associer à la formation de capital physique une certaine quantité d'énergie, investie dans le capital physique. Cette énergie provient de l'énergie investie dans les biens d'équipement, qui ont eux-mêmes demandés

de l'énergie pour être produits, et de l'énergie investie dans le travail humain. Les travailleurs contribuent tous, de manière directe ou indirecte, au travers de la production à la formation de capital physique. L'énergie associée au travail humain est déterminée par l'énergie correspondant à la consommation physique de biens de consommation qui "rétribue" physiquement en énergie le travail humain.

En définitive, la formation de capital physique implique que de l'énergie soit consommée, non seulement pour former le capital physique lui-même et le maintenir, mais aussi pour le travail humain et la consommation des travailleurs.

### 3. LES OUTILS ET CONCEPTS NECESSAIRES

Pour étudier le processus économique, nous avons dû utiliser, introduire et développer à plusieurs niveaux un certain nombre d'outils et de concepts.

#### 3.1 Au niveau de la thermodynamique

- (i) L'exergie est une fonction d'état définie par rapport à un état de référence. La diminution de l'exergie d'un système entre deux états est égale au travail fourni par le système dans un processus isentropique. Dans un processus irréversible, il y a destruction d'exergie, correspondant à la création d'entropie à l'intérieur du système. La vitesse de destruction d'exergie est égale à une somme de produits de forces généralisées et de flux généralisés. Quelques exemples de processus irréversibles sont donnés : transfert-chaaleur, écoulement d'un fluide,....
- (ii) L'expérience enseigne que, sous certaines conditions, forces et flux généralisés sont reliés par des relations phénoménologiques linéaires. Les paramètres qui lient forces et flux sont les coefficients phénoménologiques. Dans le cas de processus couplés, la matrice des coefficients phénoménologiques est symétrique (relations d'Onsager).

#### 3.2 Au niveau économique

- (i) Un bref rappel de macro-économie est présenté sous l'angle des tableaux des échanges inter-industriels et de la comptabilité nationale. Les matrices Entrées-Sorties et l'analyse développée par W. Leontief (1951, 1953) sont introduites.
- (ii) Nous insistons sur le fait que ces matrices peuvent être vues sous l'angle de fonctions de production où interviennent à côté du capital  $K$  et du travail humain  $L$ , l'énergie  $E$  et la matière  $M$ . Certes, par rapport aux fonctions de production mentionnées auparavant, ces fonctions sont linéaires – les élasticités de substitution sont nulles – mais elles se présentent sous une forme désagrégée, qui est extrêmement utile pour des applications pratiques.

(iii) L'investissement a bien évidemment de nombreux impacts sur les structures économiques et sur la consommation. Puisque lors des applications nous utiliserons le modèle Entrées-Sorties et que, par ailleurs, nous nous intéresserons principalement à la formation de capital physique, le modèle Entrées-Sorties sera étendu de manière à ce que la production totale nécessaire soit dépendante non pas de la demande finale – qui comprend, outre la formation de capital, la consommation – mais seulement de la formation de capital. La consommation est alors rendue endogène et induite par les investissements. Cela correspond à introduire l'effet multiplicateur de l'investissement dans l'analyse Entrées-Sorties, ce qui a été réalisé en introduisant une fonction de consommation prenant en compte l'augmentation de consommation engendrée par l'accroissement des revenus dus aux investissements.

### 3.3 Au niveau du système énergétique

- (i) Le système énergétique est la part du système économique qui a trait principalement à la "production" et à la "consommation" d'énergie. Un rappel de définitions employées en économie de l'énergie est effectué.
- (ii) Toutefois, nous mettons l'accent sur les difficultés qu'il y a de :
- définir l'énergie utile. Quelques exemples sont donnés pour montrer qu'il n'est pas facile de déterminer à quoi ou en quoi cette énergie peut être utile. Pour être dès à présent clair sur ce point, nous réserverons le terme "utile" à l'énergie qui sera investie dans la formation de capital physique, les pertes énergétiques étant déduites.
  - trouver des facteurs de conversion qui permettent de comparer des agents énergétiques, aussi différents que le pétrole, l'électricité, ou la chaleur. Nous verrons par la suite qu'il y a intérêt, si nous nous plaçons sur les plans énergétique et économique, à comptabiliser les pertes d'énergie et à raisonner en termes de pertes d'énergie, de la même manière que, sur le seul plan énergétique, il faut comptabiliser les pertes d'exergie (A. Gardel, 1979; J. Szargut, 1980).



(iii) Finalement, nous rappelons quelques résultats importants des travaux de A. Gardel, en particulier la corrélation "Energie consommée E – Produit intérieur brut Y". Cette corrélation apparaît comme une fonction de production  $Y = g(E)$  plus générale que les fonctions de production  $Y = f(K, L, E, M)$  dans la mesure où sans énergie, le capital physique, le travail humain et les matières premières ne sauraient exister. Ceci montre l'importance de l'énergie, facteur primaire essentiel, pour le déroulement du processus économique.

4. LES DEVELOPPEMENTS

- (i) Afin d'étudier l'irréversibilité du processus économique, le système économique est analysé sur la base du premier principe de la thermodynamique. De manière générale, le capital physique, le travail humain, les biens et l'énergie se combinent tout au long du processus économique pour permettre la production de nouveaux biens, la formation de capital physique, la consommation, etc.. Chaque activité demandant de l'énergie, il est possible d'y associer une certaine quantité d'énergie. Cette énergie provient à la fois de l'énergie directe qui est nécessaire mais aussi de l'énergie indirecte contenue dans les entrées nécessaires à la réalisation d'une activité. On peut établir un bilan énergétique où interviennent les quantités d'énergie contenues dans les activités et les pertes d'énergie qui interviennent lors de chaque activité. Nous étudions alors dans le cadre d'une approche globale la manière dont se combinent les flux d'énergie entre les producteurs et les consommateurs, en introduisant le travail humain, le capital physique et les biens. Notre principale contribution est ici d'associer une certaine quantité d'énergie au travail humain et à la formation de capital physique et de considérer les pertes d'énergie qui ont lieu dans le système économique.
- (ii) Cette approche peut être représentée de manière synthétique sous forme d'un tableau à double entrée (analogue au tableau Entrées-Sorties) où les échanges sont symbolisés par des flux d'énergie. On aboutit alors au concept de contenu énergétique. Finalement, un certain nombre d'hypothèses simplificatrices sont effectuées : elles permettent de retrouver des approches énergétiques du système économique moins globales développées par certains auteurs. Ces approches sont commentées par rapport à notre approche générale et nous mettons en évidence les hypothèses implicites qui les sous-tendent.

- (iii) Nous étudierons ensuite un interface du processus économique composé d'un offreur et d'un demandeur, où un flux de biens (ou flux physique) est dirigé de l'offreur vers le demandeur. A ce flux de biens est associé une certaine quantité d'énergie contenue et une certaine valeur. C'est dire que le transfert d'un bien entre un offreur et un demandeur correspond au transfert d'énergie, énergie qui est contenue dans le bien en question.
  
- (iv) Nous supposerons que le transfert de biens est irréversible. Cette irréversibilité sera mise en évidence en raisonnant en termes de flux et force. On admettra que les forces conditionnent les flux et en déterminent la direction. Dans le cas d'un transfert de biens, les forces sont les contenus énergétiques par unité de valeur qui déterminent le flux de bien dirigé d'un contenu énergétique élevé, au niveau de l'offreur, à un contenu énergétique bas, au niveau du demandeur. Nous montrerons que cela correspond à un flux d'énergie dirigé d'un prix bas à un prix élevé, les prix représentant des forces analogues à la température vis-à-vis du flux d'énergie.
  
- (v) L'approche retenue consiste donc à étudier un processus de type économique situé hors de l'équilibre au sens de la thermodynamique. Les prix y jouent le rôle de forces généralisées, sont des grandeurs exogènes au modèle, et déterminent les flux de biens entre l'offreur et le demandeur. Cela revient à dire que la vitesse à laquelle s'établissent les flux est infiniment plus rapide que la vitesse à laquelle varient les prix. A l'équilibre, il n'y a pas de différence de prix entre le prix au niveau de l'offreur et le prix au niveau du demandeur. Hors de l'équilibre, le prix au niveau du demandeur est supérieur au prix au niveau de l'offreur. Ce résultat peut s'interpréter du point de vue économique de la façon suivante : le prix au niveau de l'offreur est le prix de revient des biens et le prix au niveau du demandeur est le prix d'achat de ces biens. La différence entre prix d'achat et prix de revient est le profit du producteur. S'il n'y a pas de profit, le système est en équilibre au sens de la thermodynamique.

- (vi) L'approche sera étendue dans un deuxième temps à l'analyse d'une variation de la demande d'un bien à la suite d'une variation de prix imposée autour du point d'équilibre économique. Les fonctions de demande apparaîtront être en général des fonctions phénoménologiques non-linéaires. On fera intervenir ensuite plusieurs biens pour obtenir un effet de couplage et vérifier les relations d'Onsager au voisinage de l'équilibre.
  
- (vii) Finalement, c'est l'aspect transformation de l'énergie qui sera abordé. La destruction d'exergie est alors due aux pertes d'énergie qui ont lieu lors des procédés de transformation, impliquant l'accroissement des prix des quantités produites. Le processus économique peut être vu comme une succession de procédés de transformation, l'énergie étant prélevée à l'environnement pour être investie sous forme de capital physique, des pertes d'énergie se produisant tout au long des opérations. L'énergie investie sous forme de capital physique est appelée énergie utile, afin de bien la distinguer de l'énergie primaire. C'est au stade du capital physique que l'on définira le contenu en énergie utile par unité de valeur de formation de capital physique.

5. APPLICATIONS ET CONSTATATIONS

(i) Pratiquement, le concept de contenu énergétique peut être appliqué à des cas concrets. Nous avons calculé, étudié et comparé les contenus énergétiques pour plusieurs pays européens et montré quelles étaient les possibilités d'extension pour des études prévisionnelles de la consommation d'énergie. Les pays choisis sont : la R.F.A., la France, l'Italie, la Belgique, le Royaume-Uni et la Suisse. Un ensemble "moyen et représentatif" des conditions énergétiques et économiques prévalant en Europe est en outre donné par l'Europe des Six. Toutes les applications ont été faites pour l'année 1970, pour laquelle les statistiques disponibles ont semblé relativement complètes, détaillées et homogènes. Les contenus énergétiques ont été calculés pour différents secteurs d'activité économique (d'où la nécessité des tables Entrées-Sorties) et sous différentes formes :

- contenu en énergie primaire par unité de valeur de demande finale,
- contenu en énergie primaire par unité de valeur de formation de capital physique,
- contenu en énergie utile par unité de valeur de formation de capital physique.

Ce contenu énergétique représente l'énergie directe et indirecte (contenue dans les biens nécessaires à la production) qu'il faut pour satisfaire une unité de valeur de demande finale ou de formation de capital dans un certain secteur. Pour cela il faut convertir les matrices Entrées-Sorties (exprimées en valeur) en termes énergétiques. Il a été pour cela nécessaire :

- d'élaborer des tables de dissipation énergétique où l'on s'affranchit des problèmes de double comptage en raisonnant en termes de pertes d'énergie : on compte les pertes là où elles ont lieu. Ainsi les ressources énergétiques sont-elles pour une part des pertes énergétiques potentielles et tout se passe comme si chaque consommateur ou chaque utilisateur achète la possibilité de perdre de l'énergie. Les facteurs de conversion entre les différents agents énergétiques sont alors simplement basés sur leur pouvoir énergétique pour respecter la conservation de l'énergie;

- d'estimer, puisqu'il n'en existe pas, les tables Entrées - Sorties de production totale et de production indigène pour la Suisse, et pour 1970. Cela a été possible en utilisant une méthode de cadrage "rAs" à partir des tables Entrées - Sorties des différents pays des Communautés européennes;
  - de faire correspondre les différents secteurs d'activité entre les différents pays et les différentes statistiques disponibles. On a retenu pour tous les pays cinq secteurs énergétiques, pour les pays des Communautés européennes et l'Europe des Six quatorze secteurs industriels et pour la Suisse dix-sept secteurs industriels;
  - de mettre au point une procédure par itérations qui permette d'estimer l'énergie contenue dans les biens importés par un pays, ce qui correspond finalement à une ressource énergétique supplémentaire;
  - d'établir un programme de calcul sur ordinateur qui mette en forme les très nombreuses données nécessaires et calcule le contenu énergétique pour chaque secteur d'activité.
- (ii) Nous résumons ici quelques-uns des principaux résultats :
- En règle générale, les secteurs dont les contenus énergétiques sont les plus élevés sont ceux des produits chimiques, des produits à base de minéraux non métalliques, des fabrications métalliques et des transports. Les contenus énergétiques sont moins élevés dans les secteurs de transformation (construction de machines, produits alimentaires - les engrais sont comptés dans la chimie - les textiles, etc...). En ce qui concerne la construction et le tertiaire (services), le contenu en énergie primaire par unité de valeur de demande finale est faible. Par contre, par unité de valeur d'investissement, il est comparable à ceux des autres secteurs, l'effet multiplicateur étant très important, ce qui n'est guère surprenant si l'on pense à l'effet stimulateur de la construction sur l'ensemble de l'économie et à l'importance croissante du tertiaire. En Suisse, les secteurs à haut contenu énergétique sont ceux des produits non-métalliques, de la chimie et des transports. On retrouve la structure de l'économie suisse plutôt axée sur la transformation de produits semi-finis ne nécessitant que peu d'énergie par rapport à l'industrie des matières premières.

- Entre les pays, de sensibles écarts existent entre les contenus des différents secteurs. Ainsi, ceux de la France et de la R.F.A. sont comparables. Par contre ceux du Royaume-Uni, et dans une moindre mesure ceux de la Belgique, sont les plus élevés et peuvent être dus à la vétusté de l'appareil de production. Ceux de l'Italie sont intermédiaires mais présentent des pointes dans les secteurs des minéraux, de la chimie et du papier. Par rapport au volume du PIB, et si l'on considère que le niveau de désagrégation est suffisant, il semble toutefois que les consommateurs italiens achètent moins de produits à haut contenu énergétique que les autres. Quant à la Suisse, elle se situe en règle générale en-dessous ou au même niveau que la France et la R.F.A. si ce n'est dans l'industrie des produits alimentaires et les services.
- Les contenus en énergie utile par unité de valeur de formation de capital sont calculés en introduisant les rendements énergétiques de toutes les transformations. Ces rendements sont particulièrement faibles pour les transports et plus élevés dans les autres secteurs. Par rapport aux contenus en énergie primaire par unité de valeur de formation de capital, les contenus en énergie utile en représentent environ la moitié dans tous les secteurs. C'est dire l'importance des transports ayant un fort impact sur les autres secteurs. Des améliorations des rendements énergétiques des transports, même faibles, auront ainsi sensiblement d'effets sur le rendement énergétique global.
- Puisqu'une certaine quantité d'énergie est importée à l'occasion des importations de biens, il en est de même pour les exportations. On peut alors connaître les véritables consommations d'énergie des pays en prenant en compte l'énergie importée et exportée dans les biens. Le tableau ci-dessous dresse les balances énergétiques en PJ ( $= 10^{15} \text{ J}$ ) pour 1970.

	Consommation d'énergie primaire directe	Énergie primaire contenue dans les biens importés	Énergie primaire contenue dans les biens exportés	Consommation réelle d'énergie primaire
R.F.A.	10 099	2 907 (+ 29 %)	2 099 (- 21 %)	10 907 (+ 8 %)
France	6 859	1 264 (+ 18 %)	973 (- 14 %)	7 150 (+ 4 %)
Italie	4 696	1 297 (+ 28 %)	1 011 (- 22 %)	4 982 (+ 6 %)
Belgique	1 704	698 (+ 41 %)	791 (- 46 %)	1 611 (- 5 %)
Royaume-Uni	8 836	1 957 (+ 22 %)	2 033 (- 23 %)	8 760 (- 1 %)
Suisse	675	399 (+ 59 %)	232 (- 34 %)	842 (+ 25 %)

Ainsi, la Suisse est largement bénéficiaire, puisqu'elle importe beaucoup d'énergie indirecte, contenue dans les produits semi-finis, qu'elle transforme en produits finis en utilisant relativement moins d'énergie directe. Ces balances énergétiques peuvent être trouvées pour chaque secteur d'activité. En Suisse, les secteurs sont en général excédentaires si ce n'est la chimie qui est largement déficitaire.

- La précision des résultats n'est évidemment pas supérieure à la précision des données économiques et énergétiques. Elle dépend aussi de la valeur des hypothèses qu'il a été nécessaire de faire. Néanmoins, les comparaisons entre différents pays et différents secteurs sont possibles du fait de l'uniformité des bases statistiques employées et des traitements effectués. Ce sont ces comparaisons qui importent, permettant de mesurer le poids relatif des branches d'activité économique entre elles et entre les pays et de tirer des conclusions pratiques sur le plan énergétique. Il est ainsi significatif que les secteurs présentant un contenu énergétique élevé soient les mêmes dans les pays étudiés. En outre, les valeurs trouvées sont de premières estimations de ces contenus pour plusieurs pays, les mêmes secteurs et la même année.



## 6. CONCLUSIONS GENERALES

Nous orienterons ces conclusions sur les possibilités qu'offre le concept de contenu énergétique pour évaluer les impacts de la croissance sur le plan énergétique au moment où de nombreuses restructurations industrielles sont à l'ordre du jour et où se pose le problème de la dépendance vis-à-vis de l'extérieur. Ainsi, il peut s'agir d'évaluer dans quel domaine il faut investir si l'on souhaite être moins dépendant sur le plan énergétique ou d'estimer quelles implications aura sur les importations d'énergie une augmentation des exportations de biens. Dans ce contexte, le contenu énergétique permet aux responsables de la politique énergétique :

- l'évaluation des impacts sur le niveau des importations d'énergie, comptées en termes énergétiques, de différents scénarios économiques (hypothèses de changement de structure du PIB, de croissance du PIB, des investissements,...). De même, il est possible d'estimer les effets au niveau de l'emploi, en liaison avec les structures industrielles;
- l'estimation du véritable bilan énergétique d'un pays. Toutes choses étant égales par ailleurs, importer des biens correspond à importer de l'énergie de manière indirecte et à être moins dépendant d'un approvisionnement direct en énergie. Exporter plus impliquera nécessairement une augmentation de la consommation d'énergie dans le pays, pour produire des biens, mais aussi parce que le revenu national peut croître et que le surplus sera dépensé (consommé ou investi). Une balance en énergie des importations et exportations fournit des indications utiles à cet égard;
- l'établissement d'une base prévisionnelle quant à la demande en énergie des différents secteurs d'activité suivant l'estimation de leur croissance économique. Toutes choses étant égales par ailleurs, un investissement est consommateur d'énergie indirecte pour sa réalisation et son exploitation et induit une consommation

de biens, elle-même consommatrice d'énergie qu'il peut falloir importer. On peut dans ce sens se poser la question de la véritable valeur, au point de vue énergétique, des investissements "anti-gaspillage" qui ne seraient pas rentables sur le plan économique.

Finalement, ces investissements (qui se concrétisent par la formation de capital physique, rendue possible grâce à l'énergie utile, aux pertes énergétiques, à la matière, au travail humain et au capital physique existant) déterminent l'évolution du système économique. On comprendra donc l'importance des décisions de chaque investisseur et, sur le plan énergétique, la nécessité de prendre les décisions qui en découlent, en particulier de ne pas "lutter à tout prix" contre l'irréversibilité du processus économique.

## CHAPITRE 1

### LIAISONS ÉNERGIE-ÉCONOMIE

Le but de ce chapitre est de mettre en évidence le rôle important de l'énergie dans le système économique. Pour cela, nous commencerons par définir quelques termes économiques et par présenter le tableau des échanges inter-industriels et le modèle Entrées-Sorties qui se révéleront particulièrement utiles pour comprendre les liaisons entre l'énergie et l'économie. Dans l'optique de l'économiste, le système économique apparaît d'abord comme un cycle où interviennent les aspects production et consommation. On retrouvera ces deux aspects dans la deuxième partie dans laquelle sera faite, du point de vue de l'ingénieur, une brève description du système énergétique qui apparaît être un ensemble de chaînes énergétiques. Nous montrerons les difficultés qu'il y a à définir l'énergie primaire et l'énergie utile aux deux extrémités de ces chaînes. La dernière partie de ce chapitre permettra de concilier les approches de l'économiste et celles de l'ingénieur, dans une approche générale du système économique basée sur les flux d'énergie. En partant de considérations établies, telles que la corrélation qui existe entre la consommation d'énergie primaire et le produit intérieur brut, l'énergie est un facteur essentiel des fonctions de production économiques, et que l'on retrouve à tout stade du système économique : à chaque activité économique est associée une certaine quantité d'énergie. Nous introduirons alors le concept de contenu énergétique dans le cadre de notre approche générale, que nous comparerons avec des approches plus partielles. Notre principale contribution est ici de considérer non seulement l'énergie contenue dans les biens et les services, mais aussi l'énergie associée au travail humain et l'énergie investie dans la formation de capital physique.

## 1.1 SYSTEME ECONOMIQUE : PRESENTATION ET DEFINITIONS

Nous nous attacherons ici principalement aux vues macro-économiques du marché des biens et services telles qu'elles apparaissent dans le tableau des échanges inter-industriels et le modèle Entrées-Sorties. Nous définirons d'abord quelques termes employés en économie et nous soulignerons les difficultés que ces définitions soulèvent. En effet, si ces définitions sont communément admises par les économistes, elles peuvent paraître quelque peu ambiguës ou incomplètes à un ingénieur. Finalement, nous présenterons le modèle Entrées-Sorties tel qu'il est considéré par les économistes, ses avantages (désagrégation des fonctions de production pour chaque producteur) mais aussi son principal inconvénient (non-substitution des facteurs primaires).

### 1.1.1 Définitions

- (i) Les définitions qui suivent sont présentées sous l'angle du modèle Entrées - Sorties qui sera décrit au paragraphe 1.1.2. Nous représenterons le système économique sous la forme d'un cycle où interviennent producteurs et consommateurs. Nous introduirons les consommateurs privés, la formation de capital physique, la demande finale puis la valeur ajoutée qui comprend la rémunération des facteurs primaires capital et travail humain.
- (ii) Les biens et les services sont offerts aux consommateurs par les producteurs. Nous remarquerons ici que l'énergie et les matières premières ne sont pas dissociées des biens et services et qu'elles sont assimilées comme tels. C'est à notre avis un abus de langage et on doit dire, de manière générale, que les produits offerts par les producteurs sont des matières premières, de l'énergie, des biens et des services.
- (iii) Une distinction entre les différents consommateurs peut être effectuée en définissant :
  - les consommateurs intermédiaires qui sont des producteurs consommant ou transformant les produits dont ils ont besoin pour leur propre

production, et qu'ils peuvent se procurer auprès d'autres producteurs. Ainsi, un producteur d'automobiles est un consommateur intermédiaire dans la mesure où il a besoin d'acier, produit par un producteur d'acier;

- les consommateurs finaux qui sont formés des individus et des collectivités publiques. Nous noterons l'emploi malheureux du terme "final" qui semble indiquer la fin d'une chaîne d'opérations<sup>1/</sup>. C'est en fait un cycle qu'il faut considérer puisque les individus offrent du travail humain aux producteurs.

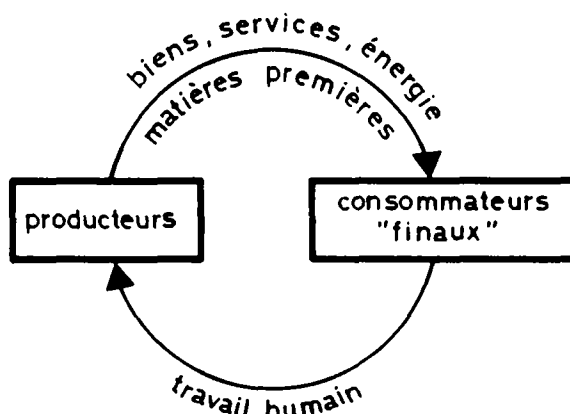


Fig. 1.1 Échanges entre producteurs et consommateurs "finaux".

Notons dès à présent que l'un des principaux objectifs de l'économiste est d'étudier les moyens de satisfaire la consommation des individus, comme si celle-ci était finale. Afin d'éviter toute ambiguïté sur la finalité du système économique, nous parlerons par la suite, et sauf exception, de consommation privée.

- (iv) La figure 1.1 a un caractère statique. Réellement, pour qu'un producteur puisse produire, il faut outre les produits et le travail humain nécessaire, des constructions (usines, logements, bâtiments publics, ...) et des équipements (machines, ...). Nous définirons le capital physique comme étant formé des constructions et des équipements.

---

1/ ceci est d'autant plus malheureux que cela peut prêter à confusion avec les termes utilisés en économie de l'énergie. Ainsi, en économie de l'énergie, on évite de parler d'énergie finale pour parler d'énergie distribuée.

Nous emploierons par la suite cette locution qui présente d'abord un aspect physique. Le capital physique a pu être formé par des investissements<sup>1/</sup> (mesurés en valeur, par exemple en francs) qui ont permis :

- d'accroître physiquement le capital physique existant;
- d'en remplacer physiquement la part devenue obsolète ou usée (nous parlerons d'usure physique du capital physique).

Appelons K la valeur du capital physique<sup>2/</sup> constitué à un instant donné. Soit  $\Delta N$  la valeur des investissements (bruts) ou formation brute de capital fixe (F B C F) auxquels on procède durant une période de durée  $\Delta T$ . Cette valeur  $\Delta N$  est alors divisée en deux parties :

- une part  $\Delta K$ , ou valeur des investissements nets, permettant la création de capital physique supplémentaire;
- une part  $\mu \cdot K \cdot \Delta T$ , représentant les amortissements destinés à remplacer la part du capital physique devenue obsolète, où  $\mu$  est le taux, rapporté à l'unité de temps (par exemple : % par an) de la dépréciation de la valeur du capital existant. On suppose que le taux  $\mu$  est constant, donc que le capital se déprécie régulièrement au cours du temps<sup>3/</sup>. On peut donc écrire :

$$\Delta K = \Delta N - \mu \cdot K \cdot \Delta T$$

Divisons les deux membres de cette équations par  $\Delta T$  :

$$\frac{\Delta K}{\Delta T} = \frac{\Delta N}{\Delta T} - \mu \cdot K$$

---

1/ les investissements sont principalement le fait de l'initiative des entreprises qui, particulièrement grâce à leur capacité d'innovation, contribuent à l'évolution du système économique.

2/ la valeur totale du capital physique peut être évaluée à partir du montant des immobilisations des entreprises (capital physique productif) et du montant du capital physique non productif (logements, équipements collectifs). Il faut y ajouter la valeur des stocks (actifs de roulement) dont la variation pendant une période de temps donnée fait partie de la demande finale, comme la consommation privée et la formation de capital.

3/ ceci est une convention très simplificatrice à l'heure actuelle où l'obsolescence est un phénomène important et complexe.

et passons à la limite, en supposant que les fonctions  $\Delta K$  et  $\Delta N$  sont continues :

$$\dot{K} = \dot{N} - \mu \cdot K \quad (1.1)$$

C'est la "loi d'accumulation du capital" des économistes<sup>1/</sup>. On doit noter ici que, plus généralement, il faudrait parler de loi de variation du capital.

(v) Divers groupes sont à l'origine de ces investissements :

- les industries et entreprises en créant des constructions et équipements;
- les ménages en achetant des logements;
- les collectivités en créant écoles, routes, hôpitaux, ... (investissements collectifs).

(vi) Il faut qu'une part de la production soit consacrée à la formation de capital physique qui permettra une future consommation privée.

On définira la demande finale, constituée :

- de la consommation privée, qui groupe la consommation des ménages des administrations publiques, etc ;
- des investissements (formation de capital physique) ;
- des variations de stocks, qui sont une consommation ( $>< 0$ ) déplacée dans le temps.

Pour l'économiste, et dans une approche de l'économie qui ne soit plus statique, deux choses sont particulièrement importantes à satisfaire : la consommation privée et la formation de capital physique. Il est implicitement entendu que la consommation privée dépend de la formation de capital puisque cette dernière permet une future

---

1/ les économistes écrivent souvent  $\dot{K} = I - \mu \cdot K$  où  $I$  est la valeur de l'investissement brut par unité de temps. On a donc  $I = \dot{N}$ , ce qui implique, par exemple entre l'instant 0 et l'instant  $T$  :

$$N = \int_0^T I(t) \cdot dt$$

$N$  est le capital brut (comme s'il n'y avait pas de dépréciation, par opposition au capital net  $K$ ) à l'instant  $T$ . En effet,  $\Delta N$  est l'augmentation de capital brut pendant une période de temps  $\Delta T$  qui est bien égale à la valeur des investissements bruts auxquels on a procédé pendant cette période de temps.

consommation. Mais nous devons aller plus loin. Inversément, la formation de capital physique dépend de la consommation privée dans la mesure où celle-ci dépend du travail offert par les consommateurs, travail nécessaire à la formation de capital physique (fig. 1.2).

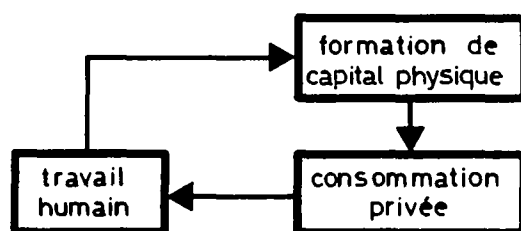


Fig. 1.2 Liaisons "formation de capital - consommation privée"

On comprend ici tout l'arbitraire qu'il y a à parler de consommation finale parce que le travail humain est nécessaire pour la production mais aussi pour la formation de capital. En effet, production et formation de capital physique sont étroitement liées. Pour former du capital physique, il est nécessaire que des produits d'équipement (par opposition aux produits de consommation) soient fabriqués et assemblés. Mais la capacité de production dépend à son tour du capital physique existant, qui est utilisé lors de la production (et qui, ainsi que nous le dirons par la suite, s'use physiquement) (fig. 1.3).

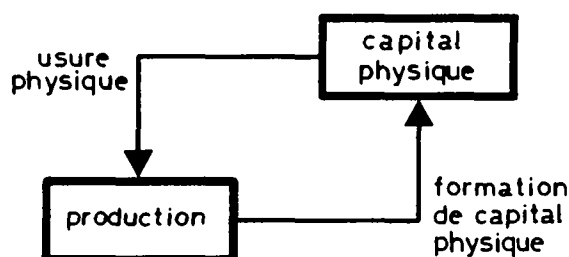


Fig. 1.3 Liaisons "production - capital physique"

- (vii) La mesure employée par les économistes pour quantifier les activités économiques est la monnaie. La monnaie permet de définir la valeur d'un échange s'effectuant entre deux agents (un offreur et un



demandeur). Cela permet une uniformisation de toutes les transactions qui portent sur des quantités de nature physique différente suivant les produits : kWh d'électricité, m<sup>3</sup>d'eau, tonnes de ciment, nombre d'automobiles de telle puissance, hommes-années (travail humain). Le prix d'un produit est alors la valeur de la transaction rapportée à la quantité physique échangée.

(viii) Pour pouvoir produire, les producteurs ont besoin de "ressources" (au sens économique). Ces ressources sont classées en deux groupes :

- les facteurs primaires qui généralement pour les économistes sont le capital et le travail humain. La rémunération des facteurs primaires est la valeur ajoutée<sup>1/</sup> qui comprend :

- la rémunération du travail humain et les charges sociales correspondantes. Ces coûts sont pour une part proportionnels à la quantité produite et pour une autre part sont fixes (maintenance des installations);
- les coûts du capital (amortissements du capital, intérêts sur le capital) qui dépendent du taux d'intérêt, de la durée des installations, des situations financières des entreprises (dettes, autofinancement) et de la capacité de production. Il faut y ajouter les assurances et les taxes autres que sur le revenu, les frais de promotion, de développement, de démarrage (essais, formation des équipes,...), de développement, d'administration;
- les impôts, taxes sur les revenus,...;
- les profits des producteurs;

- les entrées intermédiaires qui sont les produits dont ont besoin les producteurs. Ces produits comprennent les biens et les services mais aussi l'énergie et les matières premières. Ainsi, un fabricant d'automobiles devra se procurer auprès d'autres producteurs de l'acier, de l'électricité, etc...

---

1/ il faut remarquer que les composants de la valeur ajoutée sont, à part les profits des producteurs, des coûts pour les industries. Il serait alors préférable de parler de coûts ajoutés (H.J. Pick, 1977).

Ces ressources correspondent donc d'une part au travail humain et au capital et d'autre part aux produits intermédiaires. Il faut tous ces éléments pour établir la fonction de production d'un producteur, et non seulement le travail humain et le capital. Nous reviendrons sur ce point par la suite, mais il faut déjà noter que les économistes ont spécifié qu'il était souhaitable, voire primordial, d'introduire en plus l'énergie et la matière dans les fonctions de production, afin de former les fonctions (K, L, E, M).

- (ix) La valeur des ressources est égale à la valeur de la production totale destinée aux consommateurs intermédiaires, aux consommateurs privés et à la formation de capital physique, aux variations de stocks près (fig. 1.4).

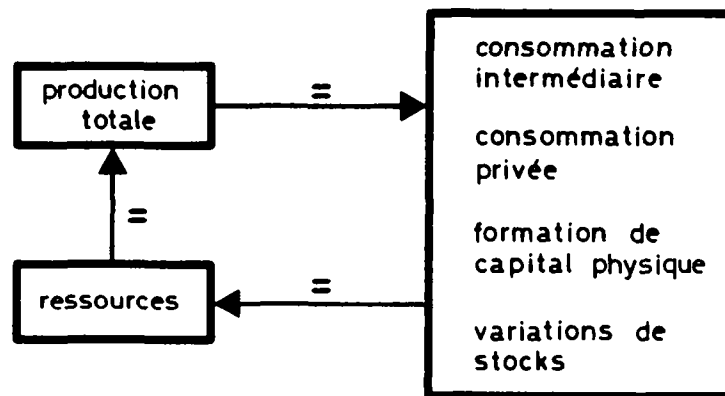


Fig. 1.4 Valeur de la production totale et des ressources.

- (x) Toutes les opérations décrites ci-dessus peuvent être mesurées pour une certaine période de temps. Généralement, la période de temps considérée est l'année, parce que supposée répétitive. Les ensembles pour lesquels des statistiques annuelles sont récoltées sont des pays ou groupes de pays. Vis-à-vis des échanges entre un ensemble et l'extérieur, les importations sont des ressources supplémentaires et sont assimilées à des entrées supplémentaires. Les exportations sont des consommations supplémentaires. Dans ce cadre, on définit :

- le produit intérieur brut (PIB) qui est égal à la demande finale nette, c'est-à-dire la demande finale, y compris les exportations, et diminuée des importations. Il est égal à la valeur ajoutée;
- le produit national brut (PNB) qui se déduit du PIB en ajoutant la balance des revenus reçus de et versés à l'extérieur de l'ensemble considéré, qui sont des ressources supplémentaires nettes.

Ces agrégats, mesurés en valeur, permettent d'estimer l'activité générale de l'ensemble. Ils servent de base aux comparaisons internationales. De nombreuses critiques peuvent être émises à propos de ces agrégats. Ce n'est pas le lieu de rentrer ici dans ces questions. Il suffit de noter que ces agrégats ne tiennent compte que des transactions en valeur, alors qu'une production non comptée contribue au niveau de vie général : travail ménager, bricolage, ... (et même travail non déclaré). Si l'on peut admettre en première approximation que ce travail non compté représente un pourcentage identique de la production dans des pays de même niveau industriel, il peut par contre varier dans de grandes proportions si le niveau industriel est très différent. Cela conduit à une sous-estimation du PIB des pays moins développés. Notons en outre que d'autres agrégats peuvent être employés tels le revenu national, ou le produit matériel net pour les pays socialistes.

### 1.1.2 Le tableau des échanges inter-industriels et le modèle Entrées-Sorties

Toutes les opérations décrites ci-dessus peuvent être intégrées dans le cadre d'une comptabilité globale, où intervient chaque producteur et chaque consommateur. On scindera l'ensemble des producteurs en producteurs industriels qui produisent et offrent des produits, et en consommateurs privés qui offrent leur travail. Ainsi, chaque producteur industriel a besoin de travail, de capital et d'entrées intermédiaires (produits) qu'il transformera pour sa propre production. Celle-ci sera délivrée aux autres producteurs industriels (qui sont donc aussi des consommateurs intermédiaires) et à la demande finale. Les consommateurs privés qui font partie de cette

dernière, offriront leur travail aux producteurs industriels. Ceux-ci rémunéreront le travail et les consommateurs pourront alors acquérir les produits offerts par les producteurs. Toutes ces opérations peuvent être synthétisées dans le tableau des échanges inter-industriels, élaboré par W. Leontief (1951, 1953), où toutes les transactions en valeur entre les différents producteurs industriels sont représentées; le bouclage du système économique est effectué en intégrant la demande finale et la valeur ajoutée.

(i) Notations

Une certaine systématique, qu'on ne retrouve pas toujours dans les traités d'économie, s'impose pour bien différencier les grandeurs en valeur et les grandeurs en unités physiques. Les notations que nous proposons ici ne sont pas aussi systématiques que nous le souhaiterions, afin de garder quelques unes des notations classiques employées par les économistes (en particulier la matrice des coefficients d'entrée  $A$  et les prix  $p$ ). On exprimera donc :

- les grandeurs en valeur par des lettres majuscules (production totale en valeur :  $X$ )
- les grandeurs en unités physiques par des lettres minuscules (production totale de tonnes d'acier :  $x$ )
- les rapports de deux valeurs par des lettres majuscules (coefficient d'entrée  $A_{ij}$ ). D'autres symboles seraient ici souhaitables pour les différencier des grandeurs en valeur
- les rapports de deux quantités physiques par des lettres minuscules (coefficient technique :  $a_{ij}$ )
- les coûts et prix, rapports d'une valeur et d'une quantité physique, par des lettres minuscules (prix :  $p$ ).

(ii) Le tableau des échanges inter-industriels

Ce tableau reflète l'activité du système de production et est donc une description en valeur des échanges entre producteurs industriels.

Soient :

- $C_{ij}$  la valeur des échanges entre deux producteurs industriels  $i$  et  $j$ , qui représente la valeur de la consommation intermédiaire en produits  $i$  du producteur  $j$  (on admet que le producteur  $i$  ne produit que des produits de type  $i$ , c'est-à-dire qu'il y a interdépendance entre les activités et les produits)
- $X_i$  la valeur de la production totale du producteur  $i$  (en produits  $i$ )
- $D_i$  la valeur de la part de la production du producteur  $i$  attribuée à la demande finale (ou la demande finale en produits  $i$ ).

Supposons en outre qu'il y a  $n$  producteurs industriels (donc  $n$  produits - le travail n'en faisant pas partie, puisqu'il fait partie de la valeur ajoutée). Chaque  $C_{ij}$  est un élément du tableau des échanges inter-industriels  $C$ , de dimension  $n \times n$ . Ainsi, la production du producteur  $i$  est délivrée à tous les producteurs  $j$  et à la demande finale :

$$X_i = \sum_{j=1}^n C_{ij} + D_i \quad (1.2)$$

*(Nous ferons au point (iii) ci-après quelques remarques à propos de cette équation qui scinde consommations intermédiaires et demande finale).*

Soient, d'autre part :

- $R_j$  la valeur des ressources nécessaires pour la production d'un producteur  $j$
- $V_j$  la valeur ajoutée nécessaire à la production du producteur  $j$ .

Les ressources sont la somme de la valeur ajoutée et de tous les produits fournis par les producteurs  $i$  (entrées intermédiaires) :

$$R_j = \sum_{i=1}^n C_{ij} + V_j \quad (1.3)$$

Il doit y avoir égalité de la valeur de la production totale de chaque producteur  $i$  et de la valeur des ressources qui lui sont nécessaires :

$$X_i = R_j \quad \text{si } i = j$$

La figure 1.5 représente ces différentes relations et montre le bouclage du système économique.

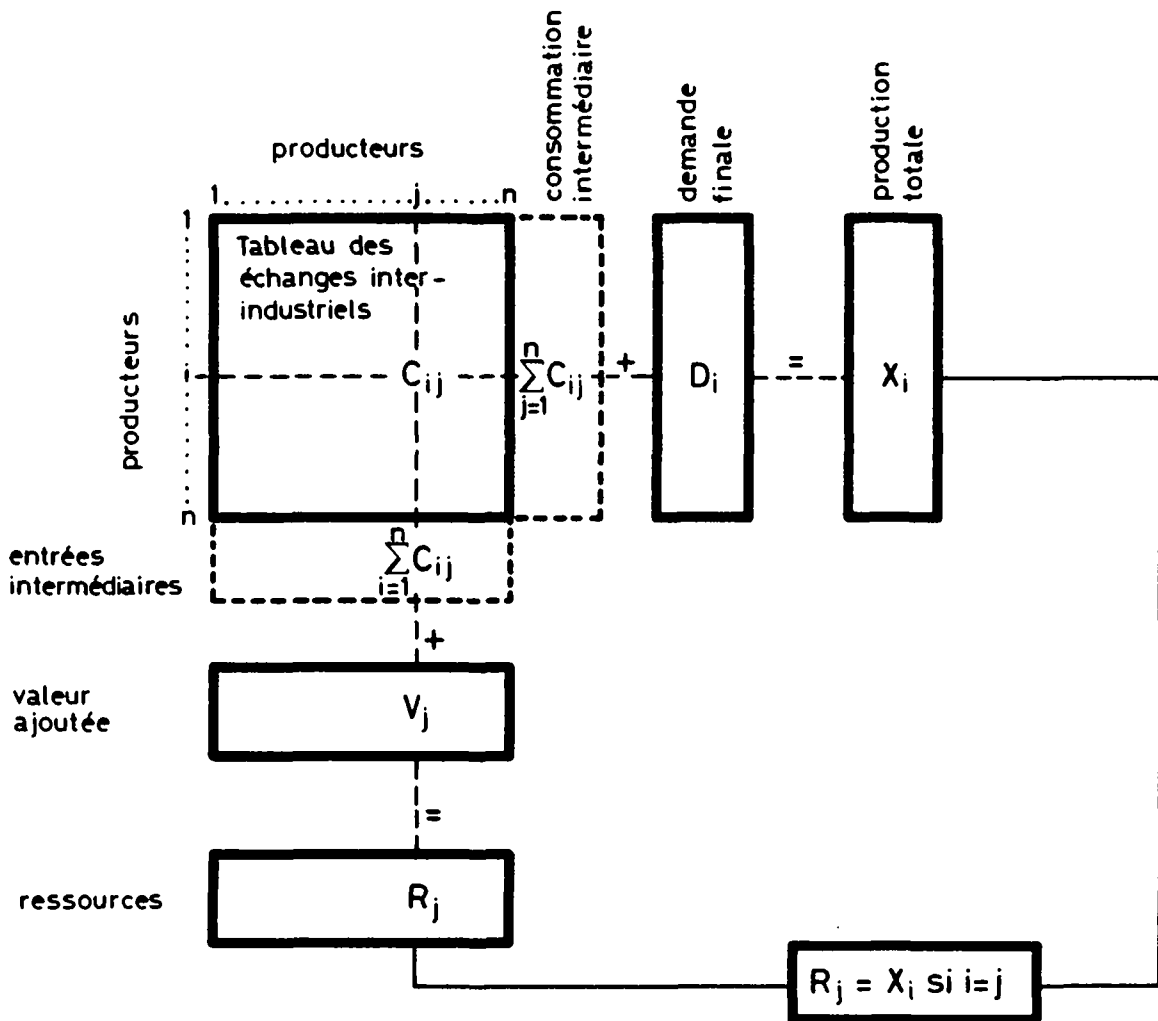


Fig. 1.5 Bouclage du système économique

Définissons un coefficient d'entrée  $A_{ij}$ , tel que :

$$A_{ij} = \frac{C_{ij}}{X_j} \quad (1.4)$$

$A_{ij}$ , mesuré en valeur par unité de valeur, représente donc la part de la valeur de la production totale du producteur  $j$  provenant de l'achat de produits fabriqués par le producteur  $i$ . En d'autres termes, pour produire une unité de valeur de produit  $j$ , il faut  $A_{ij}$  unités de valeur de produit  $i$ . L'équation (1.2) devient :

$$X_i = \sum_{j=1}^n A_{ij} \cdot X_j + D_i \quad (1.5)$$

En relation matricielle, en définissant les vecteurs  $X = (X_i)$  et  $D = (D_i)$  de dimension  $n$  et la matrice  $A = ((A_{ij}))$  de dimension  $n \times n$ , on a :

$$\begin{aligned} X &= A \cdot X + D \\ X &= (I - A)^{-1} \cdot D \end{aligned} \quad (1.6)$$

où  $I$  est la matrice diagonale unité. L'existence de la matrice  $(I-A)^{-1}$  a été montrée par de nombreux économistes, pour des économies observées et réelles (voir, par exemple, L. Stoleru, 1975).

Connaissant la matrice des coefficients d'entrée  $A$ , ou matrice Entrées-Sorties, l'équation (1.6) permet donc de trouver la production totale de tous les producteurs, nécessaire pour que la demande finale soit satisfaite. Chaque élément  $(I-A)^{-1}_{ij}$  représente la valeur totale, directe ou indirecte, de la production du producteur  $i$  pour satisfaire une unité de valeur de produit  $j$  demandé finalement.

Ce même résultat peut être obtenu par itération, où pour une demande finale  $D$ , on doit commencer par produire une production directe  $X_1 = D$ , qui nécessite une production indirecte  $AX_1 = X_2$ , qui elle-même nécessite une production indirecte  $AX_2 = X_3 = A^2X_1 = A^2D$ , etc..., la production totale directe et indirecte est alors :

$$X = (I + A + A^2 + \dots + A^i + \dots) \cdot D$$

convergeant vers  $(I-A)^{-1} \cdot D$ .

(iii) Remarques et commentaires

- a) La réalisation du tableau des échanges inter-industriels se fait à partir des statistiques et observations de la réalité, par exemple pour un pays et une année donnés. Cela demande un énorme effort de collecte et de mise en forme des statistiques. De celles-ci dépend le niveau de désagrégation du tableau, c'est-à-dire le nombre de secteurs industriels à considérer, ou le nombre de producteurs différents. La construction du tableau est longue, de l'ordre de 4 à 5 ans à partir de l'année étudiée, ce qui est désavantageux pour une étude prospective, surtout en cas de changements structurels rapides. Il n'en reste pas moins que ces tableaux reflètent une situation réelle durant une période de temps donnée et qu'ils servent d'abord à analyser la situation de cette période. C'est dans ce sens-là que nous les emploierons lors d'applications pratiques.
- b) La diversité des produits fabriqués et des producteurs est telle qu'il est nécessaire de travailler à un niveau plus ou moins agrégé, où l'on considère non pas des producteurs ni des produits mais des secteurs industriels. Des nomenclatures ont été élaborées pour une classification en secteurs des produits industriels (ONU, 1968; OSCE, 1975). Elles sont basées sur l'activité principale des industries. Cela pose quelques problèmes pour les industries qui produisent plusieurs produits (produit principal et produits secondaires) classés dans différents secteurs. Il est en effet difficile d'attribuer les coûts réels (de capital surtout) à chacun de ces produits. Aussi les facteurs primaires sont affectés au produit principal et une vente fictive du produit principal aux produits secondaires effectuée. Cette vente doit théoriquement être proportionnelle à la production du produit principal. En fait, dans l'analyse Entrées-Sorties, cette vente fictive est proportionnelle à la production des produits secondaires, ainsi que le veut l'équation (1.4). On retrouvera ce problème au chapitre 3 et à l'annexe A à propos de l'énergie: par exemple, transformation du charbon en coke (produit principal) et gaz (produit secondaire). Pour ces problèmes de classification et d'agrégation des secteurs, on pourra se reporter à l'étude de M. Holzman (1953).



c) Toutes les grandeurs présentées ci-dessus sont des valeurs. Il serait possible de raisonner en quantités physiques en disant que la quantité physique d'un bien produit par un producteur est destinée à la consommation intermédiaire et à la demande finale. Suivant l'équation (1.2) mais avec des lettres minuscules pour exprimer les quantités physiques, on a :

$$x_i = \sum_{j=1}^n c_{ij} + d_i \quad (1.7)$$

Définissons un coefficient technique  $a_{ij}$  qui représente la quantité physique de bien ou service  $i$  nécessaire pour produire une unité physique de produit  $j$ , tel que :

$$a_{ij} = \frac{c_{ij}}{x_j} \quad (1.8)$$

L'équation (1.7) devient :

$$x_i = \sum_{j=1}^n a_{ij} \cdot x_j + d_i \quad (1.9)$$

De la même manière que précédemment, on peut écrire en relation matricielle, après avoir formé les vecteurs  $x = (x_i)$  et  $d = (d_i)$ , et la matrice  $a = ((a_{ij}))$  :

$$x = (I - a)^{-1} \cdot d \quad (1.10)$$

On peut donc, à partir d'une demande finale donnée exprimée en quantités physiques, utiliser l'équation (1.10) pour déterminer la production totale physique nécessaire : c'est le point de vue de l'ingénieur<sup>1/</sup>. En se rapportant à la figure 1.5 où l'on suppose maintenant que les transactions sont exprimées en quantités physiques, on voit aisément que les sommes en ligne sont respectées (c'est l'équation (1.9) : un producteur délivre ses automobiles aux autres producteurs et aux consommateurs, par exemple) mais pas la somme en colonne (par contre, on peut dire que pour sa production d'automobiles, le producteur a besoin de tant de tonnes d'acier, de tant de tonnes de caoutchouc, de tant d'hommes-années, etc).

---

1/ par souci de clarté, nous ferons une distinction, certes fictive, entre l'ingénieur raisonnant en termes physiques, et l'économiste introduisant les prix et raisonnant en termes de valeur.

L'économiste intervient ici en introduisant les prix, à la fois pour effectuer cette somme en colonne, boucler le système économique (valeur de la production égale valeur des ressources) et déterminer la valeur ajoutée qu'il lui est utile de connaître pour ses études. Deux voies sont possibles qui font appel à des hypothèses peu précisées par les économistes mais qui nous semblent importantes du point de vue de l'ingénieur.

lère voie :

Intéressons-nous à la somme en colonne. Pour cela, remarquons d'abord que le prix de vente  $p_j$  d'un produit  $j$  doit permettre d'acheter, par unité physique de production de produit  $j$ , les entrées intermédiaires ainsi que de rémunérer les facteurs primaires. Soient  $p_i$  le prix d'achat des entrées intermédiaires et  $v_j$  le coût des facteurs primaires par unité physique de production de produit  $j$ . On a donc :

$$p_j = \sum_{i=1}^n a_{ij} \cdot p_i + v_j \quad (1.11)$$

puisque'il faut  $a_{ij}$  unités physiques de produit  $i$  par unité physique de production de produit  $j$ . De plus, tous les prix de vente  $p_j$  sont égaux à tous les prix d'achat  $p_i$  pour  $i = j$ . En formant les vecteurs  $p = (p_i)$  et  $v = (v_i)$ , on a en relation matricielle :

$$p = v \cdot (I - a)^{-1} \quad (1.12)$$

qui permet d'estimer l'influence d'une variation du coût des facteurs primaires (travail en particulier) sur les prix de tous les produits.

Il faut toutefois noter que les économistes utilisent, pour ce faire, la matrice inverse  $(I - A)^{-1}$ , puisqu'ils connaissent la matrice  $A$ , plutôt que la matrice inverse  $(I - a)^{-1}$ . Plus importantes pour l'instant nous semblent être les limitations imposées en écrivant l'équation (1.11). En effet, on admet ici implicitement que chaque producteur  $j$  achète le produit  $i$  au prix  $p_i$ ,  $p_i$  étant le même quel que soit l'acheteur.

Il est certain que des conditions différentes sont octroyées par les

producteurs aux différents acheteurs et il est à notre avis plus juste d'écrire la relation suivante où le prix  $p_{ij}$  dépend et du vendeur et de l'acheteur :

$$p_j = \sum_{i=1}^n a_{ij} \cdot p_{ij} + v_j \quad (1.13)$$

Le prix  $p_j$  est alors le prix de revient (coût) du produit  $j$  mais n'est pas nécessairement le prix de vente. L'équation (1.12) n'est alors plus valable.

Pour établir la somme en colonne (en valeur donc) multiplions l'équation (1.13) (ou (1.11)) par  $x_j$  :

$$p_j \cdot x_j = \sum_{i=1}^n a_{ij} \cdot p_{ij} \cdot x_j + v_j \cdot x_j$$

$$\text{ou } R_j = \sum_{i=1}^n c_{ij} \cdot p_{ij} + V_j$$

$$R_j = \sum_{i=1}^n C_{ij} + V_j$$

On retrouve donc l'équation (1.3), mais après avoir émis quelques réserves vis-à-vis de l'équation (1.12).

2ème voie :

Intéressons-nous maintenant à la somme en ligne. Supposons que chaque produit  $i$  a un prix  $p_i$ , identique quels que soient les destinations (avec les mêmes réserves que ci-dessus). On a donc :

$$X_i = p_i \cdot x_i \quad D_i = p_i \cdot x_i$$

En multipliant l'équation (1.9) par  $p_i$ , on obtient :

$$X_i = \sum_{j=1}^n a_{ij} \cdot p_i \cdot x_j + D_i$$

Le produit  $j$  ayant aussi un prix  $p_j$ , tel que  $X_j = p_j \cdot x_j$ , cette équation devient :

$$X_i = \sum_{j=1}^n a_{ij} \cdot \frac{p_i}{p_j} \cdot X_j + D_i$$

En posant  $A_{ij} = a_{ij} \cdot \frac{p_i}{p_j}$ , on retrouve l'équation (1.5), où  $A_{ij}$  est le coefficient d'entrée. Ainsi  $A_{ij}$  est dépendant des prix des produits alors que  $a_{ij}$  ne l'est pas. Si un prix relatif  $p_i/p_j$  varie, la production en valeur varie, bien que la production physique puisse rester constante. Autrement dit, les  $A_{ij}$  dépendent fortement du niveau des prix, tandis que les  $a_{ij}$  dépendent des conditions techniques auxquelles se fait la production. Il est donc d'autant plus délicat d'écrire l'équation (1.12) en employant la matrice  $A$  plutôt que la matrice  $a$ .

Conclusions :

L'introduction des prix est indiscutablement un handicap pour l'ingénieur. Par contre, pour l'économiste ils sont indispensables dans la mesure où ils lui permettent de faire ses propres analyses. Nous essaierons par la suite d'établir une connexion entre les vues de l'ingénieur et celles de l'économiste en introduisant des flux d'énergie entre les différentes activités économiques, puis le concept de contenu énergétique par unité de valeur.

- d) Nous ne saurions clore ces commentaires sans revenir à l'équation (1.2) suivante, où consommation intermédiaire et demande finale sont séparées :

$$X_i = \sum_{j=1}^n C_{ij} + D_i$$

Pour faciliter la discussion, nous raisonnerons en quantités physiques, ce qui permettra de s'affranchir du concept de prix :

$$x_i = \sum_{j=1}^n c_{ij} + d_i$$

Supposons d'abord que la demande finale ne comprenne que la consommation "finale" (donc privée). On pourrait alors imaginer d'intégrer la consommation privée dans le tableau des échanges inter-industriels. Définissons donc le tableau  $\bar{c}$  (quantités physiques), de dimension  $(n+1) \times (n+1)$ , tel que :

$$x_i = \sum_{j=1}^{n+1} \bar{c}_{ij}$$

Le travail humain (hommes-années, par exemple) serait la "production" de ce secteur supplémentaire (ligne  $\bar{c}_{n+1, j}$ ). La colonne  $\bar{c}_{i, n+1}$  représente donc la consommation en produits des consommateurs. Définissons les coefficients :

$$\bar{a}_{ij} = \frac{\bar{c}_{ij}}{x_j} \quad i, j = 1, \dots, n+1$$

Pour  $i$  et  $j$  variant de 1 à  $n$ , les  $\bar{a}_{ij}$  sont égaux aux coefficients techniques  $a_{ij}$ . Pour  $i = n+1$ , les  $\bar{a}_{n+1, j}$  sont aussi assimilés à des coefficients techniques : ils représentent la quantité de travail nécessaire à la production.

Par contre, pour  $j = n+1$ , les  $\bar{a}_{i, n+1}$ , qui indiquent la consommation en produits  $i$  pour satisfaire une unité de travail, ne sont plus des coefficients techniques qui dépendent des conditions techniques de la production : ils dépendent fortement des décisions et des choix des consommateurs, c'est-à-dire de la manière dont ils dépensent leurs revenus. Ce sont donc des éléments très variables, qui varient certainement beaucoup plus rapidement que les conditions techniques de la production et qui font donc appel à des données exogènes au modèle (comportements des consommateurs). Nous nous garderons dans cette étude d'étudier les comportements des consommateurs. On comprendra donc que la consommation privée soit séparée des échanges inter-industriels. C'est pour cette raison que les économistes la considèrent généralement exogène au tableau des échanges inter-industriels. En conséquence le travail fait partie de la valeur ajoutée et est aussi externe au tableau. Celui-ci est alors de dimension  $n \times n$ .

Pourtant, dans un deuxième stade, il nous faut introduire la formation de capital qui fait aussi partie de la demande finale (négligeons variations de stocks et exportations). Or nous avons vu que consommation et formation de capital étaient liées entre elles (fig. 1.2). Les deux ne peuvent en fait pas être exogènes au modèle indépendamment l'une de l'autre. Nous étendrons au chapitre 3 le modèle pour rendre la consommation dépendante de la formation de capital, celle-ci étant seule exogène et induisant la consommation. Ainsi, on écrira (en valeur, avec tous les risques que cela comporte):

$$X_i = \sum_{j=1}^n F_{ij} + N_i$$

où les  $F_{ij}$  sont les éléments d'un tableau  $F$  de dimension  $n \times n$  qui combine à la fois le tableau des échanges inter-industriels et la consommation privée, et les  $N_i$  représentent les investissements dans le secteur  $i$ . Ce sont eux que la production totale cherche donc maintenant à satisfaire, puis par leur intermédiaire, la consommation.

### 1.1.3 Elasticités : définitions

Le concept d'élasticité est abondamment employé par les économistes. Nous rappellerons ici la définition de diverses élasticités. Nous aurons par la suite l'occasion d'utiliser ce concept.

L'élasticité est définie comme le rapport tendant à la limite de la variation relative d'une variable à la variation relative d'une autre variable :

$$\epsilon = \frac{du}{u} \bigg/ \frac{dv}{v} = \frac{d(\log u)}{d(\log v)}$$

Exemples d'élasticités :

- Soient  $u$  la demande d'un produit et  $v$  le prix de ce produit. L'élasticité de la demande de ce produit par rapport à son prix indiquera la variation (en %) de la quantité demandée face à une variation (en %) du prix. En d'autres termes, à une variation de 1 % du prix

correspond une variation de  $\epsilon$  % de la demande.

- La variation de la demande peut être mesurée par rapport à une variation du revenu du demandeur et non plus par rapport au prix du produit : à une variation de 1 % du revenu correspond une variation de  $\epsilon$  % de la demande.  $\epsilon$  est alors l'élasticité de la demande par rapport au revenu.
- Ces élasticités peuvent de même être évaluées pour l'offre, au lieu de la demande, et par rapport au prix.
- Les élasticités de la demande (ou de l'offre) d'un produit par rapport au prix de ce produit sont dites directes. On peut très bien imaginer que la demande d'un produit varie quand le prix d'un autre produit varie. On parle alors d'élasticité croisée. Par exemple, à une variation du prix d'un produit  $i$ , correspond une variation de  $\epsilon_{ij}$  % de la demande du produit  $j$ .
- Suivant les valeurs de  $\epsilon$ , négatives (par exemple demande par rapport au prix) ou positives (par exemple offre par rapport au prix), l'offre ou la demande sont dites :
  - élastiques si  $|\epsilon| > 1$
  - d'élasticité-unité si  $|\epsilon| = 1$
  - inélastiques si  $|\epsilon| < 1$
- $u$  et  $v$  peuvent être des facteurs primaires, le capital et le travail humain par exemple. On parle alors d'élasticité de substitution. Si celle-ci est nulle, il n'y a pas de substitution possible. Capital et travail humain sont alors complémentaires.

#### 1.1.4 Fonctions de production

Il nous faut revenir sur les fonctions de production que nous avons mentionnées auparavant. Ces fonctions ressortent du domaine de l'ingénieur quand il s'agit d'exprimer une production en fonction de paramètres techniques grâce à des lois physiques et sont distinctes des fonctions de valeur de

la production que l'économiste emploie plutôt. Nous verrons alors les limitations de ces fonctions dans la méthode Entrées - Sorties.

(i) Notations

Nous dérogerons aux notations définies au §1.1.2 afin de conserver encore certaines des notations des économistes. Ainsi, alors que nous avons dit que les quantités physiques s'exprimeraient par des lettres minuscules, nous ferons une exception pour les facteurs primaires, qui suivant l'usage seront notées par des lettres majuscules. Cela peut poser un problème si l'on désire avoir ces facteurs primaires en valeur. Pour notre part, nous n'aurons pas besoin dans la suite de cette étude de connaître la valeur de ces facteurs primaires, si ce n'est pour le capital. Il faut remarquer que pour ce dernier, les économistes considèrent que sa valeur est représentative de sa "quantité physique"<sup>1/</sup>. Nous tenterons d'être plus précis sur ce point aux chapitres suivants en donnant un "aspect plus physique" au capital en l'évaluant en termes d'énergie (joules). Ainsi :

- K est la quantité physique de capital pour les économistes, égale à sa valeur. Pour nous, K représentera simplement la valeur du capital.
- L est la quantité physique de travail humain (hommes-années par exemple).

Nous définirons aussi (et bien que les économistes ne les considèrent que rarement dans les fonctions de production) :

- E, quantité physique d'énergie (pouvoir calorifique de tonnes de charbon,... ou joules),
- M, quantité physique de matière (tonnes de minerais,...).

(ii) Remarques liminaires

La fonction de production apparaît d'abord comme une description des conditions techniques de la production. A ce titre, c'est l'ingénieur

---

1/ il ne serait en effet pas suffisant de dire que le capital est constitué d'un certain nombre d'usines, de machines,... qui n'ont pas la même fonction et qui présentent des capacités de production différentes.



qui la définit car il possède une bonne information sur les éléments techniques et les lois physiques qui doivent entrer en ligne de compte. Divers critères interviennent ensuite pour fixer les paramètres qui préparent au dimensionnement final des installations. Un de ces critères (mais pas nécessairement le seul) peut être de minimiser le coût de production de l'unité produite. On forme alors la fonction de coût de production qui est une fonction des paramètres techniques et des coûts unitaires de tous les composants.

La fonction de production de l'économiste n'a pas la même forme que celle de l'ingénieur. Elle s'écrit traditionnellement :

$$Y = f(K,L)$$

où Y représente la "production". Trois remarques importantes doivent être faites.

- Si Y est exprimé en quantité physique (par exemple, tonne d'acier), ce que voudrait, au sens strict, la fonction de production, il faudrait écrire  $y = f(K,L)$ .
- Cette dernière relation ne peut plus être écrite si l'on considère un ensemble, où différents produits sont fabriqués. Une uniformisation est possible en introduisant, souvent de manière indirecte dans le cas de fonctions de production non-linéaires, les coûts des facteurs primaires et des entrées intermédiaires. On a alors bien des fonctions du type  $Y = f(K,L)$  mais qui devraient plutôt être appelées fonctions de valeur de la production dans la mesure où les prix interviennent.
- Dans la fonction  $Y = f(K,L)$ , Y représente souvent pour les économistes le PIB (valeur) de l'ensemble considéré. Ce n'est donc pas la valeur de la production totale, puisque les autres facteurs primaires sont négligés. Il faudrait donc écrire  $X = f(K,L,E,M)$ , ou, pour un produit mesuré en quantité physique,  $x = f(K,L,E,M)$ . C'est finalement ce que l'on fait dans les fonctions de production du modèle Entrées - Sorties, où toutefois E, M sont les

entrées intermédiaires (énergie, et biens et services intermédiaires). Nous reviendrons sur ce point au paragraphe 1.3.2.

(iii) Fonctions de production du modèle Entrées-Sorties

La production totale doit considérer toutes les fournitures. Pour une industrie  $j$ , la production totale  $x_j$  du produit  $j$  s'exprime en quantité par :

$$x_j = f(K_j, L_j, x_{1j}, \dots, x_{ij}, \dots, x_{nj})$$

où les  $x_{ij}$  sont les entrées intermédiaires de produits  $i$  délivrés pour la production de  $j$ .

Définissons les coefficients techniques primaires (ou coefficients techniques de Walras - voir R. Dorfman, P.A. Samuelson, R.M. Solow, 1958) :

$$a_{Kj} = \frac{K_j}{x_j} \quad \text{et} \quad a_{Lj} = \frac{L_j}{x_j}$$

Dans le modèle Entrées-Sorties, il faut, pour produire une quantité unitaire de produit  $j$ , au moins une quantité  $a_{Kj}$  de capital, au moins une quantité  $a_{Lj}$  de travailleurs, au moins une quantité  $a_{ij}$  de produits  $i$ , tels que :

$$K_j = a_{Kj} \cdot x_j$$

$$L_j = a_{Lj} \cdot x_j$$

$$x_{ij} = a_{ij} \cdot x_j \quad \text{pour tout } i$$

La fonction de production est alors :

$$x_j = \text{Min} \left( \frac{K_j}{a_{Kj}}, \frac{L_j}{a_{Lj}}, \dots, \frac{x_{ij}}{a_{ij}}, \dots \right),$$

le plus petit des chiffres de la parenthèse déterminant le volume de la production. On peut faire quatre remarques :

- a) L'hypothèse fondamentale du modèle Entrées-Sorties est la suivante : les quantités fournies (capital, travail, entrées intermédiaires) sont proportionnelles à la quantité produite, ceci dans des proportions fixes. La fonction de production est dite fonction de production à coefficients constants. Cela implique qu'il n'y a pas de possibilité de substitution entre les quantités nécessaires à la production : les élasticités de substitution sont nulles. En particulier, l'élasticité de substitution capital-travail est nulle.
- b) Il n'y a pas de facteur d'échelle sur les quantités. Si la production double, les entrées intermédiaires et les facteurs primaires (capital-travail) doublent aussi puisqu'il n'y a ni substitution possible ni facteur d'échelle.
- c) En valeur, la fonction de production s'écrit (équ. (1.3)) :

$$X_j = \sum_{i=1}^n A_{ij} \cdot X_j + V_j$$

les termes  $A_{ij} \cdot X_j = C_{ij}$  mesurant la valeur des entrées intermédiaires, et les termes  $V_j$  mesurant la valeur des facteurs primaires. Cette relation est donc linéaire.

- d) Tout se résume finalement à l'invariance des coefficients techniques, puis des coefficients d'entrée quand les prix interviennent. Ceux-ci peuvent varier d'une année à l'autre. Aussi, les coefficients techniques sont-ils plus stables car ils ne dépendent que des conditions techniques de production, donc des procédés de fabrication. Quand le progrès technique est lent, et seulement dans ce cas, on peut faire l'hypothèse qu'ils restent constants.
- (iv) Les hypothèses à la base du modèle Entrées - Sorties (constance des coefficients techniques, linéarité, non-substitution) sont donc restrictives et limitent l'intérêt du modèle si l'on désire l'utiliser à des fins de prévision économique à moyen et long terme. En effet, les conditions techniques de la production peuvent changer de manière importante et les résultats du modèle être faussés. Il n'en reste

pas moins qu'il est tentant de se servir du modèle Entrées-Sorties car toutes les opérations intervenant entre les agents économiques y sont comptées et désagrégées. Ainsi, le modèle peut être employé pour deux sortes d'études :

- une étude explicative des relations inter-industrielles, de la production et de la consommation pendant la période de temps pour laquelle le tableau a été construit. C'est dans ce sens que nous utiliserons le modèle Entrées - Sorties dans le chapitre 4, afin d'expliquer certaines relations entre grandeurs énergétiques et grandeurs économiques, reflétant la situation d'un pays à un temps donné;
- une étude prospective à court terme à partir de scénarios économiques dans lesquels des hypothèses sont faites par exemple sur la croissance de la demande finale, sur une modification de sa structure, sur une augmentation des prix d'un produit (pétrole), sur une diminution des impôts,.... On peut alors estimer les répercussions mécaniques à court terme sur les importations, la valeur ajoutée, les importations,...., sous une forme désagrégée et fort utile pour les responsables de la politique économique.

Par ailleurs, il nous faut insister sur le fait que le modèle Entrées - Sorties tel que nous l'avons présenté est un modèle statique et non dynamique. Nous ne développerons pas le problème de la dynamique du modèle, notre but étant de l'utiliser à des fins explicatives et non prospectives. Néanmoins, il faut mentionner deux extensions dynamiques du modèle :

- le modèle Leontief dynamique (W. Leontief, 1970) où l'on introduit la nécessité d'avoir produit des biens d'équipement dans une période antérieure à la période envisagée de telle manière que les secteurs d'activité aient une capacité suffisante pour satisfaire à la demande de la période envisagée;
- les modèles où les coefficients techniques eux-mêmes sont dynamisés. On les traite alors de manière endogène par l'adjonction d'autres modèles de type économétrique (E.A. Hudson, D.W. Jorgenson (1976) qui emploient des fonctions non-linéaires intégrant l'énergie et les biens intermédiaires :  $X = f(K, L, E, M)$ ) ou de type technique (B. Fritsch, R. Codoni, B. Saugy (1980), qui introduisent des réseaux de flux traités par des algorithmes d'ordre technique).

## 1.2 SYSTEME ENERGETIQUE : DEFINITIONS ET QUESTIONS

Ce paragraphe sera centré sur la définition et le rappel de quelques termes employés en économie de l'énergie. Nous aborderons d'autre part les problèmes que soulèvent ces définitions, à propos de l'énergie primaire, de l'énergie distribuée et de l'énergie utile.

### 1.2.1 Définitions de termes énergétiques

- (i) L'énergie, au niveau primaire, se trouve sous deux principales formes :
- en tant que stocks dans la Terre (ressources non renouvelables à l'échelle humaine), en quantité limitée,
  - en tant que flux (énergie renouvelable) qui existent de façon quasi-permanente.
- (ii) Les uns et les autres forment l'énergie primaire. L'énergie primaire, une fois extraite et s'il y a lieu concentrée, est transformée sous forme d'énergie intermédiaire. Celle-ci est ensuite transportée et distribuée aux différents consommateurs : on parlera d'énergie distribuée. L'énergie qu'en retirent les consommateurs pour satisfaire leurs besoins est l'énergie utile. Celle-ci doit avoir la forme désirée par le consommateur.
- (iii) Pour passer de l'énergie primaire à l'énergie utile, des aménagements ou installations énergétiques<sup>1/</sup> sont nécessaires : aménagements de production<sup>2/</sup> (de conversion) d'énergie, de distribution, de stockage ou d'utilisation.

---

1/ on emploie souvent le terme de technologie pour désigner un aménagement, une installation ou un appareil. C'est un abus de langage.

2/ à strictement parler, et suivant le premier principe de la thermodynamique, on ne produit (ni ne consomme) de l'énergie : on la transforme, on la convertit, on l'utilise. On conservera néanmoins les termes de production et de consommation qui sont à mettre sur le même plan que l'offre et la demande d'énergie.

- (iv) Chaque forme d'énergie est scindée en agents ou vecteurs énergétiques. Par exemple :
- pour l'énergie primaire : gaz, pétrole brut, charbon, uranium, énergie solaire, énergie hydraulique ...
  - pour l'énergie distribuée : chaleur, produits pétroliers, électricité, gaz divers
  - pour l'énergie utile : travail mécanique, chaleur, lumière, énergie intégrée au potentiel chimique.
- (v) A chaque niveau existent des pertes d'énergie : pertes à l'extraction, à la conversion, à la distribution, à l'utilisation.
- (vi) Il s'établit donc un flux unidirectionnel d'énergie de la production à la consommation (utilisation). Il est dissipatif puisqu'ont lieu des pertes d'énergie. Suivant le premier principe de la thermodynamique, appliqué entre la production et l'utilisation, on a (pour autant qu'il n'y ait pas de variations de stocks d'énergie intermédiaire) :

$$\text{Energie primaire} = \text{Energie utile} + \text{Somme des pertes}$$

- (vii) Etant admis qu'il est possible d'établir une équivalence énergétique entre divers agents énergétiques (m<sup>3</sup> de gaz, tonnes de pétrole, kWh électriques), le bilan énergétique d'un ensemble peut être effectué. L'unité commune est par exemple le joule (unité S.I.), ou le joule/an (puissance) si l'année est l'intervalle de temps considéré. Ces bilans énergétiques peuvent être représentés sous forme de flux d'énergie (fig. 1.6). Il faut bien entendu tenir compte des importations et des exportations d'énergie dans l'ensemble. Les sources d'énergie<sup>1/</sup> d'un ensemble seront alors définies comme étant la somme de l'énergie primaire extraite à l'intérieur du système et des importations d'énergie (qui ne sont pas nécessairement sous forme primaire).

---

1/ qu'on ne confondra donc pas avec les ressources énergétiques ou les réserves d'énergie qui ont une autre signification en économie de l'énergie.

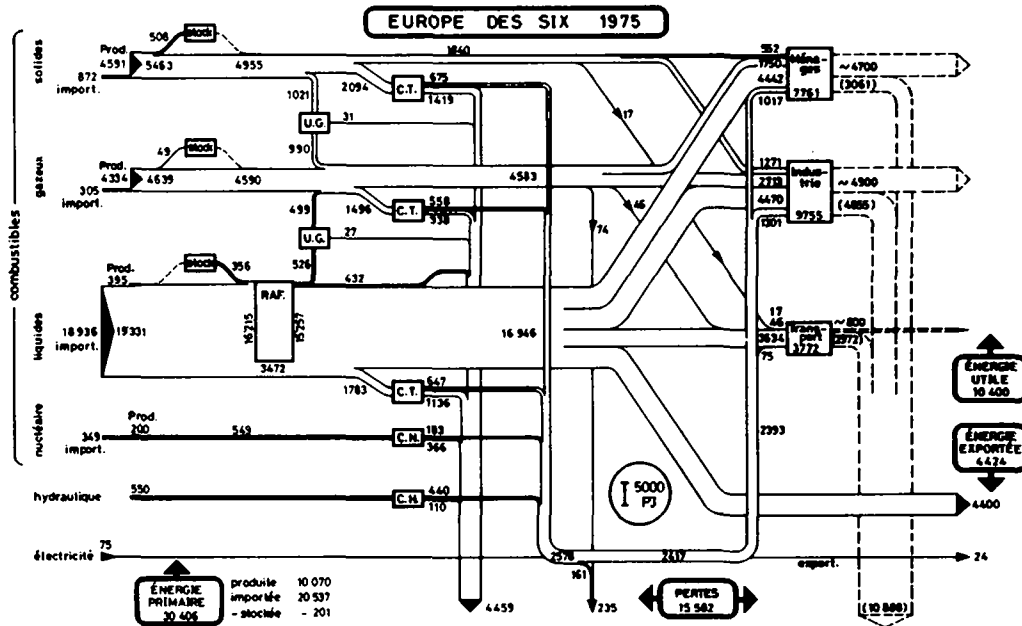


Fig. 1.6 Flux d'énergie dans l'Europe des Six en PJ, 1975.  
(source : A. Gardel, 1979, p.197)

### 1.2.2 Questions relatives à l'énergie primaire, à l'énergie intermédiaire et à l'énergie utile

Les différents agents énergétiques qui composent l'énergie primaire, à l'amont des flux énergétiques, et l'énergie utile à l'aval, peuvent être agrégés pour autant qu'ils soient comparables. Le rapport des deux, défini par

$$\text{rendement énergétique global} = \frac{\text{énergie utile}}{\text{énergie primaire}}$$

(ou efficacité globale du système énergétique)

donne une estimation de l'importance des pertes. Pourtant l'établissement de ce rendement est délicat pour des raisons qui ont trait aux définitions de l'énergie primaire et de l'énergie utile. Dans tous les cas, nous renvoyons le lecteur pour plus de précisions aux travaux de A. Gardel (1979).

(i) Energie primaire

Il est difficile de comparer un flux solaire, une livre d'uranium, une tonne de lignite, etc..., c'est-à-dire les différents agents énergétiques qui composent l'énergie primaire. Généralement, et ainsi qu'on le fait dans les statistiques, l'énergie primaire est évaluée de trois manières<sup>1/</sup>:

- pour les combustibles fossiles, elle est prise égale à leur pouvoir calorifique,
- pour l'hydraulique, le nucléaire, la géothermie générant de l'électricité, l'énergie primaire est souvent prise égale à l'énergie électrique que l'on en tire (nous reviendrons sur ce point à propos de l'énergie intermédiaire),
- pour le solaire, l'énergie primaire est admise égale à la chaleur captée.

Ces manières de faire ne sont pas satisfaisantes : de l'énergie est perdue à l'extraction (par exemple pour le pétrole : coût énergétique de l'extraction), à la concentration (il n'est pas possible d'utiliser la totalité de la surface occupée par une installation solaire) et des possibilités énergétiques sont abandonnées (gisements non exploités totalement). Bien qu'ayant montré que l'énergie primaire ne pouvait être définie à priori (pour des questions de niveaux énergétiques de référence), A. Gardel propose une comptabilité de l'énergie primaire qui permette de comparer les différents agents énergétiques et qui tienne compte de l'énergie perdue à l'extraction ou aux transformations (pour l'uranium, l'énergie primaire dépend du type de réacteurs et du mode d'enrichissement). L'énergie primaire est alors égale à l'exergie primaire (sauf pour l'hydraulique où elle est égale à l'énergie totale accessible). Il s'ensuit que dans les comptabilités usuelles (statistiques), l'énergie primaire :

- des combustibles fossiles est surestimée d'un facteur d'environ 1,4,

---

1/ nous ne parlons pas d'autres sources énergétiques comme l'énergie géothermique utilisée à des fins calorifiques, l'énergie solaire générant de l'électricité, l'énergie éolienne, l'énergie marémotrice, etc... du fait de leur part négligeable à l'heure actuelle dans les bilans énergétiques.



- de l'énergie hydraulique est sous-estimée d'un facteur 2 à 3,
- de l'énergie nucléaire est sous-estimée d'un facteur 2,
- de l'énergie solaire est sous-estimée d'un facteur 1,5 à 2,5.

(ii) Energie intermédiaire

L'énergie intermédiaire qui se situe entre l'énergie primaire et l'énergie utile se présente sous forme d'agents énergétiques divers, qui sont ici aussi difficiles à comparer. Nous centrerons cet alinéa sur la question de l'équivalent calorifique de l'électricité qui est représentative des difficultés que l'on rencontre. Nous ferons quatre observations sur les conceptions qui prédominent.

- Certains auteurs (J.R. Frisch et J. Lacoste, 1978; P. Ailleret, 1979; Y. Mainguy, 1979) établissent un équivalent thermique du kWh électrique en valorisant l'électricité qui peut être utilisée de façon plus performante que la chaleur : c'est le cas du travail mécanique. Cette valorisation se fait sur la base de la quantité de combustibles nécessaires à la production de 1 kWh<sub>e</sub>. Le rendement des centrales thermiques étant de l'ordre de 0,40, 1 kWh<sub>e</sub> correspond donc à environ 9000 kJ (facteur de valorisation : 2,5).
- Toutefois, comme le note A. Gardel (p. 201 et s.), ce n'est qu'au niveau de l'énergie utile que le rôle d'une énergie primaire doit être évaluée. En effet, seule une partie de l'électricité est utilisée à la production de travail mécanique, le reste étant employé à la production de chaleur, qui ne met pas en valeur la haute qualité de l'électricité. On est ainsi conduit à un facteur de valorisation d'environ 1,5 (1 kWh<sub>e</sub> = 5400 kJ), dans les pays industrialisés qui ont une structure du système énergétique relativement semblable.
- Il n'en reste pas moins que dans la représentation globale des flux d'énergie, de la production à l'utilisation, il est délicat de valoriser l'électricité, ce qui conduit à sous-estimer les pertes en particulier lors de la transformation de combustibles en électricité. Ainsi, dans une centrale thermique, les pertes énergétiques seraient considérées comme nulles si le facteur de valorisation de

l'électricité valait 2,5. Si le facteur de valorisation était de 1,5, les pertes ne représenteraient que 67 % des pertes réelles. Or, ainsi que le note P. Romain (1977<sup>a</sup>, 1977<sup>b</sup>), ce serait contraire au premier principe de la thermodynamique : il doit y avoir conservation de l'énergie. Il faut alors prendre tout simplement le kWh électrique à son équivalent calorifique : 1 kWh = 3600 kJ. Il faut bien comprendre que cette équivalence vaut pour l'établissement de bilans ou de flux énergétiques et ne préjuge en rien de l'utilisation que l'on fera de tel ou tel agent énergétique. Nous verrons au chapitre 3 et à l'annexe A qu'il y a intérêt à raisonner en termes de pertes d'énergie, pour la construction de tables de dissipation de l'énergie qui soient compatibles avec la structure des tables Entrées-Sorties. On respectera donc le principe de conservation de l'énergie.

- Finalement, sur le plan énergétique, le seul moyen de faire une comparaison des agents énergétiques, à quelque niveau qu'ils se trouvent, ou des chaînes énergétiques est de raisonner de la même manière que pour l'énergie primaire, c'est-à-dire en termes exergétiques (voir les travaux de A. Gardel). On peut ainsi mettre en évidence le travail qu'un certain agent énergétique est susceptible de fournir par rapport à une référence. L'électricité est alors valorisée par rapport à la chaleur. Il faut noter que l'on peut établir des bilans ou flux exergétiques, de la production à l'utilisation, la localisation des pertes exergétiques permettant d'étudier les moyens de lutte contre ces pertes.

(iii) Energie utile

L'énergie utile est généralement estimée à partir de l'énergie distribuée en connaissant l'efficacité (rendement énergétique) des appareils d'utilisation. Il est communément admis que l'énergie utile est l'énergie qui, sous la forme désirée, satisfait les besoins des consommateurs. Mais, une fois ces besoins satisfaits, une grande partie de l'énergie utile se dissipe sous forme de chaleur. Presque toute l'énergie primaire est donc finalement transformée en chaleur. La part qui ne l'est pas correspond par exemple à l'énergie (suivant

les termes de A. Gardel, 1979, p. 98) :

- non dégagée par non utilisation complète d'un combustible, par exemple : imbrûlés dans une chaufferie ou un moteur thermique, ou matière fissile comptabilisée dans l'énergie primaire mais non consommée,
- investie dans la fabrication de matériaux recourant à des réactions endothermiques ou mobilisant de l'énergie,
- investie dans des constructions sous forme d'énergie potentielle (de situation ou autre),
- rayonnée sous une forme non retenue (neutrinos, rayonnement s'échappant hors de l'atmosphère).

Nous nous intéresserons ici aux points 2 et 3 ci-dessus, c'est-à-dire à l'énergie investie, en donnant quelques exemples pour des consommateurs différents.

- Soit le cas d'un producteur de lingots d'acier qui pour produire a besoin de fer, de carbone et d'énergie pour la fusion. Bien que des pertes d'énergie ont inévitablement lieu lors du processus, les lingots une fois produits sont certes de la matière mais présentent aussi un contenu en énergie. L'énergie utile du processus sera alors contenue dans le lingot formé, une fois déduites les pertes dues à l'imperfection des installations.
- Imaginons la construction d'un barrage à accumulation en altitude. En plus de toute l'énergie investie dans la fabrication des matériaux (ciment, acier,...), il faut ajouter l'énergie nécessaire à l'acheminement de ces matériaux à l'altitude du lieu de construction, à l'assemblage, etc... Cette énergie est aussi investie dans le barrage et fait donc partie de l'énergie utile.
- En reprenant le cas des lingots d'acier, il faut ajouter que ceux-ci seront vendus à d'autres producteurs qui les transformeront, à l'aide d'autres produits possédant eux-mêmes un contenu énergétique, puis revendront les produits fabriqués etc... jusqu'à devenir des produits de consommation courante (par exemple ciseaux) ou des produits d'équipement (par exemple poutrelles métalliques) présentant un contenu énergétique. A chaque stade de ces opérations, il y aura des pertes d'énergie.

- Les produits de consommation courante seront achetés par les consommateurs privés qui acquièrent une certaine quantité d'énergie indirecte, ou énergie utile contenue dans les produits.

Mais les consommateurs sont producteurs, puisqu'ils offrent leur travail. Ce travail humain a aussi un contenu énergétique.

- Au premier abord, on peut dire que le contenu énergétique du travail est égal à l'énergie nécessaire au fonctionnement de la machine humaine, donc environ à 2400 kcal/jour. Cette énergie est dispensée par les aliments.
- Ceci n'est guère satisfaisant si l'on pense, conformément à ce qui se passe pour chaque produit, qu'il a fallu ajouter de l'énergie pour produire, transformer, distribuer les aliments. Ainsi, l'énergie investie dans la nourriture est supérieure à sa valeur calorifique : il y a un déficit énergétique par rapport à la calorie dans l'assiette du consommateur ainsi que plusieurs auteurs l'ont relevé (R. Ferrando et F. Schaller, 1976; D. et M. Pimentel, 1979).
- C'est en partie <sup>1/</sup> avec la rémunération de son travail que le consommateur peut acheter des produits. Ceux-ci présentant un contenu énergétique, l'énergie investie dans le travail humain sera finalement égale à l'énergie investie dans les produits achetés par le consommateur une fois les pertes énergétiques à l'utilisation déduites. Ces produits sont des biens et services mais aussi de l'énergie directe (pour le chauffage, le transport, la cuisson..) qu'il utilisera, avec certaines pertes. La figure 1.7 représente le bilan énergétique d'un consommateur privé.

Dans cette approche, l'énergie investie dans la consommation physique de produits rétribue donc physiquement en énergie le travail humain, aux pertes à l'utilisation près.

---

*1/ on fait abstraction des rentes et des intérêts que peut percevoir un consommateur.*

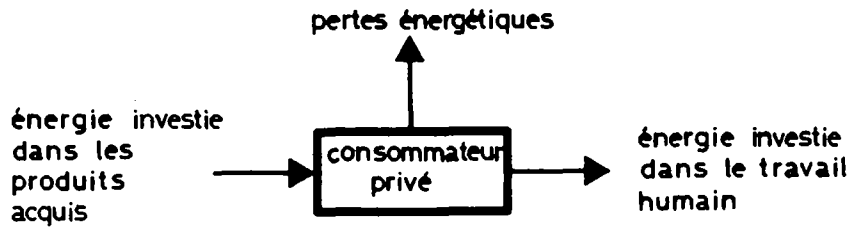


Fig. 1.7 Bilan énergétique d'un consommateur privé.

- Cette énergie contenue dans le travail humain doit alors être intégrée dans l'énergie contenue dans les produits puisqu'il a fallu du travail pour produire des derniers. Reprenant le cas du barrage, l'énergie investie comprend l'énergie investie dans les matériaux, leur acheminement jusqu'au site, leur assemblage et aussi l'énergie nécessaire au transport des ouvriers, à leur logement ainsi que l'énergie investie dans les produits qu'ils consomment. On revient donc au point de départ, à ceci près que tout au long du cycle, des pertes d'énergie ont lieu et qu'il est nécessaire de fournir continuellement de l'énergie et de la matière<sup>1/</sup> (fig. 1.8).

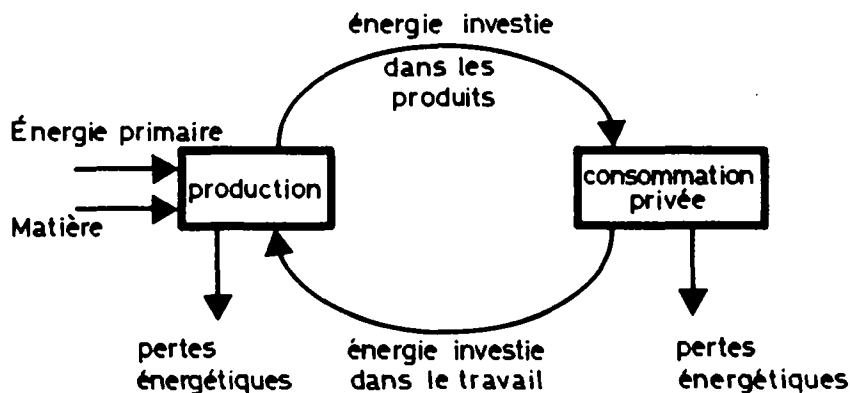


Fig. 1.8 Échanges d'énergie dans le cycle économique.

---

1/ l'idée d'associer de l'énergie au travail humain a été émise par certains ingénieurs (R.L. Tummala et L.J. Connor, 1973; H.E. Koenig et R.L. Tummala, 1972; H. Hirata et T. Fukao, 1978). Il est intéressant de noter en outre que, pour ces auteurs, le travail humain doit être placé dans la catégorie des "ressources" non renouvelables, au même titre que les autres formes d'énergie (y compris le flux solaire) : le critère devient le recyclage. Ainsi une journée de travail humain, une journée de radiation solaire ou une joule d'énergie sont en fait de type non renouvelable puisqu'ils ne sont pas recyclables. Par contre, la matière (les biens) est une ressource renouvelable, puisqu'on peut en principe la recycler.

- Il faut en outre fournir du capital pour la formation duquel de l'énergie a dû être investie, puisqu'il se manifeste sous la forme de constructions, de biens d'équipement (on parlera pour cette raison de capital physique), qui ont eux-mêmes demandé de l'énergie pour leur production. Ce capital physique intervient à tout niveau du système économique.

Comme on l'a vu à la figure 1.2, il est lié au travail humain et à la consommation puisque le travail est nécessaire pour la formation de capital et que la consommation en dépend. Il est aussi lié aux activités de production (fig. 1.3) : la production dépend du capital physique existant et une part de la production est consacrée à la formation de capital physique. Dans ce cadre, il est très complexe de définir l'énergie utile vis-à-vis du système économique global puisque toutes les opérations qui interviennent sont liées et dépendent les unes des autres.

- Nous résolverons ce problème en remarquant que le capital physique constitue un stock (par opposition aux flux, qui alimentent et épuisent les stocks). Ce capital physique a un contenu énergétique au sens économique (il a fallu de l'énergie pour le créer). Nous définirons alors l'énergie utile comme l'énergie investie dans le capital physique. Pendant une certaine période de temps, l'énergie utile sera donc l'énergie investie dans le capital physique formé durant cette période de temps. Nous étudierons et développerons cette analyse au paragraphe 1.3 et au chapitre 2.

### 1.3 LIAISONS ENERGIE-ECONOMIE

Nous possédons maintenant tous les éléments de base pour entreprendre l'étude des liens qui existent entre une approche économique et une approche énergétique des activités qui composent le système économique. Nous commencerons par rappeler un fait établi de manière empirique, la corrélation entre la consommation d'énergie primaire et le produit intérieur brut, qui montre que l'énergie est un facteur essentiel des fonctions de production. Ensuite, dans le cadre d'une approche générale, nous étudierons le système économique du point de vue de l'ingénieur : nous analyserons les flux d'énergie associés aux différentes activités qui composent le processus économique. Nous tiendrons compte de la production et de la consommation mais aussi du travail humain et de la formation de capital physique. A la formation de capital physique est associé un flux d'énergie. Nous définirons l'énergie utile comme étant l'énergie investie dans la formation de capital physique pendant une certaine période de temps. Ainsi, le processus économique apparaîtra comme une chaîne énergétique, de l'énergie primaire à l'énergie utile, où toutes les pertes énergétiques interviennent, et où toutes les activités du cycle économique des économistes sont considérées.

Nous représenterons le processus économique sous forme d'un tableau qui se révélera être analogue aux tableaux Entrées-Sorties des économistes. Nous introduirons le concept de contenu énergétique par unité de valeur, qui fait le lien entre les approches de l'ingénieur et de l'économiste. Finalement, nous effectuerons toute une série d'hypothèses et de simplifications qui nous permettront de retrouver d'autres modèles élaborés.

#### 1.3.1 Relation "consommation d'énergie - PIB"

Nous résumerons très brièvement quelques résultats importants des travaux de A. Gardel (1979) à propos de la relation entre la consommation d'énergie primaire  $E$  et le produit intérieur brut  $Y$  (ou le revenu national). Les observations statistiques, faites sur quelques dizaines d'années et pour une centaine de pays, montrent qu'il y a une corrélation entre la consommation d'énergie  $E$  et le PIB (que l'on admettra être une mesure du standard de vie). Cette corrélation débouche sur des relations de la forme :

$$Y = \alpha \cdot E^\beta \quad (\beta > 0) \quad (1.14)$$

et amène les commentaires suivants :

- la corrélation est valable pour caractériser tant les situations de divers pays à un temps T que l'évolution au cours du temps de la situation d'un même pays. Ainsi :
  - à un temps T, les pays à moindre PIB consommeront moins d'énergie primaire,
  - au fur et à mesure que le PIB d'un pays augmente au cours du temps, la consommation d'énergie primaire augmente;
- la qualité des paramètres intervenant dans la corrélation dépend :
  - à un temps T, des rapports monétaires entre les monnaies des divers pays qui ne sont pas toujours représentatifs de la situation économique de chaque pays,
  - à un temps T, des types d'économie qui peuvent être à dominante agricole, en voie d'industrialisation, à dominante industrialisée ou qui peuvent posséder des richesses naturelles procurant un revenu très élevé (pétrole),
  - pour un pays, de la difficulté de déterminer la valeur réelle de sa monnaie au cours du temps;
- $\alpha$  est l' " indice de la productivité économique par rapport aux besoins énergétiques " (A. Gardel, p. 37). Ce paramètre se mesure en unité monétaire par unité d'énergie. Les observations statistiques montrent que  $\alpha$  est environ égal à 30 (US\$ 1975)/GJ;
- $\beta$  est l'inverse de l'élasticité de la consommation d'énergie par rapport au PIB : à 1 % d'augmentation de la consommation d'énergie correspond  $1/\beta$  % d'accroissement du PIB. En considérant un grand nombre de pays, il paraît difficile de s'écarter d'une élasticité de 1 (donc  $\beta = 1$ ), ce qui revient à dire que consommation d'énergie et PIB varient de manière proportionnelle. En d'autres termes, la croissance économique est fortement tributaire de la consommation d'énergie primaire. La valeur de  $\beta$  peut certes varier d'un pays à l'autre ou d'une année à l'autre, ce qui n'infirme pas toutefois une valeur moyenne de  $\beta$  égale à 1;



- certains auteurs (voir par exemple J. Girod, 1977) écrivent plutôt une relation du type  $E = \alpha Y^\beta$ , bien sûr équivalente à l'équation (1.14), mais qui indique quelle est la quantité d'énergie nécessaire pour satisfaire un PIB donné. Or, l'énergie étant un facteur primaire indispensable, c'est sa quantité qui détermine le PIB qu'il est possible d'atteindre. L'équation (1.14) est donc une fonction de production,  $Y = g(E)$ , à première vue simplifiée puisque n'interviennent pas les autres facteurs primaires.

### 1.3.2 Fonctions KLEM et modèle Entrées-Sorties

- (i) Les économistes ont récemment élargi les fonctions de production  $Y = f(K,L)$  en introduisant l'énergie  $E$  et la matière  $M$  pour former les fonctions du type  $Y = f(K,L,E,M)$ . Faisons quelques remarques :
  - Rappelons que  $Y$  désigne la valeur du PIB. Il est préférable d'écrire  $X = f(K,L,E,M)$  où  $X$  est la valeur de la production totale (donc PIB plus entrées intermédiaires). Cela permettra, comme nous le verrons, une liaison claire avec le modèle Entrées-Sorties.
  - On raisonne en valeur quand il n'y a pas uniformité des produits (par exemple à l'échelle d'un ensemble). Par contre pour un producteur d'un produit, il est préférable de raisonner en quantités physiques (voir §1.1.4).
  - Ces fonctions sont non-linéaires et il est possible d'estimer, en introduisant de manière empirique les élasticités, dans quelle mesure énergie et travail, énergie et capital, travail et capital, etc sont substituables ou complémentaires (voir E.R. Berndt et D.W. Wood 1974; W.D. Nordhaus, 1975; E.A. Hudson et D.W. Jorgenson, 1976; E.R. Berndt, 1978).
- (ii) Il faut se demander ce que représente la matière  $M$ . Pour le système économique dans sa globalité, ce sont les matières premières qui constituent un ensemble de facteurs primaires. Ainsi, le minerais de fer et le charbon sont des matières premières pour la fabrication de lingots d'acier. Ces lingots d'acier sont aussi de la matière mais de la matière première transformée (avec conservation de

la masse). C'est cette matière que les économistes considèrent puisqu'ils assimilent la matière aux biens intermédiaires nécessaires pour la production d'un produit. On doit en fait discerner :

- les matières premières, MP, qui sont liées aux ressources de matières premières. Par exemple, l'épuisement de gisements de minerais de fer a des influences sur la production (et les prix) de l'acier,
- les matières intermédiaires, MI, ou biens intermédiaires dont les producteurs ont besoin. La fonction de production d'un producteur fait alors intervenir les quatre facteurs K,L,E,MI s'il n'utilise pas directement de matières premières. Ce sont en fait ces facteurs primaires, sans les matières premières, que les économistes emploient.

Nous intéressant à l'économie de l'énergie et non à l'économie des matières premières (problème des ressources de matières premières) nous négligerons l'aspect physique de la matière première (tonnes de Fe, de C, ...). Cela se justifie de deux manières :

- il y a conservation de la masse tout au long des opérations de transformation,
- la production dépend des quantités de matières premières exploitées. En admettant que les matières premières MP et l'énergie E sont non-substituables, on peut dire qu'il y a une corrélation linéaire entre MP et E. Par suite, il y a une fonction  $Y = g(MP)$  de même type que la fonction de production  $Y = g(E)$  du paragraphe précédent.

(iii) Nous nous concentrerons donc sur la fonction  $Y = g(E)$ , qui est empiriquement observée à partir de la réalité, et sur les matières intermédiaires ou biens intermédiaires<sup>1/</sup>. Les fonctions  $Y = f(K,L,E,MI)$  présentant d'abord un aspect théorique, il s'ensuit que le capital K, le travail humain L et les matières intermédiaires MI sont dépendants

---

<sup>1/</sup> par extension, nous assimilerons les services "intermédiaires" aux biens intermédiaires MI (on pourrait du reste, et sans difficulté, considérer des fonctions  $Y = f(K,L,E,MI,SI)$  où SI sont les services intermédiaires).

de l'énergie E :

$$Y = f(K,L,E,MI) = g(E) \quad (1.15)$$

C'est à l' " éclatement " de la fonction  $g(E)$  que nous allons procéder dans la suite, en tentant de dissocier les facteurs primaires et en y associant un contenu en énergie. Le rôle important de l'énergie sera ainsi mis en évidence.

(iv) Les fonctions du type  $Y = f(K,L,E,MI)$  (et à fortiori  $Y = g(E)$ ) sont encore très agrégées. Ainsi, on parle d'énergie sans savoir de quels agents énergétiques il s'agit, de produits intermédiaires dans leur ensemble, c'est-à-dire sans différencier automobiles, papier... Or, plus d'énergie, de telle forme, peut être consommée dans telle activité plutôt que dans telle autre. Le tableau des échanges inter-industriels et l'analyse Entrées-Sorties offrent une désagrégation de ces activités ainsi que des moyens d'étude. Toutefois, cette désagrégation ne peut être envisagée pour chaque produit en raison des difficultés statistiques. On raisonnera donc en termes de secteurs et on discernera (fig. 1.9) :

- les secteurs énergétiques (secteur "houille", secteur "pétrole",...) qui transforment et distribuent l'énergie (houille, pétrole,...),
- les secteurs industriels (secteur "acier", secteur "chimie",...) qui produisent les biens.

On doit bien noter que les "quantités" entrant dans la figure 1.9 sont des valeurs.

Le quadrant I décrit la valeur des échanges d'énergie entre les secteurs énergétiques. Physiquement, cela correspond aux transformations des agents énergétiques, le plus souvent primaires en agents énergétiques dérivés (secondaires). L'énergie, sous forme intermédiaire, est alors délivrée aux secteurs industriels et à la demande finale. La valeur des achats d'énergie effectués par les industries est indiquée dans le quadrant II. Le quadrant III indique la valeur des fournitures de biens et de services nécessaires aux secteurs

énergétiques pour l'exploitation des aménagements énergétiques (les biens d'équipement correspondant aux aménagements mêmes sont comptés au poste "formation de capital"). Finalement, le quadrant IV décrit les échanges inter-industriels à strictement parler, en termes de valeur.

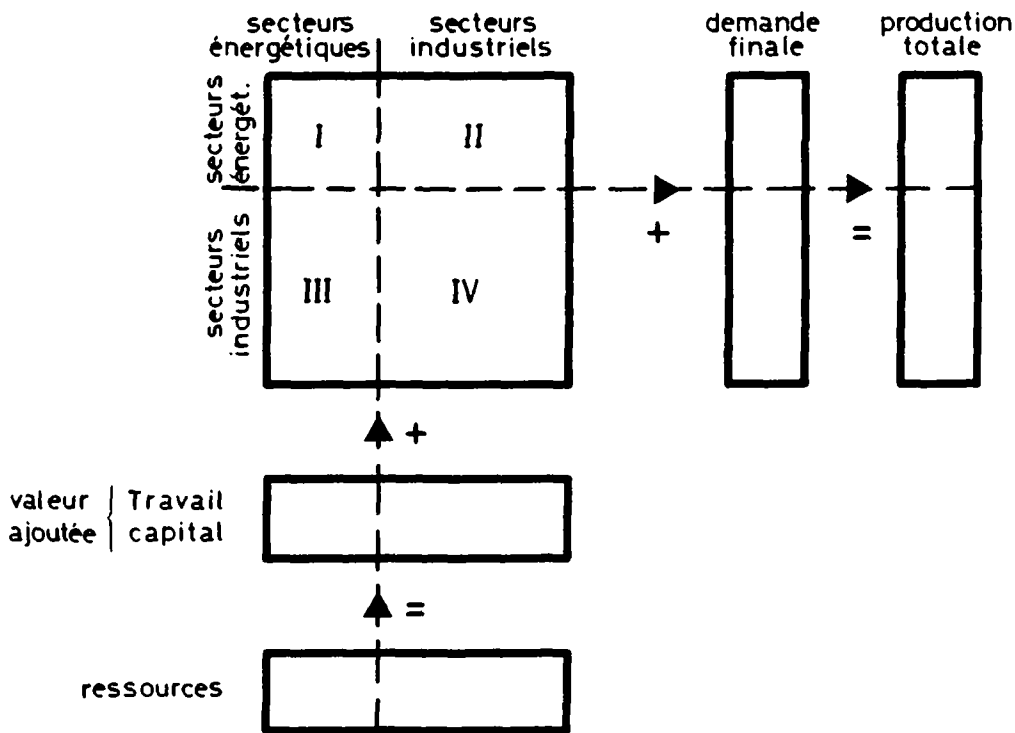


Fig. 1.9 Secteurs énergétiques et secteurs industriels dans les tableaux Entrées-Sorties (exprimés en valeur).

(v) Raisonnons maintenant en quantités physiques.

Pour la production d'une quantité physique  $x_j$  d'un produit  $j$ , il est nécessaire d'avoir une quantité  $K_j$  de capital, une quantité  $L_j$  de travail, une quantité  $E_{jk}$  d'énergie de type  $k$  ( $k$  variant de 1 à  $n_E$ ,  $n_E$  étant le nombre de types différents d'agents énergétiques), une quantité  $MI_{jh}$  de biens ou services  $h$  ( $h$  variant de 1 à  $n_M$ ,  $n_M$  étant le nombre de biens et services différents) :

$$\begin{aligned}
 x_j &= f(K_j, L_j, E_{jk}, \dots, MI_{jh}) & k &= 1, \dots, n_E \\
 & & h &= 1, \dots, n_M \\
 & & n_E + n_M &= n
 \end{aligned}$$

C'est donc la fonction de production du produit  $j$ , de type KLEM, où énergie et biens intermédiaires sont dissociés. On retrouve la fonction de production du modèle Entrées-Sorties (voir §1.1.4 (iii)). On voit donc en conclusion que les fonctions de production du modèle Entrées-Sorties sont du type  $f(K,L,E,MI)$ , avec certes quelques restrictions (non-substitution des facteurs primaires) mais aussi désagrégées pour de nombreux secteurs. Ces fonctions de production se rapportent à la production totale qui, pour éviter toute ambiguïté, devrait être notée  $x$  (ou  $X$ ) et non  $Y$ .

### 1.3.3 Approche générale : les flux d'énergie dans le système économique

De manière générale, le capital physique, le travail humain et les produits (énergie, biens et services) se combinent tout au long du système économique pour permettre la production de nouveaux produits, la consommation, la formation de capital, etc... Chaque activité demandant de l'énergie, il est possible d'y associer une certaine quantité d'énergie. Cette énergie provient à la fois de l'énergie directe qui est nécessaire mais aussi de l'énergie indirecte, contenue dans les entrées nécessaires à la réalisation d'une activité. On peut établir un bilan énergétique où interviennent les quantités d'énergie contenues dans les activités, qui constituent le processus économique. Nous étudierons alors dans le cadre d'une approche globale la manière dont se combinent les flux d'énergie entre les producteurs et les consommateurs, en introduisant le travail, le capital et les produits.

Cette approche aboutira au concept de contenu énergétique. Un certain nombre d'hypothèses simplificatrices seront effectuées tout au long de ce paragraphe. Elles permettront d'ouvrir peu à peu la voie pour retrouver d'autres méthodes, plus simples, qui ont été développées par certains auteurs. Ces approches seront étudiées au §1.3.4 et commentées par rapport à notre approche globale pour mettre en évidence les hypothèses implicites qui les sous-tendent.

(i) Notations et définitions

- Toutes les lettres qui symbolisent les facteurs primaires sont des majuscules. Pour simplifier, on notera les biens et services intermédiaires  $M$  (au lieu de  $MI$ ).
- Par souci de simplification schématique, on ne considérera que deux biens intermédiaires notés  $M1$  et  $M2$ . On peut en considérer un nombre  $n$  sans changer les raisonnements. De plus, pour simplifier l'approche,  $M1$  et  $M2$  représenteront des biens (ou services), donc des produits, à l'exclusion de l'énergie qui sera uniquement prise sous sa forme primaire  $E$ . Ainsi, il n'y aura pas de transformations d'énergie, ni plusieurs agents énergétiques, jusqu'au point (iii) o) où nous montrerons comment faire intervenir les transformations énergétiques.
- On différenciera la formation de capital physique en formation brute de capital physique et en formation nette de capital physique. La première correspond à la réalisation physique des investissements bruts (FBCF) de valeur  $\Delta N$  pendant une période de temps  $\Delta T$ ; la seconde se déduit de la première en retranchant l'usure physique du capital physique qui est due à son utilisation pendant cette période de temps  $\Delta T$ . La valeur de la formation nette de capital physique est alors  $\Delta K$ , où  $K$  représente la valeur du capital physique existant. (On peut remarquer que si l'usure physique est supérieure à la formation brute de capital physique, la formation nette est négative. Il serait alors préférable de parler de variation nette de capital physique).
- L'énergie investie dans le travail humain et dans les biens intermédiaires  $M1$  et  $M2$  sera notée respectivement  $E(L)$ ,  $E(M1)$ ,  $E(M2)$ . Il est sous-entendu qu'il s'agit d'énergie contenue dans la valeur du travail, d'énergie contenue dans la valeur des biens intermédiaires. De même,  $E(\Delta N)$  représente l'énergie investie dans la formation brute de capital physique.

- L'énergie investie dans la formation nette de capital physique sera notée  $E(\Delta K)$ . Le capital physique existant,  $K$ , étant un capital physique net (voir note 1/ p. 23), on peut dire que cette énergie est égale à la variation d'énergie investie dans le capital physique net  $\Delta E(K)$ . On a donc  $E(\Delta K) = \Delta E(K)$  pendant la période de temps  $\Delta T$ .
- Pour ne pas alourdir les notations, on ne différenciera pas la consommation privée du travail humain  $L$ . L'énergie investie dans la consommation est alors  $E(L)$ , aux pertes énergétiques près.
- On attribuera un indice aux énergies  $E(L)$ ,  $E(M1)$  et  $E(M2)$  suivant leur destination. Par exemple, le flux d'énergie investi dans les biens  $M1$  à destination de la consommation sera noté  $E(M1)_L$ . Il est inutile d'attribuer un indice à  $E(\Delta N)$  et  $E(\Delta K)$ .
- L'énergie primaire totale entrant dans le système est  $E$ . Elle peut être de même scindée en énergies primaires partielles, suivant les niveaux auxquels elle est destinée. Ainsi,  $E_{M1}$  est l'énergie primaire consommée par la production de  $M1$ .
- Les pertes d'énergie seront symbolisées par la lettre  $P$ . On lui attribuera un indice selon le niveau auquel elle se produit. Par exemple  $P_{M1}$  représentera les pertes d'énergie, lors de la production de biens  $M1$ .
- L'énergie investie dans le capital physique sera notée  $E(K)$ .
- De plus, nous verrons que l'usure physique du capital correspond à une perte d'énergie qui se manifeste sur le lieu de production ou de consommation. Ainsi une part de l'énergie contenue dans le capital physique est dissipée lors de la production et de la consommation. Soient  $E(K)_{M1}$ ,  $E(K)_{M2}$ ,  $E(K)_L$  les flux correspondants rapportés à la période de temps  $\Delta T$ . En appelant  $\mu_E$  le taux de dissipation de l'énergie investie dans le capital physique, on a pour une période de temps  $\Delta T$  :  $\mu_E \cdot E(K) \cdot \Delta T = E(K)_{M1} + E(K)_{M2} + E(K)_L$ .

(ii) Approche globale

Soit un système économique où deux biens sont produits, ou existent un certain nombre de travailleurs, qui sont aussi des consommateurs, et un certain capital physique existant. La figure 1.10 représente les flux d'énergie entre la production de ces deux biens, leur consommation et la formation de capital physique à l'aide de ces deux biens (et de travail humain et d'énergie) qui accroît le capital physique existant, lui-même nécessaire pour les autres activités. L'ensemble de ces activités constitue le processus économique qui se déroule à l'intérieur de ce système économique.

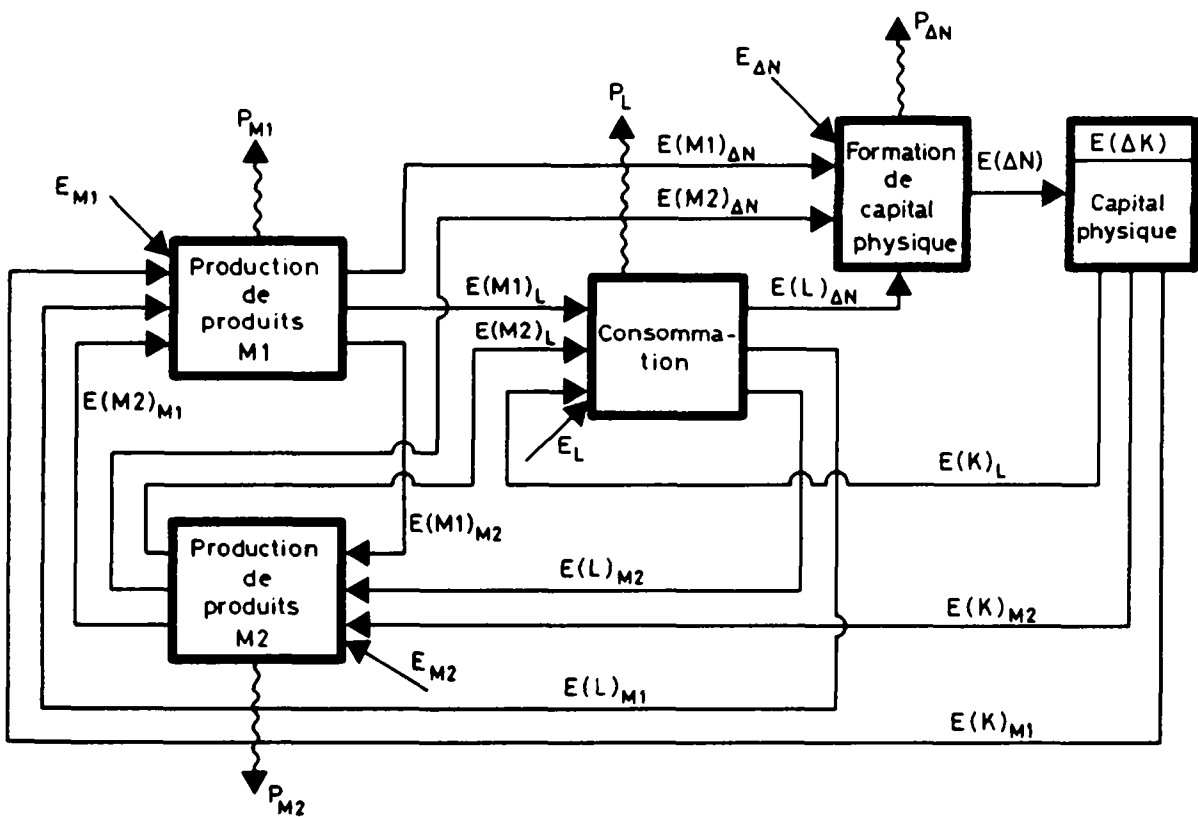


Fig. 1.10 Représentation générale des flux d'énergie dans le système économique.



On doit faire les commentaires suivants :

- a) Les activités de production exigent du capital, du travail, des biens et de l'énergie. Il y a interdépendance entre les quantités d'énergie contenues dans chacun des biens. Par exemple, on peut penser à l'acier nécessaire pour produire un camion lui-même nécessaire pour transporter l'acier; de même pour les énergies associées. Il va de soi que l'on peut considérer  $n$  transformations toutes dépendantes les unes des autres. Pour simplifier, mais ce n'est pas obligatoire, on fait une première hypothèse en supposant que la production d'un bien n'exige pas une entrée de ce bien :  $E(M1)_{M1} = E(M2)_{M2} = 0$  (autrement dit, les productions sont des productions nettes). L'énergie contenue dans les biens produits, ou énergie indirecte pendant la période de temps  $\Delta T$ , est donc égale à la somme des énergies contenues dans les facteurs primaires, aux pertes de transformation près. Cette énergie est destinée aux autres activités. On a, par exemple, pour  $M1$  :

$$E(M1) = E(K)_{M1} + E(L)_{M1} + E_{M1} + E(M2)_{M1} - P_{M1} = \\ E(M1)_{\Delta N} + E(M1)_L + E(M1)_{M2} \quad (1.16)$$

- b) Les activités de consommation nécessitent des biens, donc l'énergie associée, et de l'énergie (pour le chauffage, par exemple). Elles demandent aussi du capital physique (maisons, logements). Pour posséder ces biens, les consommateurs travaillent : ils produisent des biens ou forment du capital physique (travail de chantier). On n'a pas tenu compte de rétroaction directe entre le travail et la consommation (travail de maison, par exemple) :  $E(L)_L = 0$ . Ceci constitue une deuxième hypothèse. Le contenu énergétique du travail sera donc égal à l'énergie totale (directe et indirecte) contenue dans les produits de consommation et dans le capital utilisé pendant la période de temps  $\Delta T$ , aux pertes à l'utilisation près<sup>1/</sup> :

---

1/ on notera que le consommateur ne peut être qualifié de "final" puisque toutes les activités qui composent le processus économique sont liées entre elles. D'autre part, le terme "utilisation" est équivalent à "consommation" et ne préjuge en rien de l'utilité de la consommation. Ainsi, pertes d'énergie à l'utilisation ne veut pas dire que l'énergie est utile au consommateur.

$$E(L) = E(K)_L + E_L + E(M1)_L + E(M2)_L - P_L =$$

$$E(L)_{\Delta N} + E(L)_{M1} + E(L)_{M2} \quad (1.17)$$

- c) La transformation brute de capital physique  $\Delta N$  pendant la période de temps  $\Delta T$  demande des biens (biens d'équipement), du travail humain et de l'énergie (chantier, levage, transport). On considèrera qu'il n'y a pas de demande directe de capital physique :  $E(K)_{\Delta N} = 0$  (troisième hypothèse). Cela revient à dire que les matériels de chantier, de levage, de transport, ne constituent pas un capital physique. Nous les considérerons plutôt comme des biens d'exploitation (ici pour la formation de capital) au même titre que par exemple les outils nécessaires à la production de biens (marteau,...) constituent des biens d'exploitation, à l'égal des biens produits (soit par exemple la chaîne suivante :  $Fe + C \rightarrow$  acier  $\rightarrow$  marteau qui permet de maintenir l'exploitation de la production d'acier)<sup>1/</sup>. L'énergie contenue dans la formation brute de capital physique est égale, aux pertes près, à l'énergie contenue dans les entrées :

$$E(\Delta N) = E(L)_{\Delta N} + E_{\Delta N} + E(M1)_{\Delta N} + E(M2)_{\Delta N} - P_{\Delta N} \quad (1.18)$$

- d) L'énergie nécessaire au déroulement du processus économique est prélevée des stocks d'énergie primaire (combustibles fossiles par exemple) ou utilisée à partir des flux d'énergie primaire (hydraulique, solaire...). Elle constitue néanmoins pour le système économique un flux<sup>2/</sup> (qui certes, vis-à-vis des stocks d'énergie, les épuise). De même, le travail humain et la formation de capital physique

---

1/ c'est ici tout le problème, que nous ne développerons pas, que rencontrent les économistes en tentant de différencier biens de consommation et biens de production : ainsi une automobile ou une machine à laver sont intermédiaires entre une consommation immédiate et un investissement. Un consensus s'établit, au niveau statistique, à partir de la durée de vie des biens (ONU, 1968).

2/ un flux dépend de l'époque de temps considérée. Un stock subsiste d'une époque de temps à une autre, à moins que des flux ne l'alimentent ou ne l'épuisent. C'est ce qui nous oblige à différencier  $\Delta K$  (flux) de  $K$  (stock).

représentent des flux. Il n'en est pas de même de capital physique existant qui constitue un stock. Ce stock est alimenté par la formation brute de capital physique. Puisque l'énergie est associée au capital physique, l'énergie primaire, après transformations et pertes d'énergie, est finalement investie sous forme de capital physique.

- e) Le système de production de biens ( $M_1, M_2$ ) doit être étendu à la "production" d'énergie. Par exemple,  $E_{M_1}$  peut représenter des combustibles fossiles introduits dans des centrales générant de l'énergie électrique  $E(M_1)$  qui sera par la suite distribuée pour d'autres activités demandant de l'électricité. Une partie  $E(M_1)_L$  est par exemple destinée à la consommation (éclairage) qui peut aussi avoir besoin d'autres agents énergétiques ( $E_L$  peut représenter le charbon pour la chaufferie). Toutes les pertes énergétiques lors de la distribution sont ramenées au système de production. Nous verrons comment on doit faire intervenir les rendements des transformations pour définir un rendement global de "chaîne" énergétique au point 0).
- f) Le capital physique existant est indispensable pour que les activités qui constituent le processus économique puissent avoir lieu : pour produire, travailler, consommer, il faut des usines de production de biens et d'énergie, des machines, des logements. Chacune de ces installations, prise isolément, a une certaine durée de vie physique et chacune a une fonction bien précise dans le système économique. Supposons que la période de temps considérée soit une année. Supposons aussi que la durée de vie physique d'une machine qui permet de produire les produits  $M_1$  soit de 10 ans. En admettant que la production annuelle soit constante au cours de ces 10 ans, nous dirons par convention qu'on utilisera chaque année  $1/10$  du capital-machine. En d'autres termes, une certaine quantité de capital physique est utilisée pendant une période de temps donnée; donc l'énergie associée aussi. En appelant  $E(\Delta K)$  la variation nette, pendant cette période de temps, de l'énergie investie dans le capital physique, on a de manière générale :

$$E(\Delta K) = E(\Delta N) - E(K)_L - E(K)_{M_1} - E(K)_{M_2} \quad (1.20)$$

où  $E(K)_L$ ,  $E(K)_{M1}$ ,  $E(K)_{M2}$  sont les quantités d'énergie, contenues dans le capital existant, qui sont utilisées durant la période de temps  $\Delta T$  pour la consommation et la production.

g) Une installation a une durée de vie physique parce qu'elle s'use physiquement. Cette usure physique doit être vue sous deux aspects :

- l'usure naturelle due à des phénomènes naturels (oxydation naturelle, érosion naturelle, ...) qui sera négligée parce que faisant appel à d'autres phénomènes que ceux que nous voulons étudier (quatrième hypothèse);
- l'usure due aux activités humaines, c'est-à-dire l'usure physique due à l'utilisation de ces installations pour le déroulement du processus économique.

Ainsi, l'usure d'une construction inutilisée (inhabitée par exemple) sera considérée comme naturelle; par usure physique il faudra entendre par la suite usure physique due aux activités humaines qui permettent la poursuite du processus économique. Puisqu'une certaine quantité d'énergie correspond au capital physique, l'usure physique du capital se manifeste par une perte d'énergie (érosion, flux de chaleur vers l'extérieur). Ainsi,  $E(K)_{M1}$ ,  $E(K)_{M2}$ ,  $E(K)_L$  représentent des pertes d'énergie. Par ailleurs, puisque ce capital s'use lors de la production (et de la consommation), les pertes totales  $P_{M1}$ ,  $P_{M2}$  (et  $P_L$ ) comprennent les pertes dues à son usure. En résumant, le déroulement du processus économique implique qu'il y ait capital physique et entraîne son usure qui se manifeste par une perte d'énergie lors de chaque activité.

h) La durée de vie physique d'une installation n'implique toutefois pas nécessairement son usure complète. La durée de vie dépend plutôt des performances de l'installation :

- vis-à-vis d'elle-même, en fonction de son état qui se dégrade de plus en plus, jusqu'à n'être plus en état de produire (turbine usée, inutilisable, mais néanmoins existante, roue dont les dents sont usées);
- vis-à-vis d'autres installations concurrentes par rapport auxquelles elle devient obsolète (influence du progrès technique). Elle n'est alors plus économiquement exploitable.

Une certaine quantité d'énergie reste contenue dans les installations usées ou obsolètes. Ces installations n'étant plus utilisées dans le processus économique, l'énergie qu'elles contiennent encore sont des pertes énergétiques, à moins que les matériaux qui les composent soient recyclés. Dans ce cas, ces matériaux repassent par le système de production (M1, M2,...) et sont traités comme des produits intermédiaires. Il en va du reste de même pour les produits usés à la consommation ou lors d'exploitation d'une installation, qui ont aussi une certaine durée de vie physique - ils deviennent, après, des déchets - et qui peuvent être recyclés.

i) Finalement, les pertes d'énergie se présentent sous cinq aspects :

- les pertes d'énergie proprement dites (flux de chaleur) dues au fait que les rendements énergétiques des transformations n'atteignent généralement pas l'unité,
- les pertes d'énergie dues à l'usure physique du capital physique existant qui provient de son utilisation,
- les pertes d'énergie dues à l'énergie contenue dans le capital physique devenu obsolète,
- les pertes d'énergie dues à l'énergie contenue dans les produits inutilisables (déchets) ou perdus. Cette catégorie comprend l'énergie non utilisée complètement (imbrûlés dans une chaudière par exemple),
- les pertes d'énergie dues à l'usure physique des biens qu'achète un consommateur (usure des pneus d'automobiles par exemple). On pourrait de même considérer l'usure physique des biens nécessaires à l'exploitation d'une installation (outils par exemple).

Nous négligerons les pertes de ces trois derniers groupes (cinquième, sixième et septième hypothèse) à moins, comme nous l'avons spécifié plus haut, qu'il y ait recyclage. Un aspect supplémentaire peut être envisagé, celui où des pertes d'énergie seraient dues au fait que tous les consommateurs ne sont pas nécessairement tous

des travailleurs. On considèrera alors que l'énergie associée au travail humain comprendra l'énergie associée à la consommation des non-travailleurs (huitième hypothèse).

j) Rappelons toutes les hypothèses simplificatrices que nous avons faites :

1. Les intraconsommations de produits sont négligées ( $E(M1)_{M1} = E(M2)_{M2} = 0$ ).
2. Il n'y a pas de rétroaction directe entre le travail et la consommation ( $E(L)_L = 0$ ).
3. Il n'y a pas de demande directe de capital physique pour la formation de capital physique ( $E(K)_{\Delta N} = 0$ ).
4. Il n'y a pas d'usure physique naturelle du capital physique existant. De même pour les biens de consommation qui sont supposés ne pas s'user de manière naturelle.
5. L'énergie investie dans le capital physique devenu inutilisable pour le processus économique ou obsolète est négligée.
6. Il en va de même pour l'énergie investie dans les biens de consommation inutilisables et rejetés comme déchets. Toutefois, si ces déchets sont recyclés, ils sont considérés comme des produits identiques aux autres.
7. De plus, les pertes d'énergie contenue dans un bien de consommation (ou d'exploitation) qui ont lieu lors de l'utilisation (ou de l'exploitation) sont négligées. Seules sont comptées les pertes dues à l'usure physique du capital existant.
8. On considère finalement que l'énergie investie dans le travail humain qu'un travailleur produit est égale à l'énergie investie dans sa consommation (ou dans la consommation des consommateurs qu'il représente), une fois déduites les pertes énergétiques dues aux rendements des appareils consommateurs d'énergie qu'il utilise pour sa consommation. Cela revient à dire que, pendant une

période de temps donnée, le nombre de travailleurs et le nombre de consommateurs restent constants.

Nous nous servons de ces hypothèses pour développer quelques relations basées sur le principe de la conservation de l'énergie. Il doit être entendu que ces simplifications sont faites en vue d'applications pratiques, c'est-à-dire qu'elles sont dépendantes des statistiques existantes et de leur disponibilité. De plus certaines hypothèses sont sans conséquences vis-à-vis de l'imprécision des statistiques et de la difficulté de classer les données dans un cadre strict eu égard à l'imprécision des définitions utilisées par les économistes (séparation consommation - formation de capital). Nous serons amenés en plus à faire par la suite d'autres hypothèses. On admet au départ les hypothèses 1, 2, 3 et 4. On rappelle que l'on raisonne toujours pendant une période de temps  $\Delta T$  (souvent sous-entendue dans la suite).

- k) En utilisant l'hypothèse 5, et si on appelle  $E(\Delta K)$  la variation pendant une période de temps  $\Delta T$ , de l'énergie investie dans le capital physique, on a :

$$E(\Delta K) = E(\Delta N) - E(K)_L - E(K)_{M1} - E(K)_{M2} \quad (1.20)$$

En supposant que les installations s'usent physiquement au même taux d'usure  $\mu_E$  (en % par unité de temps) constant (neuvième hypothèse), cette relation devient :

$$E(\Delta K) = E(\Delta N) - \mu_E \cdot E(K) \cdot \Delta T \quad (1.21)$$

et l'on retrouve une relation du même type que la "loi d'accumulation du capital" des économistes, le capital se dépréciant au taux  $\mu$ .

- 1) Exprimons le bilan énergétique du système global, pendant la période de temps  $\Delta T$  :

$$E = E(\Delta K) + P \quad (1.22)$$

où  $E = E_{\Delta N} + E_L + E_{M1} + E_{M2}$  est l'énergie primaire totale,

$P = P_{\Delta N} + P_L + P_{M1} + P_{M2}$  symbolise les pertes totales d'énergie et

$E(\Delta K)$  est l'énergie investie sous forme de capital physique.

Nous définirons alors  $E(\Delta K)$  comme l'énergie utile pendant la période de temps  $\Delta T$  au processus économique, la différence entre l'énergie primaire  $E$  et l'énergie utile  $E(\Delta K)$  donnant la somme des pertes dans le système économique. Ainsi, il est possible d'apporter quelques précisions par rapport au §1.2.2 (iii) dans lequel on insistait sur la difficulté de définir l'énergie utile dans le cadre d'un système global. L'énergie utile est donc bien investie dans la fabrication de matériaux recouvrant à des réactions endothermiques et dans les constructions sous forme d'énergie potentielle. Il suffit de préciser que les matériaux en question sont les matériaux nécessaires à la formation de capital physique (donc les biens d'équipement et de construction), une fois assemblés grâce à de l'énergie ( $E_{\Delta N}$ ) et du travail humain ( $E(L)_{\Delta N}$ ), les pertes à l'assemblage ( $P_{\Delta N}$ ) déduites ainsi que les pertes dues à l'usure physique ( $E(K)_L + E(K)_{M1} + E(K)_{M2}$ ). Dans ce cadre, l'énergie contenue dans un bien de consommation, délivré à un consommateur, ne peut être qualifiée d'utile vis-à-vis de la formation de capital physique : elle sera intermédiaire. On retrouvera cette énergie dans l'énergie contenue dans le travail  $E(L)$  dont une part  $E(L)_{\Delta N}$ , elle aussi intermédiaire, est attribuée à la formation de capital physique.

- m) En combinant les équations (1.20) et (1.22), on obtient :

$$\begin{aligned} E &= E(\Delta N) - \left[ E(K)_L + E(K)_{M1} + E(K)_{M2} \right] + P_{\Delta N} + P_L + P_{M1} + P_{M2} \\ &= E(\Delta N) + P_{\Delta N} + \left[ P_L - E(K)_L \right] + \left[ P_{M1} - E(K)_{M1} \right] + \left[ P_{M2} - E(K)_{M2} \right] \end{aligned}$$

Or on sait que les énergies  $E(K)_L$ ,  $E(K)_{M1}$ ,  $E(K)_{M2}$  sont finalement des pertes puisque le capital physique s'use lorsqu'il y a



consommation et production et qu'elles sont donc incluses respectivement dans les pertes  $P_L$ ,  $P_{M1}$ ,  $P_{M2}$ . En appelant  $P'_L$ ,  $P'_{M1}$ ,  $P'_{M2}$  les différences respectives entre ces grandeurs, on a :

$$\begin{aligned} E &= E(\Delta N) + P_{\Delta N} + P'_L + P'_{M1} + P'_{M2} \\ &= E(L)_{\Delta N} + E_{\Delta N} + E(M1)_{\Delta N} + E(M2)_{\Delta N} + P'_L + P'_{M1} + P'_{M2} \end{aligned} \quad (1.23)$$

n) Nous utiliserons maintenant les hypothèses 6, 7 et 8, c'est-à-dire que :

- nous faisons abstraction de l'énergie contenue dans les déchets non recyclés et de l'usure des biens autres que les biens d'équipement,
- il n'y a pas de perte d'énergie due à l'énergie contenue dans le travail humain.

Les pertes d'énergie  $P'_L$ ,  $P'_{M1}$  et  $P'_{M2}$  ne dépendent alors que des rendements des appareils qui consomment de l'énergie (chaudières, fours industriels, télévision, machines à laver...). Soient  $\eta_L$ ,  $\eta_{M1}$ ,  $\eta_{M2}$  les rendements<sup>1/</sup>, respectivement à la consommation et à la production de produits M1 et M2.

La figure 1.11 montre un "éclaté" des flux rentrant et sortant pour la production de produits M1 (il en va de même pour M2) et pour la consommation, où l'on voit clairement apparaître les rendements énergétiques. Dans le cas de la production de produits M1, on a, de manière abstraite, scindé  $E(M1)$  entre les différents produits d'entrée, en attribuant un rendement à  $E_{M1}$ , dans les proportions  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  ( $\alpha + \beta + \gamma = 1$ ). Les pertes énergétiques sont alors telles que :

$$P'_{M1} = (1 - \eta_{M1}) \cdot E_{M1} \quad (1.24)$$

L'énergie associée à M1,  $E(M1)$ , est destinée à la formation de capital physique, à la consommation et à la production de produits M2, dans des proportions  $\alpha'$ ,  $\beta'$ ,  $\gamma'$  ( $\alpha' + \beta' + \gamma' = 1$ ).

On a en particulier :

---

1/ ces rendements énergétiques sont les rendements techniques à l'utilisation.

$$\left. \begin{aligned} E(M1)_L &= \frac{\beta'}{\alpha} \cdot \eta_{M1} \cdot E_{M1} \\ E(M1)_{M2} &= \frac{\alpha'}{\alpha} \cdot \eta_{M1} \cdot E_{M1} \end{aligned} \right\} \quad (1.25)$$

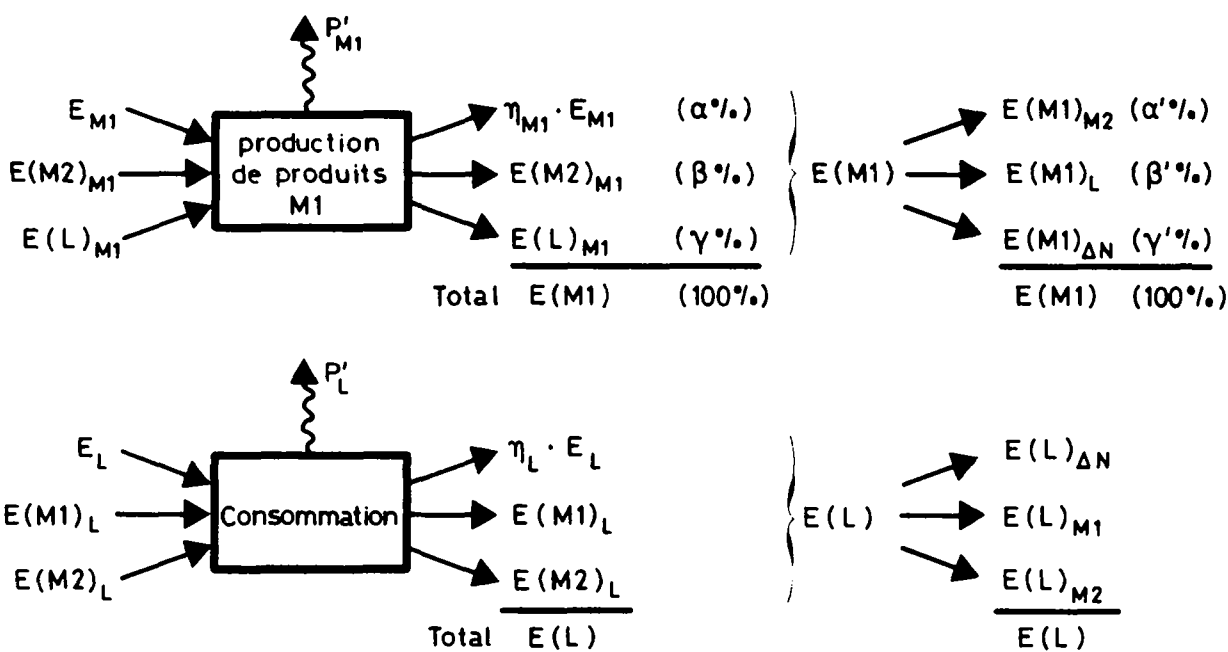


Fig. 1.11 Représentation partielle des flux d'énergie à la production de produits M1 et à la consommation.

- o) Ainsi qu'on l'a dit au point e), M1 peut représenter de l'énergie transformée. Par exemple, si la production M1 représente la production d'électricité à partir de charbon,  $\eta_{M1}$  mesure le rendement de la centrale thermique. Une part de cette énergie transformée est destinée à la consommation, dont les besoins en énergie peuvent alors être divisés en  $E_L$  (énergie primaire) et  $E(M1)_L$ . Il va de soi que M2 peut représenter un autre agent énergétique et que les biens achetés par les consommateurs pourraient être symbolisés par  $(M3)_L, \dots (Mn)_L$ . Toujours par souci de simplification, nous raisonnons encore sur deux produits dont un, par exemple M1, représentera de l'énergie intermédiaire et l'autre, M2, un bien. Nous montrerons l'influence dans les équations de l'énergie intermédiaire qu'il a fallu produire par transformation avec un certain rendement.

Comme ci-dessus, les équations sont généralisables sans difficulté à  $n$  produits dont  $m$  sont les agents énergétiques. Les pertes énergétiques sont alors<sup>1/</sup> :

$$P'_L = (1 - \eta_L) \cdot E_L + (1 - \eta_L) \cdot E(M1)_L \quad (1.26)$$

(si M1 et M2 étaient des biens, on aurait plus simplement :

$$P'_L = (1 - \eta_L) \cdot E_L).$$

De même, les pertes  $P'_{M2}$  sont telles que :

$$P'_{M2} = (1 - \eta_{M2}) \cdot E_{M2} + (1 - \eta_{M2}) \cdot E(M1)_{M2} \quad (1.27)$$

p) En utilisant les équations (1.24) à (1.27), l'équation (1.23) s'écrit :

$$E = E(L)_{\Delta N} + E_{\Delta N} + E(M1)_{\Delta N} + E(M2)_{\Delta N} + (1 - \eta_L) \cdot E_L + (1 - \eta_L) \cdot \frac{\beta'}{\alpha} \cdot \eta_{M1} \cdot E_{M1} \\ + (1 - \eta_{M1}) \cdot E_{M1} + (1 - \eta_{M2}) \cdot E_{M2} + (1 - \eta_{M2}) \cdot \frac{\alpha'}{\alpha} \cdot \eta_{M1} \cdot E_{M1}$$

c'est-à-dire, puisque  $E(L)_{\Delta N} + E_{\Delta N} + E(M1)_{\Delta N} + E(M2)_{\Delta N} = E(\Delta N) + P_{\Delta N}$  :

$$E = E(\Delta N) + P_{\Delta N} + (1 - \eta_L) \cdot E_L + (1 - \eta_{M1}) \cdot E_{M1} + \left[ (1 - \eta_L) \frac{\beta'}{\alpha} + (1 - \eta_{M2}) \frac{\alpha'}{\alpha} \right] \cdot \eta_{M1} \cdot E_{M1} + \\ (1 - \eta_{M2}) \cdot E_{M2} \\ = E(\Delta N) + P_{\Delta N} + (1 - \eta_L) \cdot E_L + E_{M1} - \left[ 1 - \frac{\beta'}{\alpha} - \frac{\alpha'}{\alpha} + \eta_L \cdot \frac{\beta'}{\alpha} + \eta_{M2} \cdot \frac{\alpha'}{\alpha} \right] \cdot \eta_{M1} \cdot E_{M1} + \\ (1 - \eta_{M2}) \cdot E_{M2} \quad (1.28)$$

---

1/ pour ne pas alourdir les notations, on prend  $\eta_L$  comme rendement global à la consommation. Il est clair que le rendement varie suivant les agents énergétiques et les appareils. Rigoureusement, on devrait écrire, avec  $i$  symbolisant un agent énergétique et  $j$  l'appareil où il est consommé :

$$P'_i = \sum_j \sum_i (1 - \eta_{L_{ij}}) \cdot E_{L_{ij}} + \sum_j \sum_i (1 - \eta_{L_{ij}}) \cdot E(M1)_{L_{ij}}$$

$E_{ij}$  représente l'énergie du type  $i$  consommée dans l'appareil  $j$  du consommateur, avec un rendement  $\eta_{L_{ij}}$ .

On voit donc intervenir des produits de rendements, qui mesurent le rendement global des "chaînes" énergétiques<sup>1/</sup> ainsi que les proportions dans lesquelles les flux sont distribués.

(si M1 et M2 étaient des biens, donc qu'il n'y a pas de transformation d'énergie primaire, l'équation (1.28) se réduirait à :

$$E = E(\Delta N) + P_{\Delta N} + (1-\eta_L) \cdot E_L + (1-\eta_{M1}) \cdot E_{M1} + (1-\eta_{M2}) \cdot E_{M2} )$$

q) Développons l'équation (1.28). Puisque  $E = E_L + E_{M1} + E_{M2} + E_{\Delta N}$ , nous obtenons :

$$E(\Delta N) + P_{\Delta N} - E_{\Delta N} = \eta_L \cdot E_L + \left(1 - \frac{\beta'}{\alpha} - \frac{\alpha'}{\alpha} + \eta_L \cdot \frac{\beta'}{\alpha} + \eta_{M2} \cdot \frac{\alpha'}{\alpha}\right) \cdot \eta_{M1} \cdot E_{M1} + \eta_{M2} \cdot E_{M2} \quad (1.29)$$

On supposera maintenant que toute l'énergie primaire utilisée pour l'assemblage des biens d'équipement (chantier, montage,...) est intégralement perdue :  $E_{\Delta N} = P_{\Delta N}$  et qu'il n'y a aucune perte de l'énergie intermédiaire  $E(M1)_{\Delta N}$  qui sera donc toute contenue dans  $E(\Delta N)$  (de manière plus générale, on peut concevoir que

$E_{\Delta N} + E(M1)_{\Delta N} = P_{\Delta N} + E(M1)'_{\Delta N}$ , avec  $E(M1)_{\Delta N} = E(M1)'_{\Delta N}$  mais où une part de  $E_{\Delta N}$  est incorporée dans  $E(M1)'_{\Delta N}$ ). Ceci constitue la dixième hypothèse. L'équation (1.29) devient :

$$E(\Delta N) = \eta_L \cdot E_L + \left(1 - \frac{\beta'}{\alpha} - \frac{\alpha'}{\alpha} + \eta_L \cdot \frac{\beta'}{\alpha} + \eta_{M2} \cdot \frac{\alpha'}{\alpha}\right) \cdot \eta_{M1} \cdot E_{M1} + \eta_{M2} \cdot E_{M2} \quad (1.30)$$

(Plus simplement, si M1 et M2 sont des biens, on a :

$$E(\Delta N) = \eta_L \cdot E_L + \eta_{M1} \cdot E_{M1} + \eta_{M2} \cdot E_{M2} ).$$

r) Finalement, une onzième hypothèse sera effectuée : on négligera l'énergie associée à l'usure physique du capital. Cela revient à dire

---

1/ on met des guillemets au mot "chaînes" dans la mesure où, comme on le voit au premier abord sur la figure 1.10, on a un cycle dissipatif. Dans un second stade, on peut parler de chaîne si l'on a défini une fin à la chaîne : ce sera la formation de capital physique. Autrement dit, les chaînes énergétiques étudiées usuellement en économie de l'énergie doivent être étendues jusqu'à la formation de capital physique.

que les activités du système économique ne demandent pas de capital physique. Dans ce cas, on a :

$$P'_L = P_L, \quad P'_{M1} = P_{M1}, \quad P'_{M2} = P_{M2}$$

et  $E(\Delta N) = E(\Delta K)$  (= énergie utile)

L'équation (1.30) devient :

$$E(\Delta K) = \eta_L \cdot E_L + \left( 1 - \frac{\beta'}{\alpha} - \frac{\alpha'}{\alpha} + \eta_L \cdot \frac{\beta'}{\alpha} + \eta_{M2} \cdot \frac{\alpha'}{\alpha} \right) \cdot \eta_{M1} \cdot E_{M1} + \eta_{M2} \cdot E_{M2} \quad (1.31)$$

(pour M1 et M2 représentant des biens, on a :

$$E(\Delta K) = \eta_L \cdot E_L + \eta_{M1} \cdot E_{M1} + \eta_{M2} \cdot E_{M2} )$$

Ces équations indiquent donc que l'énergie utile, stockée sous forme de capital physique, est égale aux énergies primaires auxquelles ont été attribués les rendements de toutes les transformations intervenant. Pour obtenir ces équations, les hypothèses 10 et 11 ont dû être ajoutées aux hypothèses 1 à 8 (l'hypothèse 9 est un cas particulier de l'hypothèse 10).

- s) Si l'on néglige toutes les pertes, on a :  $\eta_L = \eta_{M1} = \eta_{M2} = 1$  et  $P_{\Delta K} = 0 = E_{\Delta K}$ . L'équation (1.31) devient :

$$E(\Delta K) = E_L + E_{M1} + E_{M2} = E \quad (1.32)$$

Toute l'énergie primaire est investie sous forme de capital physique.

(iii) Approche générale : mise sous forme d'un tableau

- a) Le schéma de la figure 1.10 peut être mis sous forme d'un tableau où interviennent M1, M2, L,  $\Delta N$  et  $\Delta K$  (fig. 1.12). Pour simplifier, on admet d'abord que les hypothèses 1 à 4 sont respectées. Chaque élément non diagonal du tableau représente l'énergie associée à une transaction. La lecture du tableau se fait en ligne et colonne et correspond aux équations (1.16) à (1.20) :

- en colonne, c'est l'aspect production. Par exemple, l'énergie associée aux produits  $E(M1)$  est égale à la somme des énergies associées aux entrées diminuée des pertes  $P_{M1}$  à la production,
- en ligne, c'est l'aspect destination. Par exemple, l'énergie associée aux produits  $M1$  est séparée entre les destinations de ces produits  $M1$ .

	M1	M2	L	$\Delta N$	$\Delta K$
M1	$+E(M1)$	$-E(M1)_{M2}$	$-E(M1)_L$	$-E(M1)_{\Delta N}$	0
M2	$-E(M2)_{M1}$	$+E(M2)$	$-E(M2)_L$	$-E(M2)_{\Delta N}$	0
L	$-E(L)_{M1}$	$-E(L)_{M2}$	$+E(L)$	$-E(L)_{\Delta N}$	0
$\Delta N$	0	0	0	$+E(\Delta N)$	$-E(\Delta N)$
$\Delta K$	$-E(K)_{M1}$	$-E(K)_{M2}$	$-E(K)_L$	0	$\mu_E \cdot E(K)_{\Delta T}$

$=$ 

$\Sigma$
0
0
0
0
0

+

+

$\Sigma$

Pertes totales	$P_{M1}$	$P_{M2}$	$P_L$	$P_{\Delta N}$	0
----------------	----------	----------	-------	----------------	---

$=$ 

$P$
-----

=

=

$\Sigma :$	$E_{M1}$	$E_{M2}$	$E_L$	$E_{\Delta N}$	$-E(\Delta K)$
------------	----------	----------	-------	----------------	----------------

$=$ 

$E - E(\Delta K)$
-------------------

Fig. 1.12 Représentation matricielle de la fig. 2.10

On doit en outre noter que :

- en ligne, les termes des équations ont été placés de telle manière que tous soient situés dans le même membre. Pour cette raison, chaque élément du tableau se voit attribuer un signe positif ou négatif. La somme algébrique des termes de chaque ligne est donc nulle;

- en colonne, on a mis en évidence l'énergie primaire  $E_{M1}$ ,  $E_{M2}$ ,  $E_L$ , et  $E_{\Delta N}$  ainsi que l'énergie utile  $E(\Delta K)$ . Les pertes ayant lieu lors de chaque transformation sont séparées du tableau. L'énergie associée à l'usure physique du capital intervient donc dans le tableau (ligne " $\Delta K$ ") ainsi que dans les pertes totales (puisque contenue dans P);
- toute l'énergie primaire apportée, E, est alors transformée en énergie utile, toutes les pertes P étant déduites :

$$E(\Delta K) = E - P$$

- les lignes " $\Delta N$ " et " $\Delta K$ " font double emploi (il n'y a pas beaucoup d'information dans la ligne " $\Delta N$ "). Ces deux lignes seront agrégées, ainsi que les colonnes correspondantes; pour cela on additionne  $E(\Delta K)$  à chaque membre de la ligne et de la colonne " $\Delta K$ ", on applique l'équation (1.21) ( $E(\Delta K) + \mu_E \cdot E(K) \cdot \Delta T = E(\Delta N)$ ) et l'on agrège les lignes et colonnes " $\Delta N$ " et " $\Delta K$ " en une seule ligne et une seule colonne que l'on appellera " $\Delta K$ ". On obtient la figure 1.13.

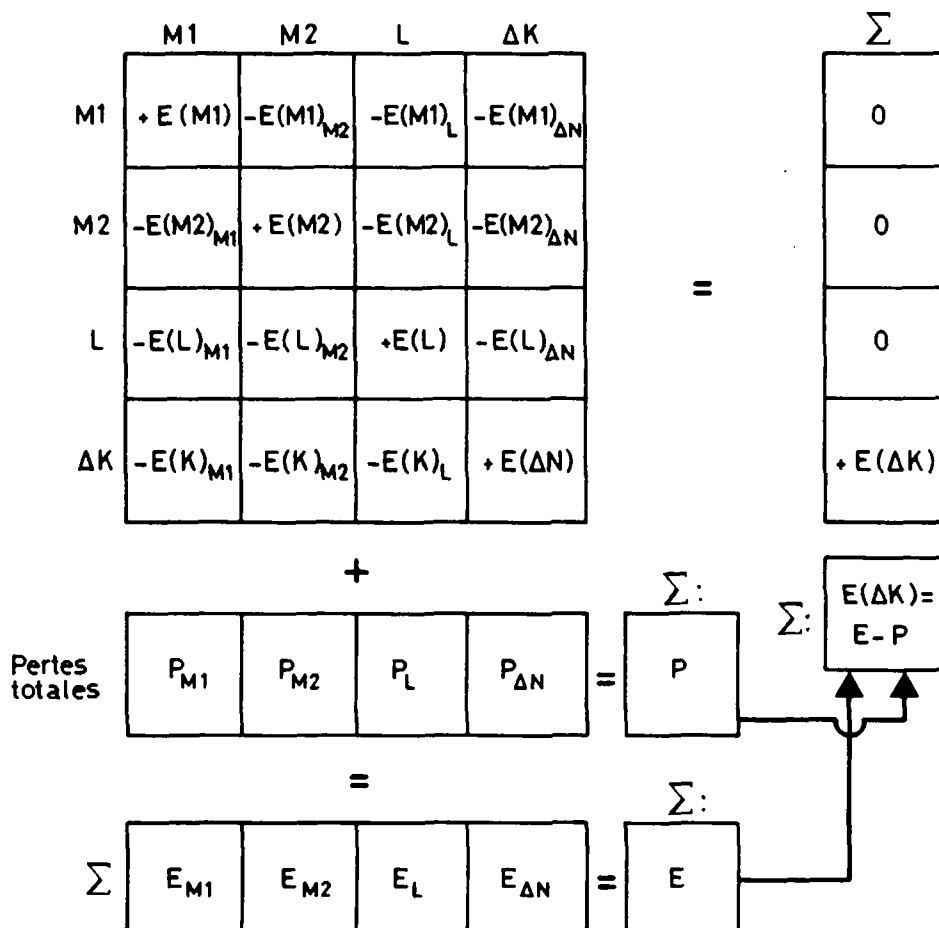


Fig. 1.13 Agrégation des lignes et colonnes " $\Delta K$ " et " $\Delta N$ ."

Dans ce cas, l'énergie utile apparaît en bout de chaîne. On voit comment l'énergie primaire est utilisée à la production (lecture en colonne) puis distribuée sous forme indirecte (lecture en ligne) jusqu'à être investie sous forme de capital physique.

- b) Modifions la figure 1.13 en multipliant par (-1) chaque ligne et chaque colonne et en ajoutant à chaque ligne "M1", "M2", "L", "ΔK" et à chaque colonne "M1", "M2", "L", "ΔK" respectivement E(M1), E(M2), E(L), E(ΔN) aux deux membres de chaque égalité. Retranchons ensuite aux deux membres de chaque égalité en colonne l'énergie primaire correspondante. On obtient la figure 1.14.

	M1	M2	L	ΔK
M1	0	$E(M1)_{M2}$	$E(M1)_L$	$E(M1)_{\Delta N}$
M2	$E(M2)_{M1}$	0	$E(M2)_L$	$E(M2)_{\Delta N}$
L	$E(L)_{M1}$	$E(L)_{M2}$	0	$E(L)_{\Delta N}$
ΔK	$E(K)_{M1}$	$E(K)_{M2}$	$E(K)_L$	0

=

Σ
$E(M1)$
$E(M2)$
$E(L)$
$E(\Delta N) - E(\Delta K)$

+

$E_{M1}$	$E_{M2}$	$E_L$	$E_{\Delta N}$
$-P_{M1}$	$-P_{M2}$	$-P_L$	$-P_{\Delta N}$

=

Σ			
$E(M1)$	$E(M2)$	$E(L)$	$E(\Delta N)$

Fig. 1.14 Modification de la fig. 1.13



c) Nous ferons maintenant une série de simplifications qui nous ramèneront à d'autres modèles déjà élaborés. Il convient tout d'abord de remarquer que les tableaux développés ci-avant ne sont pas sans rapport avec les tables Entrées-Sorties développées en économie où les deux aspects production - destination apparaissent. Nous suivrons une démarche qui nous ramène à une analogie avec les tables Entrées-Sorties. Rappelons auparavant quelques caractéristiques de ces dernières qui sont importantes pour la suite :

- Il y a égalité de la valeur des ressources et de la valeur de la production totale, ceci pour chaque producteur.
- La demande finale est composée de la consommation privée et de la formation de capital (en faisant abstraction des variations de stocks et des exportations).
- Cette demande finale est exogène au tableau Entrées-Sorties proprement dit, qui ne comprend donc que les échanges inter-industriels. Cela revient à dire qu'il n'y a pas de liaison entre consommation privée et formation de capital à l'intérieur du modèle.
- La valeur ajoutée, qui comprend particulièrement la valeur du travail et les coûts du capital, est égale à la valeur de la demande finale. Cette valeur ajoutée est exogène au tableau Entrées-Sorties proprement dit.
- C'est généralement la production totale que l'on veut connaître pour satisfaire une demande finale donnée, celle-ci étant exogène. Par rapport à la figure 1.12, cela correspond à "sortir"  $L$  et  $\Delta K$  du tableau, le tableau des échanges inter-industriels étant alors seulement composé de lignes et colonnes "M1" et "M2".
- Finalement, il y a linéarité entre les produits échangés entre deux producteurs et la production totale.

d) Revenons à la figure 1.14. Nous allons rendre la formation de capital, ou plutôt, suivant nos termes, l'énergie associée à la formation de capital, exogène au modèle. Pour cela, on reprend

l'hypothèse 11 du point r) précédent. (On néglige l'usure physique du capital; cela veut dire que l'on s'intéresse maintenant à l'énergie associée à la formation brute de capital physique). On a donc :

$$E(K)_{M1} = E(K)_{M2} = E(K)_L = 0 \quad \text{et} \quad E(\Delta N) = E(\Delta K)$$

Cela entraîne :

$$P_{M1} = P'_{M1} \quad P_{M2} = P'_{M2} \quad P_L = P'_L$$

On fait aussi l'hypothèse que  $E_{\Delta N} = P_{\Delta N} = 0$ . On justifiera cette hypothèse au chapitre 3.

La figure 1.14 se réduit alors à la figure 1.15.

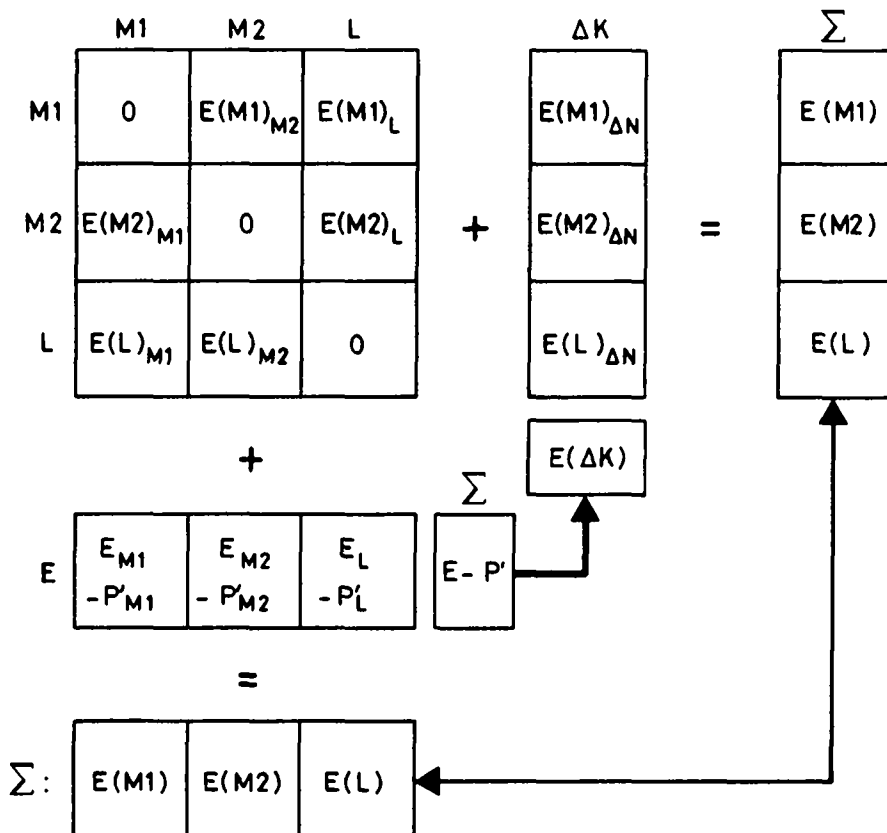


Fig. 1.15 L'énergie associée au capital physique est exogène

Avec ces hypothèses, l'énergie utile est telle que :

$$E(\Delta K) = E(\Delta N) = E(M1)_{\Delta N} + E(M2)_{\Delta N} + E(L)_{\Delta N} = E - P'$$

On a donc un système tout à fait analogue à celui développé avec des termes en valeur où la demande finale (ici seulement composée de la formation de capital physique) est égale à la valeur ajoutée (ici, c'est l'énergie primaire moins les pertes totales) et où chaque production totale correspond à chaque ressource.

Les pertes  $P'_{M1}$ ,  $P'_{M2}$  et  $P'_L$  sont les pertes d'énergie à la production et à la consommation, compte non tenu des pertes dues à l'usure du capital physique. Si l'on néglige toutes les pertes, toute l'énergie primaire  $E$  est finalement stockée sous forme de capital physique (voir équ. (1.32)) : il y a conservation complète de l'énergie. Cette énergie primaire apparaît donc comme une énergie ajoutée (au même sens que la valeur ajoutée des économistes). Puisque travail et capital ont un certain contenu énergétique, il n'est pas étonnant que l'on ait des relations du type (voir équ. (1.15)) :

$$Y = f(K, L, E, M1) = g(E)$$

- e) En introduisant les rendements énergétiques  $\eta_{M1}$ ,  $\eta_{M2}$  et  $\eta_L$  à la production et à la consommation (voir le point (ii) précédent), on a :

$$P'_{M1} = (1 - \eta_{M1}) \cdot E_{M1} \quad P'_{M2} = (1 - \eta_{M2}) \cdot E_{M2} \quad P'_L = (1 - \eta_L) \cdot E_L$$

c'est-à-dire :

$$E(\Delta K) = \eta_{M1} \cdot E_{M1} + \eta_{M2} \cdot E_{M2} + \eta_L \cdot E_L = E - P'$$

On retrouve donc l'équation (1.30).

Considérons ensuite par exemple la colonne M1 et la ligne M1 de la figure 1.15 :

- en colonne, l'énergie contenue dans les produits M1,  $E(M1)$ , provient de l'énergie contenue dans toutes les entrées : énergie primaire, pertes d'énergie déduites, et énergie associée aux produits M2 et au travail, ceci dans les proportions  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ , telles que  $\alpha + \beta + \gamma = 1$ ;
- en ligne, l'énergie contenue dans les produits M1,  $E(M1)$  est distribuée à la production de produits M2, à la consommation et à la

formation de capital, ceci dans les proportions  $\alpha'$ ,  $\beta'$ ,  $\gamma'$  telles que  $\alpha' + \beta' + \gamma' = 1$ .

Puisque le tableau est une représentation matricielle de même type que les tableaux Entrées-Sorties, les proportions  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  représentent des coefficients techniques; les proportions  $\alpha'$ ,  $\beta'$ ,  $\gamma'$  représentent des coefficients de sortie<sup>1/</sup>.

Ces proportions sont à comparer avec celles de la figure 1.11 : elles sont identiques. On voit donc que toute l'analyse développée au point (ii) n) et s. fait intervenir les coefficients techniques de production. Cette analyse est toutefois plus complète dans la mesure où les transformations de l'énergie primaire en énergie intermédiaire ont été considérées. Cela amène quelques modifications puisque l'on doit introduire les rendements de transformation correspondants. Nous désirons maintenant montrer de façon plus concrète l'analogie qu'il y a entre notre représentation énergétique du système économique sous forme de tableau et les tables Entrées-Sorties en introduisant le concept de contenu énergétique.

f) Complément de notations et formulation mathématique de la figure 1.15

Nous choisirons maintenant des notations rapportées aux lignes et aux colonnes  $j$  du tableau de la figure 1.15. On a donc :  $i, j = M1, M2, L = 1, 2, 3$ . Il va de soi que, toute notre analyse pouvant être étendue à  $n$  produits,  $i$  et  $j$  peuvent donc varier de 1 à  $n+1$  où la  $n + 1$ ème composante représente le travail (ligne  $i = n + 1$ ) et la consommation (colonne  $j = n + 1$ ). Chaque élément du tableau sera noté  $E_{ij}$ .

De plus, chaque composante du vecteur "somme" (qui correspond à la valeur de la production totale  $X$  - ou la production totale en quantité physique  $x$  - sera notée  $E_{i,x}$ . Le vecteur sera noté  $E_x$ . De même

---

1/ Rappel : en économie, si  $C_{ij}$  est la valeur d'un échange entre deux producteurs et si  $X_j$  est la valeur de la production du producteur  $j$ , le coefficient d'entrée est tel que  $A_{ij} = C_{ij}/X_j$ . Si les grandeurs sont des quantités (notre cas), le coefficient technique est  $a_{ij} = c_{ij}/x_j$ . Le coefficient de sortie est tel que  $B_{ij} = C_{ij}/X_i$ . Les  $\alpha'$ ,  $\beta'$ ,  $\gamma'$  correspondent alors à des coefficients de sortie exprimés en quantité physique par unité physique  $b_{ij} = c_{ij}/x_i$ .

pour le vecteur "formation de capital" ( $E_{\Delta k}$ , composantes  $E_{i,\Delta k}$  où  $\Delta k$  est la quantité physique fictive correspondante à  $\Delta K$ ).

Cela permettra d'éviter toute équivoque avec les quantités d'énergie primaire  $E_j$ , telles que  $\sum_j E_j = E$  où  $E$  est l'énergie primaire totale.

Définissons les coefficients techniques (énergétiques)  $\bar{a}'_{ij}$  tels que :

$$\bar{a}'_{ij} = \frac{E_{ij}}{E_{j,x}}$$

On a alors pour une ligne  $i$  :

$$\sum_j \bar{a}'_{ij} \cdot E_{j,x} + E_{i,\Delta k} = E_{i,x}$$

Si  $\bar{a}'$  est la matrice des  $\bar{a}'_{ij}$ , on a en relation matricielle :

$$\bar{a}' \cdot E_x + E_{\Delta k} = E_x$$

$$\text{ou } E_x = (I - \bar{a}')^{-1} \cdot E_{\Delta k} \quad (1.33)$$

L'équation (1.33) permet donc de déterminer le vecteur  $E_x$  si l'on connaît la matrice des coefficients techniques et le vecteur  $E_{\Delta k}$ .

- g) L'énergie associée à un bien est associée à une quantité physique : tonne,  $m^3$ , ... Si par exemple, les biens produits sont de l'acier, mesuré à la tonne, on définira le contenu énergétique par tonne d'acier,  $e^*$ , de la manière suivante :

$$E(\text{acier}) = e^* \cdot q(\text{acier})$$

$$[J] \quad \left[ \frac{J}{t} \right] \cdot [t]$$

où  $q$  est la quantité physique d'acier (tonnes). Dans le cas où c'est de l'énergie qui est "produite", et non un bien, on a  $E = q (e^* = 1)$ .

On définira aussi le contenu énergétique par unité de valeur de la tonne d'acier produite,  $e$ , en introduisant le prix  $p$  de la tonne

d'acier (en francs par tonne, par exemple) :

$$e = e^* / p$$
$$\left[ \frac{J}{fr} \right] = \left[ \frac{J}{t} \right] \cdot \left[ \frac{t}{fr} \right]$$

On a donc en introduisant la valeur de l'acier produit, V :

$$E(\text{acier}) = e \cdot p \cdot q(\text{acier})$$

$$E(\text{acier}) = e \cdot V(\text{acier})$$

$$[J] = \left[ \frac{J}{fr} \right] \cdot [fr]$$

Ces relations seront présentées de manière plus systématique au chapitre 2. Les grandeurs q et V peuvent par exemple être respectivement x et X pour la production totale ou  $\Delta k$  et  $\Delta K$  pour la formation de capital.

- h) Nous développerons le modèle en introduisant la valeur des biens, qui permet une uniformisation des grandeurs physiques, ceci en vue d'applications pratiques. Il faut noter que l'énergie apparaît aussi comme une grandeur d'uniformisation (voir. fig. 1.14) et comme une grandeur physique, mais non observable dans la réalité sous forme d'énergie contenue. Nous cherchons alors à faire le lien entre l'énergie et la valeur.

Soit  $E_{\Delta k}$  le vecteur colonne de composantes  $E_{i, \Delta k}$  dont chacune représente l'énergie contenue dans les biens ou le travail nécessaires à la formation de capital physique.

Soit d'autre part  $\hat{e}^*$  la matrice diagonale dont chaque élément  $e^*_{ij}$  représente le contenu en énergie d'une unité physique de bien ou de travail humain.

Soit  $\Delta k$  le vecteur colonne de composantes  $\Delta k_i$  dont chacune représente la quantité physique des biens ou du travail (hommes-années) nécessaires à la formation de capital physique.

Soit x le vecteur colonne de composantes  $x_i$  donc chacune représente la quantité physique de biens ou de travail produits (production totale).

On a :

$$E_{\Delta k} = \hat{e}^* \cdot \Delta k$$

$$E_x = \hat{e}^* \cdot x$$

que l'on peut reporter dans l'équation (1.33), qui devient :

$$\hat{e}^* \cdot x = (I - \bar{a}')^{-1} \cdot \hat{e}^* \cdot \Delta k$$

$$x = \hat{e}^{*-1} \cdot (I - \bar{a}') \cdot \hat{e}^* \cdot \Delta k$$

Posons :  $\hat{e}^{*-1} \cdot (I - \bar{a}')^{-1} \cdot \hat{e}^* = (I - \bar{a})^{-1}$

On a alors :

$$x = (I - \bar{a})^{-1} \cdot \Delta k \quad (1.34)$$

On retrouve l'expression de base de l'analyse Entrées-Sorties (équation (1.10)) à la différence près que la consommation ne fait pas partie de la demande finale mais est intégrée avec le travail dans la matrice  $\bar{a}$ . Ainsi si  $n$  est le nombre de secteurs industriels, la matrice  $a$  de l'équation (1.10) est de dimension  $(n \times n)$ . Au contraire, la matrice  $\bar{a}$  de l'équation (1.34) est de dimension  $(n+1 \times n+1)$ . Le raisonnement précédent peut se faire à partir de vecteurs en valeur  $X$  et  $\Delta K$  et en introduisant le contenu énergétique par unité de valeur  $e$ , au lieu de  $e^*$ . Dans ce cas, on obtient  $X = (I - \bar{a})^{-1} \cdot \Delta K$ . Dans les applications pratiques, on a en fait  $X = (I - \bar{A})^{-1} \cdot \Delta K$  où  $\bar{A}$  est la matrice des coefficients d'entrées. Nous renvoyons le lecteur au §1.1 pour la discussion de ce changement dû à l'introduction des prix. Par la suite, on emploiera la matrice  $(I - \bar{A})^{-1}$  et l'on raisonnera en valeur.

On peut noter que l'on a en outre :

$$E - P' = u \cdot \hat{e} \cdot \Delta K$$

où  $u$  est un vecteur ligne unité. Si les pertes  $P'$  sont nulles, toute l'énergie primaire est investie dans la formation de capital.

i) Finalement, on passe de l'équation (1.33) à l'équation (1.34) en divisant chaque ligne de la figure 1.15 par le contenu énergétique par unité de valeur du bien (ou du travail) correspondant. Il nous reste maintenant à déterminer ces contenus énergétiques  $e$ . En effet, une fois ceux-ci connus, on peut établir les échanges d'énergie au sein du processus économique et dresser le tableau de la figure 1.15 : on obtient une représentation énergétique du système économique, où l'énergie apparaît comme le facteur primaire essentiel.

Nous allons montrer ici comment, à partir de la figure 1.15, on peut calculer les contenus énergétiques par unité de valeur. Pour cela, il faut raisonner sur une colonne  $j$  du tableau et exprimer que l'énergie contenue dans un bien  $j$  est égale à l'énergie primaire apportée  $E_j$  diminuée des pertes énergétiques à la transformation  $P_j^1$  et augmentée de l'énergie  $E_{ij}$  contenue dans les biens (et le travail) nécessaires à la production de  $j$  :

$$E_{j,x} = E_j - P_j^1 + \sum_i E_{ij} \quad (1.35)$$

En introduisant les contenus énergétiques (on raisonne ici par unité de valeur et on peut noter  $E_{j,x}$  et  $E_{j,\Delta K}$  au lieu de  $E_{j,x}$  et  $E_{j,\Delta k}$ ), on obtient :

$$E_{j,x} = e_j \cdot X_j \quad (1.36)$$

$$E_{ij} = e_i \cdot \bar{C}_{ij} = e_i \cdot \bar{A}_{ij} \cdot X_j \quad (1.37)$$

en introduisant aussi le coefficient d'entrée  $\bar{A}_{ij}$ .

Définissons d'autre part les coefficients  ${}_0r_j^{1/}$ , tels que

$${}_0r_j = \frac{E_j}{X_j} \quad (1.38)$$

Les  ${}_0r_j$  représentent l'intensité énergétique du secteur  $j$  par unité

---

1/ les coefficients  ${}_0r_j$  rapports d'une énergie directe (quantité physique) à une valeur seront notés en lettres minuscules, de même que les prix, rapports d'une valeur à une quantité physique (voir §1.1.2 (i)).



de valeur de production totale de  $j$ . Chaque  ${}_0r_j$  indique quelle est la consommation d'énergie primaire du secteur  $j$  pour que sa production  $X_j$  soit satisfaite. Les  ${}_0r_j$  ne prennent en compte que l'énergie directe, à la différence des  $e_i$  qui tiennent compte aussi de l'énergie indirecte, contenue dans les entrées. On introduira de manière différente l'intensité énergétique au chapitre 3.

Définissons d'autre part le rendement énergétique  $\eta_j$  du processus de transformation  $j$  qui permet la production de  $j$ . On a :

$$E_j - P'_j = \eta_j \cdot E_j \quad (1.39)$$

A l'aide des équations (1.36) à (1.39), l'équation (1.35) s'écrit :

$$e_j \cdot X_j = \eta_j \cdot {}_0r_j \cdot X_j + \sum_i e_i \cdot \bar{A}_{ij} \cdot X_j \quad (1.40)$$

ou, en divisant chaque membre par  $X_j$  :

$$e_j = \eta_j \cdot {}_0r_j + \sum_i e_i \cdot \bar{A}_{ij}$$

En formant les vecteurs  $e$  et  $(\eta \cdot {}_0r)$ , on a, en relation matricielle :

$$e = (\eta \cdot {}_0r) + e \cdot \bar{A}$$

$$\text{ou} \quad e = (\eta \cdot {}_0r) \cdot (I - \bar{A})^{-1} \quad (1.41)$$

Cette relation permet donc de calculer les contenus énergétiques par unité de valeur, compte tenu des pertes aux transformations. Rappelons que dans la matrice  $\bar{A}$  ici définie interviennent le travail et la consommation (et donc les rendements correspondants à la consommation).

Notons en outre que l'on considère l'énergie primaire dans son ensemble, sans la scinder entre les différents agents énergétiques qui la composent. De plus, il faut tenir compte des rendements lors des transformations de l'énergie.

On étudiera ces questions au chapitre 3 en étendant la méthode de R.A. Herendeen (1974) qui, par rapport à notre approche globale, est simplifiée.

### 1.3.4 Simplifications progressives de l'approche générale

Ce n'est qu'au chapitre 3 que nous verrons comment calculer pratiquement les contenus énergétiques par unité de valeur, à l'aide du tableau Entrées-Sorties. Nous y intégrerons les pertes d'énergie et l'énergie associée au travail, de manière à calculer l'énergie utile investie dans la formation de capital physique.

Auparavant, nous montrerons ci-après les principales hypothèses réductrices qui sont implicitement faites dans trois approches de détermination de l'énergie associée aux biens. Nous représenterons ces approches en simplifiant, à chaque fois, la figure générale 1.10. On trouvera une description de ces trois méthodes, par exemple, par P.F. Chapman (1974), et par F. Roberts (1978). Elles ont été utilisées dans de nombreuses recherches (P.F. Chapman et al. (1974); D.J. Wright (1974), Fed. Energy Adm. (1976) — voir les revues "Energy" et "Energy Policy").

#### (i) Premier stade de simplifications : la méthode de R.A. Herendeen (1974)

Nous présentons ici quelques simplifications supplémentaires qui sont implicitement incluses dans la méthode de R.A. Herendeen. Celui-ci utilise l'analyse Entrées-Sorties classique. La méthode de calcul détaillée sera développée au chapitre 3.

Effectuons les trois hypothèses suivantes :

- On néglige toutes les pertes d'énergie. On a donc  $\eta = 1$ . L'équation (1.41) devient (l'indice 0 symbolise une perte d'énergie nulle) :

$${}_0e = {}_0r \cdot (I - \bar{A})^{-1} \quad (1.42)$$

où  $\bar{A}$  est une matrice intégrant travail et consommation, donc de dimension  $(n+1) \times (n+1)$ .

- On admet que  $E_{\Delta K} = 0$  : la formation de capital ne nécessite aucune consommation d'énergie primaire. Nous justifierons au chapitre 3 cette hypothèse, ainsi que nous l'avons déjà mentionné.
- En accord avec l'analyse Entrées-Sorties classique, la consommation est exogène au modèle (c'est la consommation "finale"), comme la formation de capital. Cela revient à dire que consommation et travail

sont hors de la matrice A dont la dimension est alors nxn. Puisqu'il n'y a aucune perte d'énergie, toute l'énergie primaire est investie dans la consommation finale et la formation de capital. Nous verrons que le contenu énergétique est donné par :

$${}_0e' = r(I-A)^{-1} + s \quad (1.43)$$

où A est la matrice déduite des seuls échanges inter-industriels, de dimension nxn et où s est une matrice comptant l'énergie directe consommée par les consommateurs.

Appliquons ces simplifications à la figure 1.15. On obtient la figure 1.16.

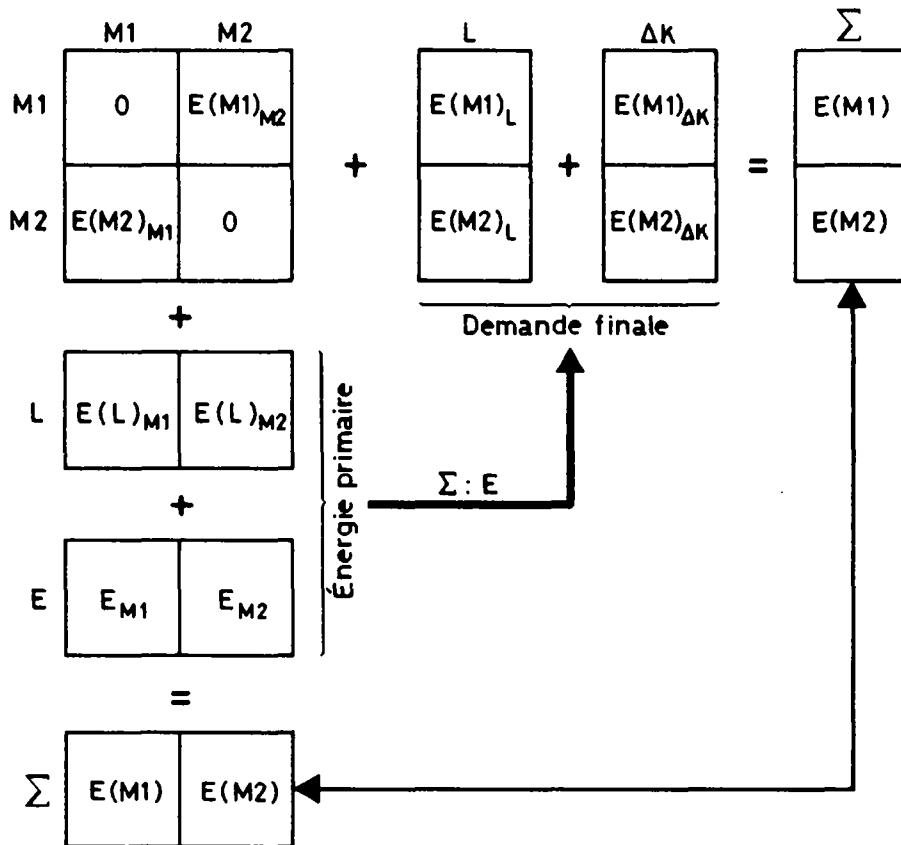


Fig. 1.16 Consommation privée et formation de capital exogènes.

On voit donc :

- qu'il n'y a plus de connexion entre la consommation et la formation de capital, par le biais du travail,

- que cette opération de désagrégation du tableau a supprimé l'énergie directe  $E_L$ , consommée par les consommateurs. Toute l'énergie primaire se retrouvant dans la demande finale, il s'ensuit que :

$$E(L)_{M1} + E(L)_{M2} = E_L$$

c'est-à-dire que l'énergie contenue dans le travail se résume à l'énergie directe consommée  $E_L$ . Autrement dit, on ne tient pas compte de l'énergie indirecte contenue dans les biens consommés par les consommateurs.

Finalement, la figure 1.10 qui est le schéma général des flux d'énergie se combinant dans le processus économique se résume à la figure 1.17, beaucoup plus simple.

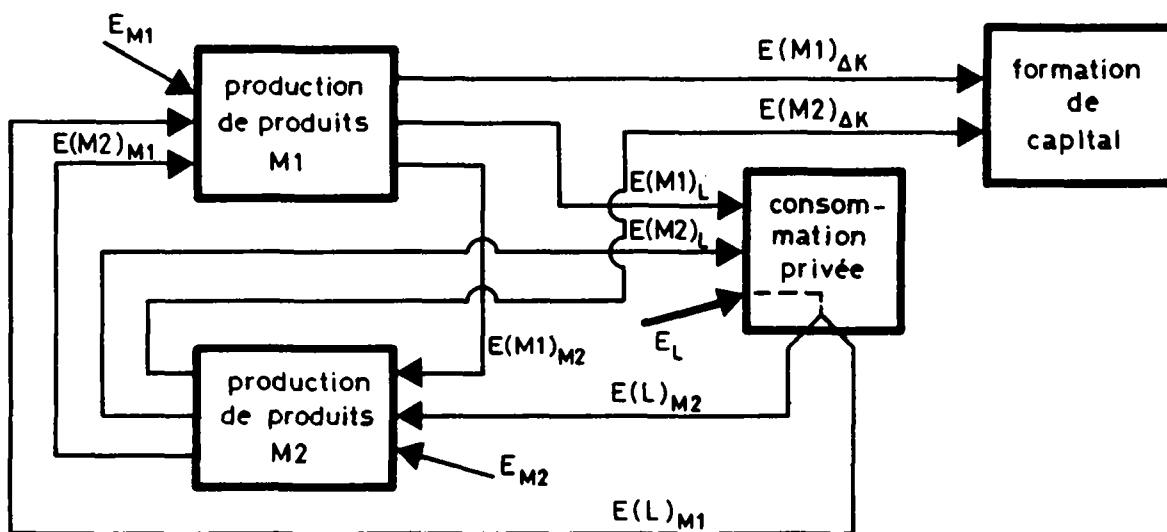


Fig. 1.17 Approche simplifiée où consommation privée et formation de capital sont exogènes.

(ii) Deuxième stade : l'analyse par processus

On part maintenant de la méthode précédente à partir de laquelle des simplifications supplémentaires peuvent être opérées.

L'inversion de la matrice  $(I-A)^{-1}$  correspond à considérer toutes les rétroactions entre les secteurs producteurs qui composent le système

économique. Or cette matrice est décomposable (voir §1.1.2 (ii)):

$$(I-A)^{-1} = I + A + A^2 + \dots + A^i + \dots$$

En s'arrêtant au pas  $i$ , on néglige tous les termes d'ordre supérieur, donc toute une série de rétroactions. Certes, au fur et à mesure que  $i$  croît, toutes les contributions supplémentaires diminuent. On peut alors étudier non plus un système global mais un processus précis où les contributions intermédiaires, au fur et à mesure qu'elles deviennent petites, sont négligées. Ceci s'explique en raisonnant en termes énergétiques. La figure 1.18 montre un exemple simple de production de trois produits où quelques influences ne sont pas comptées. Il va de soi que cet exemple peut s'intégrer dans un cas plus général : ainsi on peut simplifier la figure 1.17 en faisant  $E(M2)_{M1} = 0$ , ou  $E(M1)_L = 0$  etc...

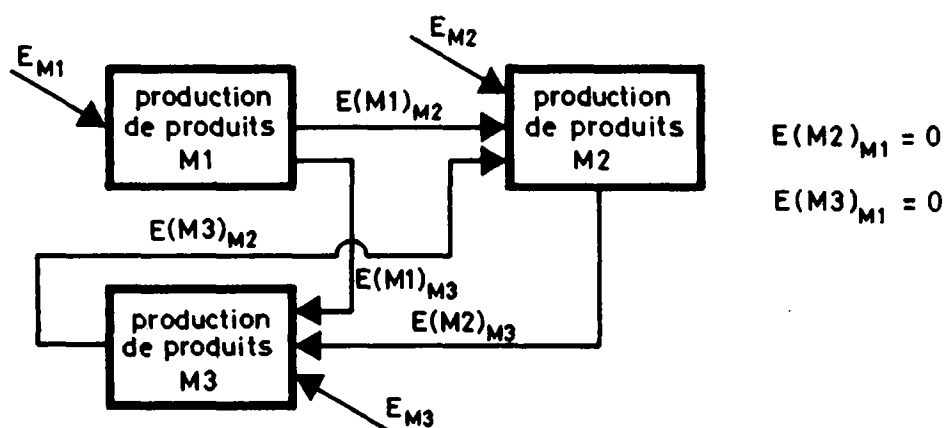


Fig. 1.18 Quelques interactions négligées. On ne considère de plus ni travail humain, ni capital physique.

La figure 1.19 donne, à titre d'exemple, l'énergie nécessaire à la fabrication de  $1 \text{ m}^2$  de paroi isolée, trouvée par une analyse par processus, en considérant deux agents énergétiques : l'électricité (kWh) et la chaleur (kcal). On notera qu'il y a ici aucune rétroaction, que l'énergie investie dans les installations de fabrication, dans le transport, le logement du personnel, etc... est négligée. De même, les pertes d'énergie n'apparaissent pas.

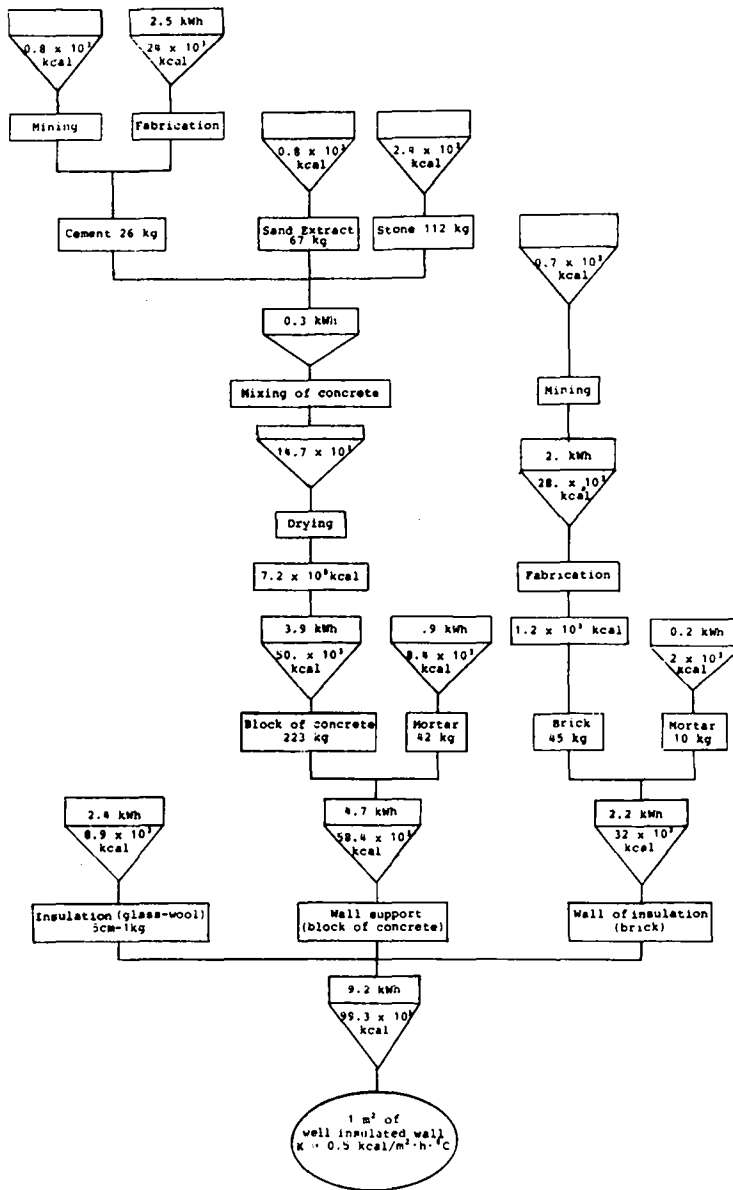


Fig. 1.19 Analyse par processus du contenu énergétique d'un m<sup>2</sup> de mur. ( source : J.-P. Charpentier, J.-M. Beaujean, 1977, p. 274 )

L'intérêt de l'analyse par processus est de pouvoir raisonner en quantités physiques. Néanmoins les hypothèses sont telles que la dispersion des valeurs obtenues peut être très forte. De plus, ces hypothèses ne sont que très rarement spécifiées. Par exemple, lors de la production d'un kg d'aluminium à partir de la bauxite, I. Boustead et G.F. Hancock (1979) ont recueilli dans la littérature des valeurs de contenu énergétique de 100 MJ/kg (processus principal uniquement, donc pas de contribution intermédiaire) à 260 MJ/kg (système non spécifié, peut-être avec transport, capital et services).

Finalement, il est possible de combiner l'analyse pas processus et l'analyse Entrées-Sorties : c'est l'analyse hybride (voir C.W. Bullard, P.S. Penner et D.A. Pilati, 1978).

(iii) Troisième stade : l'analyse statistique

Le troisième stade consiste à négliger toutes les contributions intermédiaires. Connaissant la quantité produite (par exemple tonnes d'acier) par une industrie et l'énergie nécessaire que l'industrie a dû acheter pour le déroulement du processus, on en déduit le nombre de joules par tonne d'acier. Si l'on divise ce contenu par le prix de l'acier, on trouve l'intensité énergétique de l'industrie. On ne prend donc en compte ni l'énergie contenue dans les biens intermédiaires, ni, à fortiori, l'énergie contenue dans le capital et dans le travail nécessaires à la production. La figure 1.20 illustre ce cas.



Fig. 1.20 Représentation de l'analyse statistique.

De plus, les pertes énergétiques sont toujours négligées. Cette analyse est qualifiée de statistique eu égard aux informations statistiques dont il faut disposer (et qui servent de base aussi pour les autres méthodes).

#### 1.4 CONCLUSIONS

Dans ce chapitre, nous avons présenté :

- au niveau économique, le tableau des échanges inter-industriels qui s'intègre parfaitement dans le cadre de la comptabilité des agrégats en valeur (PIB, valeur ajoutée). Du fait de son niveau de désagrégation, il est une représentation et une description détaillées de la structure économique de l'ensemble étudié puisqu'il fait intervenir toutes les activités économiques;
- au niveau énergétique, la difficulté de donner une définition précise de l'énergie utile dont l'essentiel, même après avoir été utilisée par les consommateurs, se dissipe sous forme de chaleur. La part qui ne l'est pas est l'énergie investie dans les biens;
- au niveau des liaisons énergie-économie, une approche générale qui concilie les vues de l'ingénieur et celles de l'économiste en introduisant le concept de contenu énergétique par unité de valeur. Le modèle élaboré fait intervenir la production de tous les biens et services, l'énergie, la consommation, le travail humain, la formation de capital physique et le capital physique existant qui s'utilise lors des activités de production et de consommation. Ce modèle est caractérisé par les flux d'énergie qui ont lieu entre toutes les activités qui composent le processus économique, et par le bilan d'énergie qui suit le premier principe de la thermodynamique.

Il faut considérer les pertes d'énergie. Nous étudierons le processus économique, au chapitre suivant, sur la base du second principe de la thermodynamique qui mettra en évidence l'irréversibilité du processus économique.



## CHAPITRE 2

### LE PROCESSUS ÉCONOMIQUE

Nous avons analysé au chapitre précédent les flux d'énergie entre les diverses activités qui constituent le processus économique. Nous avons en particulier mis en évidence les pertes d'énergie et la direction des flux d'énergie. Ainsi, les flux sont dirigés d'un producteur à un consommateur; dans un processus réel de production il n'est pas possible d'inverser la direction d'un flux d'énergie. Ces observations impliquent que la nature du processus économique est irréversible et il devient tentant d'étudier le système économique comme un système thermodynamique ouvert, où ont lieu des échanges d'énergie et de matière avec l'extérieur.

Nous commencerons par rappeler quelques éléments de thermodynamique des processus irréversibles ou thermodynamique du non-équilibre et présenterons les concepts de destruction d'exergie, mesurant l'irréversibilité d'un processus, ainsi que les concepts de forces et flux généralisés. Nous étudierons ensuite un interface offreur - demandeur où un flux physique s'établit de l'offreur vers le demandeur et supposerons que des forces conditionnent ce flux.

Nous introduirons les concepts de contenu énergétique et de prix, discuterons les résultats obtenus et développerons notre approche. Finalement, nous proposerons un modèle de processus économique global où de l'énergie est prélevée à l'environnement, transformée et investie sous forme de capital physique. C'est à ce stade que nous définirons l'énergie utile, des pertes d'énergie ayant eu lieu tout au long des transformations.

Nous désirons rendre attentif le lecteur aux points suivants :

- nous mettons en place dans ce chapitre les éléments qui nous semblent importants pour ouvrir une nouvelle voie de recherche. Notre but n'est pas de nous substituer à l'économiste mais de montrer comment une approche d'ingénieur peut être utilisée pour établir un certain parallèle entre économie et thermodynamique, pour étendre le champ d'investigation dans le domaine de l'économie énergétique et pour améliorer peut-être par la suite la compréhension des phénomènes économiques. Nous n'emploierons que certains des nombreux concepts élaborés par les économistes.

Il n'est pas question d'aborder ici dans une perspective microéconomique les actions des individus, les éléments de décision qui interviennent dans le jeu économique, la détermination des prix et l'équilibre économique général. Notre but sera atteint si nous avons pu montrer l'importance de l'énergie pour le déroulement du processus économique, en proposant un formalisme mathématique simple qui mette en évidence l'irréversibilité du processus.

- nous ne nous intéresserons ici qu'au premier volet de la thermodynamique des processus irréversibles sans tenir compte des récents développements ayant trait aux structures dissipatives, aux conditions de stabilité, etc... Il nous semble néanmoins que ces développements devraient trouver un vaste champ d'application en économie dans le futur.

En définitive, nous proposerons une analogie entre le processus économique et un processus thermodynamique irréversible en introduisant quelques concepts thermodynamiques. Cela implique que le modèle élaboré reste encore simple. Les résultats que nous obtiendrons n'apporteront peut-être pas encore d'enseignements nouveaux à l'économiste sur le problème de la détermination des prix, sur la loi d'offre et de la demande, etc... Nous considérerons les prix comme exogènes au modèle, suivant la même approche que développent depuis quelques années certains économistes qui font l'hypothèse, dans un premier temps, que les prix varient infiniment plus lentement que les flux.

Il n'en reste pas moins que les points que nous développons ci-après sont importants pour mettre en évidence l'irréversibilité du processus économique, l'intérêt de processus hors équilibre et apporter ainsi une contribution à un problème qui depuis longtemps intéresse économistes et ingénieurs.

## 2.1 RAPPEL DE NOTIONS DE THERMODYNAMIQUE ET INTRODUCTION A LA THERMODYNAMIQUE DES PROCESSUS IRREVERSIBLES

Nous résumerons ici quelques éléments de thermodynamique importants pour la suite de l'exposé. Ils doivent permettre au lecteur de se familiariser avec le concept d'exergie, le compte de l'exergie et les forces et flux généralisés. Nous éviterons de faire appel, autant que possible, à des notions qui ne sont pas nécessaires dans la suite. Nous présenterons ces éléments du point de vue de l'ingénieur dans un esprit pratique. Le lecteur est invité pour les développements à se reporter aux ouvrages et textes de référence qui nous ont servi : P. Souchay (1961), K.G. Denbigh (1965), G. Bruhat (1968), I. Prigogine (1968), R.B. Evans (1966, 1969), L. Borel (1979).

### 2.1.1 Notions de thermodynamique

- (i) - Un système thermodynamique est un ensemble de masse déterminée et délimité dans l'espace, suffisamment grand pour que des propriétés macroscopiques puissent y être définies. Ces propriétés permettent de décrire l'état du système : volume, pression, température, énergie,....
- Les limites du système doivent être précisées avec attention afin de le séparer de l'extérieur du système (milieu extérieur).
  - Un système peut être isolé, fermé ou ouvert :
    - un système isolé n'échange ni matière ni énergie avec l'extérieur;
    - un système fermé n'échange pas de matière avec l'extérieur;
    - un système ouvert échange matière et énergie avec l'extérieur.
  - Un système thermodynamique a subi un processus thermodynamique entre deux instants si au moins une des propriétés du système a varié entre ces deux instants.
- (ii) - Un système est à l'état d'équilibre lorsqu'il ne se produit aucune modification à l'intérieur du système au cours du temps (G. Bruhat, 1968, p. 22). Cette définition ne s'applique qu'à des systèmes isolés : on parle d'équilibre statique.

- Un système est en état stationnaire s'il est ouvert et s'il ne se produit aucune modification des propriétés du système au cours du temps. C'est un état de pseudo-équilibre (équilibre dynamique pour certains auteurs). L'état stationnaire peut être plus ou moins éloigné de l'équilibre : on parlera alors de système en état stationnaire proche de l'équilibre ou loin de l'équilibre. Pour se maintenir à l'état stationnaire, un système a besoin en permanence d'énergie et de matière.
- Un état de référence est par définition un état d'équilibre pour lequel le système ne peut fournir un travail mécanique.

(iii) Le concept de réversibilité d'un processus fait appel en thermodynamique à deux conditions (G. Bruhat, 1968, p. 27) :

- d'une part, un temps infiniment long pour réaliser le processus, afin que les valeurs des propriétés d'un système restent infiniment voisines des valeurs des propriétés qui caractérisent le système à l'équilibre. La transformation progressive du système peut être considérée, à des infiniment petits près des variables, comme une succession continue d'états d'équilibre voisins. Le sens de la transformation peut être inversé en modifiant infiniment peu les forces.
- d'autre part, il est nécessaire qu'il n'y ait pas de phénomènes dissipatifs (viscosité, frottement,...) qui sont fonction de la vitesse de la transformation.

Les deux conditions ci-dessus sont théoriques. En pratique, tout processus est irréversible :

- d'une part parce que la vitesse d'un processus est finie (c'est-à-dire n'est pas infiniment petite). Ainsi, les échanges de chaleur sont plus ou moins rapides, les écarts de température les commandant étant finis;
- d'autre part, parce qu'il y a toujours des effets dissipatifs.

(iv) Le premier principe de la thermodynamique est le principe de la conservation de l'énergie. Il affirme que la somme de toutes les énergies (cinétique, potentielle, calorifique, électrique, chimique,...) d'un système isolé est constante. Autrement dit, l'énergie peut se transformer dans une forme ou une autre, mais ne peut être créée, ni détruite (P. Souchay, 1961, p. 17). Pour un système ouvert, le taux de variation dans le temps de l'énergie totale d'un système est égal à la somme de tous les flux d'énergie entrant dans le système diminuée de la somme de tous les flux d'énergie en sortant.

(v) Le second principe de la thermodynamique postule l'existence d'une fonction d'état, dénommée entropie, qui ne se conserve que dans les processus réversibles. Dans le cas de processus irréversibles, il y a création d'entropie. Le compte de l'entropie d'un système est tel que :

$$dS = \delta_e S + \delta_i S$$

où  $dS$  est la production de l'entropie du système

$\delta_e S$  est l'échange d'entropie avec le milieu extérieur.

$\delta_i S$  est la production d'entropie due aux changements internes du système. Ce terme caractérise l'irréversibilité du processus et en mesure quantitativement l'importance. Ce terme est toujours positif pour les processus irréversibles. Dans les processus réversibles, il est nul :

- processus irréversibles :  $\delta_i S > 0$

- processus réversibles :  $\delta_i S = 0$

(vi) L'exergie est une fonction d'état définie par rapport à un état de référence et qui ne se conserve que dans des processus à entropie constante. On démontre que la diminution de de l'exergie d'un système entre deux états est égale au travail fourni par le système dans un processus isentropique (voir P. Chartier et al., 1975, p. 42). Ce travail

est utile (car diminué du travail d'expansion du système contre le milieu extérieur, non récupérable à l'arbre d'une machine) et maximal car isentropique. L'exergie d'un système à l'état de référence est par définition nulle. L'exergie permet donc de repérer l'état auquel se trouve le système par rapport à l'état de référence.

- (vii) Si l'on s'intéresse aux flux d'énergie et de matière entrant ou sortant d'un système ouvert, on peut associer à ces flux une certaine quantité d'exergie entrant ou sortant du système. On parlera alors de flux exergétique entrant ou sortant du système.
- (viii) Dimensionnellement, ce flux exergétique a la dimension d'une puissance puisque la variation dans le temps du travail est une puissance. Nous dirons que la variation dans le temps de l'exergie est une puissance utilisable (sous-entendu : par rapport à un état de référence et sous certaines conditions).
- (ix) Un processus irréversible est caractérisé par une production d'entropie. A celle-ci correspond une destruction d'exergie, c'est-à-dire que la possibilité de produire un travail disparaît. Par exemple dans le cas d'un transfert-chaleur irréversible entre deux sources isothermes, il y a destruction d'exergie. La vitesse de destruction d'exergie,  $-\dot{E}_x$ , est proportionnelle à la vitesse de création d'entropie,  $\dot{S}$ , pour les processus irréversibles (P. Chartier et al., 1975; L. Borel, 1979) :

$$-\dot{E}_x = T_0 \cdot \dot{S} > 0$$

$T_0$  est la température de référence. Dans les processus réversibles, l'exergie se conserve : il n'y a pas destruction d'exergie.

- (x) Les processus irréversibles sont des processus qui se font dans un certain sens. C'est ce qu'exprime le deuxième principe de la thermodynamique grâce au compte de l'entropie. Celui-ci peut être transformé en compte de l'exergie où la destruction interne d'exergie est

mise en évidence (R.B. Evans, 1969; L. Borel, 1979). Dans le cas d'un système en état stationnaire, ce compte se réduit à :

$$-{}_i\dot{E}x = {}_e\dot{E}x$$

où  ${}_e\dot{E}x$  est le flux exergétique net entrant dans le système.

(xi) Les flux exergétiques étant des puissances utilisables, le compte de l'exergie, toujours en état stationnaire, se réduit à :

$$-{}_i\dot{E}x = P_1 - P_2$$

La vitesse de destruction d'exergie est égale à la différence entre la puissance utilisable à l'entrée du système  $P_1$  et la puissance utilisable à la sortie  $P_2$ .

### 2.1.2 Flux généralisés et forces généralisées

La thermodynamique des processus irréversibles a pu caractériser la vitesse de création d'entropie comme étant proportionnelle à une somme de produits de flux généralisés  $J_i$  multipliés par des forces généralisées  $X_i$  conjuguées aux flux (K.G. Denbigh, 1951; I. Prigogine, 1968) :

$${}_i\dot{S} = \frac{1}{T_0} \cdot \sum_i J_i \cdot X_i,$$

c'est-à-dire :

$$-{}_i\dot{E}x = \sum_i J_i \cdot X_i$$

Il est admis que les flux généralisés s'établissent lorsque des forces généralisées les engendrent. Il y a un large choix possible dans la définition des forces. La grandeur des forces dépend de la grandeur du flux correspondant. Seule l'expérience permet de valider le choix des forces et des flux correspondants. Nous présentons ici quelques processus irréversibles en exprimant la vitesse de destruction d'exergie. Nous introduirons l'opérateur différence  $\Delta$  tel que, pour une grandeur  $G$  :  $\Delta G = G_2 - G_1$ .

(i) Transfert de puissance-chaaleur  $\dot{Q}$  entre deux sources isothermes ( $T_1 > T_2$ )

La vitesse de la destruction de l'exergie au sein du système est :

$$-{}_i\dot{E}x = T_0 \cdot \dot{Q} \cdot \left( \frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right)$$

qui s'écrit en introduisant l'opérateur  $\Delta$  :

$$-{}_i\dot{E}x = T_0 \cdot \dot{Q} \cdot \Delta \left( \frac{1}{T} \right) \quad (2.1)$$

La force généralisée est donc  $\Delta \left( \frac{1}{T} \right) = - \Delta \left( -\frac{1}{T} \right)$ . Si la différence de température  $\Delta T$  est petite par rapport à la température absolue moyenne, on peut écrire :  $\Delta \left( \frac{1}{T} \right) = - \left( \frac{\Delta T}{T^2} \right)$ . Dans ces conditions, la force généralisée est proportionnelle à la force motrice conventionnelle de Fourier  $\Delta T$ . Certains auteurs expriment cette force ainsi :  $\frac{\Delta T}{T}$ . On peut en effet écrire :

$$-{}_i\dot{E}x = \dot{Q} \cdot \left[ - \left( 1 - \frac{T_0}{T_2} \right) + \left( 1 - \frac{T_0}{T_1} \right) \right] = \dot{Q} \cdot \left[ - \frac{T_2 - T_0}{T_2} + \frac{T_1 - T_0}{T_1} \right]$$

On reconnaît le facteur de Carnot  $\theta = \frac{T - T_0}{T}$  qui joue le rôle d'une force généralisée.

(ii) Courant électrique

La vitesse de la destruction de l'exergie dans le cas d'un courant électrique  $I$  à la température  $T$  engendré par une différence de potentiel  $U_1 - U_2$  ( $U_1 > U_2$ ) est :

$$-{}_i\dot{E}x = \frac{T_0}{T} \cdot I \cdot (U_1 - U_2) = T_0 \cdot I \cdot \left( - \frac{\Delta U}{T} \right) \quad (2.2)$$

où  $T_0$  est la température de référence. La force généralisée est  $\left( - \frac{\Delta U}{T} \right)$ .



(iii) Flux isotherme d'un fluide incompressible

La vitesse de la destruction de l'exergie dans le cas d'un fluide incompressible poussé à travers un filtre à la température  $T$  et avec un débit  $D$  est :

$$-{}_i\dot{E}x = \frac{T_0}{T} \cdot D \cdot (p_1 - p_2) = T_0 \cdot D \cdot \left(-\frac{\Delta p}{T}\right) \quad (2.3)$$

où  $T_0$  est la température de référence et  $p_1$  et  $p_2$  les pressions à l'entrée et à la sortie. La force généralisée est  $\left(-\frac{\Delta p}{T}\right)$ .

(iv) Interdiffusion de gaz parfaits

La vitesse de la destruction de l'exergie dans le cas d'une interdiffusion isotherme à la température  $T$  de gaz parfaits  $j$  (potentiel chimique initial  $\mu_{j_i}$ , final  $\mu_{j_f}$ ; vitesse  $J_j$ ) est :

$$-{}_i\dot{E}x = T_0 \cdot \sum_j J_j \cdot \frac{\mu_{j_i} - \mu_{j_f}}{T} = T_0 \cdot \sum_j J_j \left(-\frac{\Delta\mu_j}{T}\right) \quad (2.4)$$

où  $\left(-\frac{\Delta\mu_j}{T}\right)$  est la force généralisée.

P. Chartier et al. (1975, p. 167) ont montré que dans le cas d'une diffusion non-isotherme, le processus correspondrait à un processus de transport de matière et un processus de transport de chaleur. La force généralisée est alors  $-\Delta\left(\frac{\mu}{T}\right)$ . En développant cette expression on a en effet :

$$-\Delta\left(\frac{\mu}{T}\right) = -\frac{\Delta\mu}{T} - \mu \cdot \Delta\left(\frac{1}{T}\right)$$

Pour un seul gaz qui diffuse, la vitesse de destruction de l'exergie est alors :

$$-{}_i\dot{E}x = T_0 \cdot J \cdot \Delta\left(-\frac{\mu}{T}\right) \quad (2.5)$$

### 2.1.3 Relations phénoménologiques entre forces généralisées et flux généralisés

L'expérience montre que, généralement, si une force généralisée augmente, le flux correspondant augmente aussi. Nous dirons qu'il y a une relation phénoménologique entre forces et flux généralisés. Ces relations doivent être vérifiées par l'expérience. A l'équilibre, les forces et les flux sont par définition simultanément nuls. Il devient alors naturel de supposer qu'au voisinage de l'équilibre les flux sont proportionnels aux forces qui les engendrent. Ainsi, dans les exemples précédents :

- cas (i) : le flux de chaleur est proportionnel au gradient de température. C'est la loi de Fourier.
- cas (ii) : le courant électrique est proportionnel au gradient de potentiel électrique. C'est la loi d'Ohm.
- cas (iii) : le débit est proportionnel au gradient de pression. C'est la loi de Darcy.
- cas (iv) : le flux de diffusion est proportionnel au gradient de concentration. C'est la loi de Fick. Si le système est proche de l'équilibre, ce flux devient proportionnel à la force généralisée correspondante (potentiel chimique).

Dans tous ces exemples, on peut écrire :

$$J = L \cdot X \quad (2.6)$$

où  $L$  est un coefficient de proportionnalité entre le flux  $J$  et la force  $X$ . On l'appellera coefficient phénoménologique. Les relations de ce type sont des relations directes, où un flux est engendré par la force correspondante. Or, il y a souvent des effets de couplage dus à plusieurs processus irréversibles ayant lieu simultanément : par exemple, les phénomènes thermoélectriques ou les réactions chimiques couplées. Il arrive alors qu'un flux existe, provoqué par une autre force que la force correspondante. Dans le cas où plusieurs processus irréversibles se produisent dans un même système, on écrira, au voisinage de l'équilibre, pour chaque flux :

$$J_i = \sum_j L_{ij} \cdot X_j \quad (2.7)$$

Les coefficients  $L_{ij}$  pour  $i=j$  sont les coefficients directs. Les coefficients  $L_{ij}$  pour  $i \neq j$  sont les coefficients de couplage indiquant l'influence de la force  $X_j$  sur le flux  $J_i$ . A l'équilibre toutes les forces et tous les flux sont simultanément nuls. L. Onsager (1931) a établi que les coefficients de couplage  $L_{ij}$  étaient réciproques :

$$L_{ij} = L_{ji} \quad (2.8)$$

Ces équations expriment ainsi qu'il y a réciprocity entre le flux  $J_i$  commandé par la force  $X_j$  et le flux  $J_j$  commandé par la force  $X_i$ . Il s'ensuit que la matrice des coefficients phénoménologiques est symétrique.

Ce n'est pas le lieu de discuter ici la validité des relations linéaires et des relations d'Onsager, d'autant plus que seule l'expérience permet de les infirmer ou de les confirmer. Néanmoins, il nous semble utile de faire quelques remarques :

- Une première hypothèse, pour vérifier les relations linéaires entre forces et flux, est que le système soit au voisinage de l'équilibre et en état stationnaire. On parle alors d'états stationnaires en thermodynamique linéaire. Loin de l'équilibre, on ne peut généralement écrire des relations linéaires : d'autres effets interviennent. On introduit alors la notion de structure dissipative dont l'étude a débuté il y a quelques années (P. Glansdorff, I. Prigogine, 1971; J.M. Giovannoni, 1977).
- Une deuxième hypothèse est que les coefficients  $L_{ij}$  soient des constantes. Or, il arrive que ces coefficients dépendent eux-mêmes de la force.
- Une troisième hypothèse est la relation d'Onsager. Elle peut ne pas être vérifiée (quand il y a des champs magnétiques, des forces de Coriolis, ...).

## 2.2 ETUDE D'UN INTERFACE OFFREUR – DEMANDEUR

Nous voulons reprendre ici quelques enseignements de la thermodynamique des processus irréversibles pour les appliquer à l'étude d'un interface offreur – demandeur. Notre but n'est pas d'entrer dans la théorie économique mais de montrer dans une nouvelle approche, comment quelques concepts économiques peuvent être exprimés en termes de flux et de forces. Nous commencerons par supposer qu'il y a irréversibilité d'un transfert de biens entre un offreur et un demandeur de ces biens, qui se manifeste par un flux de biens dirigé vers le demandeur. Nous choisirons alors les forces qui engendrent ce flux de biens. De même, et puisqu'une certaine quantité d'énergie est contenue dans ce flux de biens, il y a un flux d'énergie associé qui est dirigé de l'offreur vers le demandeur. Nous verrons que les forces qui commandent ce flux sont les prix et que l'irréversibilité du processus se manifeste par un accroissement du prix de la quantité transférée entre l'offreur et le demandeur. Nous proposerons une première interprétation de ce résultat par la notion de profit qui permet au système de ne plus être à l'équilibre. L'approche envisagée sera ensuite étendue à l'étude de la variation de la demande d'un bien à la suite d'une variation imposée de prix autour de la position d'équilibre économique. Les fonctions de demande apparaîtront alors être des relations phénoménologiques entre forces et flux. Nous montrerons la réciprocité des relations d'Onsager dans le cas d'une variation de plusieurs prix autour de l'équilibre entraînant la variation de la demande de plusieurs biens. Finalement, une dernière voie sera explorée, tenant compte des pertes d'énergie lors d'un processus de production. Ces pertes entraînent l'augmentation du prix de la quantité produite afin que la valeur de la production soit égale à la valeur des facteurs primaires et biens intermédiaires nécessaires.

### 2.2.1 Définitions : contenus énergétiques et prix

Procédons à quelques définitions :

- Soit  $P$  la quantité physique d'un bien (par exemple tonnes d'acier).
- Soit  $V$  la valeur de cette quantité physique (par exemple francs).
- Le prix d'une unité physique de bien (francs par tonne d'acier par exemple) est :

$$p = \frac{V}{P} \quad (2.9)$$

- Nous avons vu qu'une certaine quantité d'énergie est contenue dans les biens. Soit  $E$  la quantité d'énergie (joules) contenue dans la quantité physique de bien considérée.
- Définissons le contenu énergétique par unité physique,  $e^*$ , (joules par tonne d'acier, par exemple) comme le rapport de la quantité d'énergie à la quantité physique :

$$e^* = \frac{E}{P} \quad (2.10)$$

- Supposons que l'on puisse de même associer une quantité d'énergie  $E$  à la valeur. Définissons le contenu énergétique par unité de valeur,  $e$ , (joules par franc, par exemple) comme le rapport de la quantité d'énergie à la valeur :

$$e = \frac{E}{V} \quad (2.11)$$

- On a donc la relation suivante liant les contenus énergétiques :

$$e^* = e \cdot p \quad (2.12)$$

### 2.2.2 Transfert d'un bien entre un offreur et un demandeur

#### Flux physique, flux d'énergie. Forces généralisées

Nous nous intéresserons ici au transfert d'une certaine quantité physique de bien entre un offreur et un demandeur de ce bien.

- (i) Supposons un offreur et un demandeur du même bien (par exemple d'acier). Appelons  $P_1$  la quantité physique de ce bien que possède l'offreur (indice 1) et  $P_2$  la quantité physique de ce même bien que possède le demandeur (indice 2), à l'instant  $T$ .  $P_1$  et  $P_2$  sont donc des stocks de ce bien. Soient  $e^*_1$  et  $e^*_2$  les contenus énergétiques par unité physique de ces biens, respectivement au niveau de l'offreur et au niveau du demandeur. Chacun possède donc les quantités d'énergie sous forme indirecte (stocks) :

$$E_1 = e^*_1 \cdot P_1 \quad \text{et} \quad E_2 = e^*_2 \cdot P_2 \quad (2.13)$$

Soient d'autre part  $E$  et  $P$  respectivement les quantités totales d'énergie et de biens possédées par l'offreur et le demandeur. On a :

$$E = E_1 + E_2 \quad \text{et} \quad P = P_1 + P_2 \quad (2.14)$$

- (ii) Imaginons que l'offreur transfère une partie de son stock de biens vers le demandeur. Un flux physique s'établit donc de l'offreur vers le demandeur et, par suite, aussi un flux d'énergie. Faisons l'hypothèse que lors de ce transfert, il y a conservation de l'énergie et conservation de la matière : il n'y a ni usure physique des biens ni perte de biens. On a donc :

$$\begin{array}{ll} E = \text{constante} & \longrightarrow \quad \dot{E}_1 = -\dot{E}_2 \\ P = \text{constante} & \longrightarrow \quad \dot{P}_1 = -\dot{P}_2 \end{array} \quad (2.15)$$

$\dot{E}_1, \dot{P}_1$  (tous deux négatifs puisque le stock de l'offreur diminue),  
 $\dot{E}_2, \dot{P}_2$  (tous deux positifs puisque le stock du demandeur augmente)  
sont des flux.

Il s'ensuit que lorsqu'il y a conservation de l'énergie et de la matière :

$$\begin{aligned} e^*_1 &= e^*_2 \\ \Delta e^* &= e^*_2 - e^*_1 = 0 \end{aligned} \quad (2.16)$$

- (iii) Puisqu'il y a établissement d'un flux, nous admettrons qu'il y a une force généralisée qui a engendré ce flux. Il est entendu que les forces ne sont pas à priori liées aux flux de manière simple. Elles doivent être choisies en accord avec les flux définis (unités dimensionnelles) et les résultats obtenus. Ce sont donc les forces généralisées qui commandent le flux physique et le flux d'énergie entre un offreur et un demandeur et que nous nous proposons d'étudier.

- (iv) Nous savons que la vitesse de destruction d'exergie est égale à une somme de produits de forces et de flux généralisés et qu'elle s'exprime en unités énergétiques. Intéressons-nous au flux physique  $\dot{P}_1 = -\dot{P}_2$ . La force qui détermine ce flux physique doit être exprimée en joules par unité physique. Supposons au premier abord que cette force soit justement le contenu énergétique par unité physique et que ce contenu joue le rôle d'une force de pression. La vitesse de la destruction d'exergie est alors donnée par :

$$-{}_i\dot{E}x = -e^*_1 \cdot \dot{P}_1 - e^*_2 \cdot \dot{P}_2$$

où  $-e^*_1 \cdot \dot{P}_1$  est la puissance utilisable d'entrée (offreur) et  $e^*_2 \cdot \dot{P}_2$  la puissance utilisable de sortie (demandeur). Dans le cas où il y a conservation de la matière et de l'énergie, on a  $\dot{P}_1 = -\dot{P}_2$  et  $e^*_1 = e^*_2$  (équ. (2.16)). Cela implique que  ${}_i\dot{E}x = 0$ , bien qu'il y ait un flux qui se soit établi.

- (v) Cherchons des forces qui rendent ce processus irréversible, c'est-à-dire la vitesse de destruction d'exergie non nulle. Nous choisirons alors comme force engendrant le flux physique le contenu énergétique par unité de valeur,  $e$ , que multiplie un prix de référence de bien  $p_0$  pour respecter les dimensions. La vitesse de la destruction d'exergie est égale à :

$$\begin{aligned} -{}_i\dot{E}x &= -p_0 \cdot e_1 \cdot \dot{P}_1 - p_0 \cdot e_2 \cdot \dot{P}_2 \\ &= -p_0 \cdot (e_1 \cdot \dot{P}_1 + e_2 \cdot \dot{P}_2) \end{aligned} \quad (2.17)$$

Dans le cas où  $\dot{P}_1 = -\dot{P}_2$ , on a :

$$\begin{aligned} -{}_i\dot{E}x &= -p_0 \cdot \dot{P}_1 \cdot (e_1 - e_2) = -p_0 \cdot \dot{P}_2 \cdot (e_2 - e_1) \\ &= p_0 \cdot \dot{P}_1 \cdot \Delta e = -p_0 \cdot \dot{P}_2 \cdot \Delta e \end{aligned} \quad (2.18)$$

(Rappelons que  $\dot{P}_1 < 0$  et  $\dot{P}_2 > 0$ ).

On retrouve donc une expression analogue aux équations (2.2) à (2.4) pour le cas de processus physiques. Puisque  $-\dot{E}_x > 0$  on doit toujours avoir :

$$\Delta e < 0 \rightarrow e_1 > e_2$$

Le contenu énergétique par unité de valeur du côté de l'offreur est toujours supérieur au contenu énergétique par unité de valeur du côté du demandeur.

(vi) Nous allons préciser l'analogie qui existe entre l'équation (2.18) et le cas de la diffusion d'un gaz parfait dans un milieu non-isotherme. Puisque  $e^* = e \cdot p$  (équ. (2.12)), l'équation (2.18) s'écrit :

$$-\dot{E}_x = -p_0 \cdot \dot{P}_2 \cdot \Delta \left( \frac{e^*}{p} \right) \quad (2.19)$$

Ainsi le prix joue dans notre modèle le rôle d'une température. Nous allons alors montrer que c'est précisément le prix qui est la force qui engendre le flux d'énergie associé au flux physique. La figure 2.1 représente flux et forces généralisées qui ont lieu entre un offreur et un demandeur.

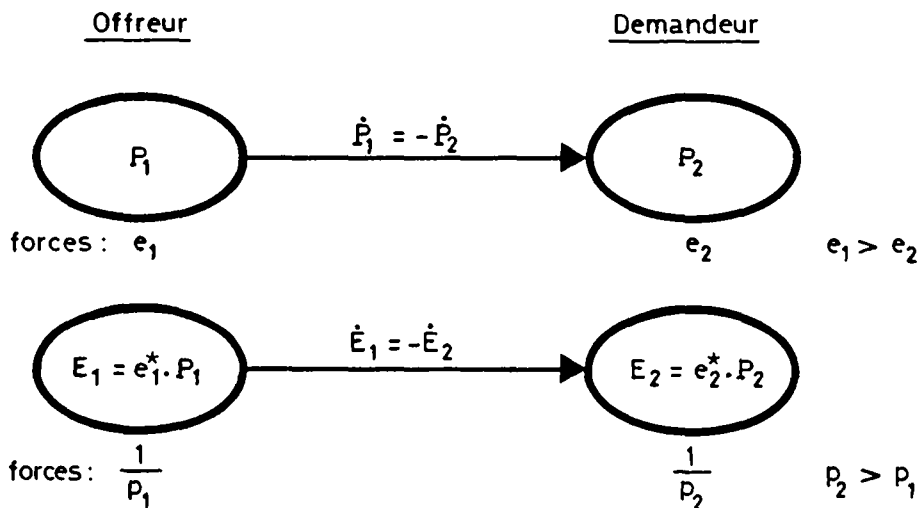


Fig. 2.1 Flux physique et flux d'énergie entre un offreur et un demandeur et forces correspondantes (avec conservation de l'énergie :  $e_1^* = e_2^*$ ).



A partir de l'équation (2.19), on peut écrire<sup>1/</sup> :

$$\begin{aligned}
 -_i\dot{E}x &= -p_0 \cdot \dot{P}_2 \cdot \Delta \left( \frac{e^*}{p} \right) \\
 &= -p_0 \cdot \dot{P}_2 \cdot \frac{\Delta e^*}{p_1} - p_0 \cdot \dot{P}_2 \cdot e^*_2 \cdot \Delta \left( \frac{1}{p} \right) \\
 &= p_0 \cdot \dot{E}_2 \cdot \Delta \left( -\frac{1}{p} \right) = -p_0 \cdot \dot{E}_1 \cdot \Delta \left( -\frac{1}{p} \right) \quad (2.20)
 \end{aligned}$$

puisque  $\Delta e^* = 0$  s'il y a conservation de l'énergie. On a donc des expressions analogues au signe près à l'équation (2.1) pour le cas d'un transfert de chaleur entre deux sources isothermes : au signe près, les prix jouent le même rôle vis-à-vis du flux d'énergie associé au flux physique que la température vis-à-vis du flux de chaleur. On comprend ainsi que les forces qui commandent le flux physique varient aussi en fonction des prix  $(e = \frac{e^*}{p})$ . Autrement dit, le flux physique peut être comparé à la diffusion d'un gaz dans un milieu non-isotherme. C'est dire que le processus étudié est un processus "non-iso-prix".

(vii) Puisque la vitesse de destruction d'exergie est toujours positive, on a :

$$-_i\dot{E}x > 0 \rightarrow \Delta \left( -\frac{1}{p} \right) > 0 \rightarrow -\frac{1}{p_2} + \frac{1}{p_1} > 0 \rightarrow p_2 > p_1$$

Ainsi, le flux d'énergie est dirigé dans le sens des prix croissants (alors qu'un flux de chaleur est dirigé dans le sens des températures décroissantes). Le flux physique est alors bien dirigé dans le sens des contenus énergétiques par unité de valeur décroissants.

---

1/ on rappelle que  $\Delta$  est l'opérateur différence. Nous spécifierons les indices quand c'est important pour les développements. En effet :

$$\Delta(X \cdot Y) = X_1 \cdot \Delta Y + Y_2 \cdot \Delta X = X_2 \cdot \Delta Y + Y_1 \cdot \Delta X.$$

(viii) Il s'agit d'interpréter ce résultat du point de vue économique. Rappelons auparavant la démarche que nous avons suivie :

- nous avons supposé que l'on pouvait établir une analogie entre un processus thermodynamique irréversible et un phénomène de type économique;
- en thermodynamique, l'on suppose que des forces généralisées engendrent des flux généralisés. L'observation de la réalité économique enseigne que des flux de biens s'établissent entre un offreur et un demandeur. Nous partons de l'idée que ce processus est irréversible. Il devient alors naturel de se demander s'il existe des forces qui conditionnent ces flux de biens;
- nous avons donc choisi des forces de manière à ce que l'on puisse exprimer la destruction d'exergie, valeur quantitative de l'irréversibilité d'un processus. Ces forces sont les contenus énergétiques par unité de valeur. Après quelques transformations mathématiques, nous avons fait intervenir les prix et montré que ceux-ci déterminaient le flux d'énergie associé au flux physique. Dans ce modèle, les prix jouent le rôle d'une température. Ceci est un premier résultat important;
- un deuxième résultat provient du fait que l'on a supposé le processus irréversible : les contenus énergétiques par unité de valeur doivent décroître entre l'offreur et le demandeur et les prix doivent croître.

L'interprétation économique de ce résultat est délicate. Nous progresserons pas à pas et essaierons d'en donner quelques explications possibles afin de montrer que l'application de résultats de thermodynamique n'est pas sans intérêt pour la science économique. Nous proposerons trois interprétations de notre approche :

- une première, basée sur la notion de profit;
- une deuxième, qui permettra d'étudier une variation de la demande face à une variation de prix;
- une troisième, qui mettra le poids sur l'aspect production.

Dans les deux dernières approches, l'on s'apercevra que le problème initial que nous nous étions fixés n'est plus le même. L'intérêt de l'approche que nous avons suivie jusqu'à présent est d'avoir mis en évidence les notions d'irréversibilité et de prix. Certains scientifiques ont déjà été intéressés par le concept force - flux dans d'autres domaines que la thermodynamique :

- H. Caswell et al. (1972) ont à juste titre indiqué que le produit d'un flux de matière (grandeur extensive) et de la densité d'énergie de la matière (grandeur intensive) est égal à un flux d'énergie. Selon nos termes, cela correspond en fait au produit d'un flux généralisé et d'une force généralisée qui a la dimension d'une puissance. Après avoir émis l'idée qu'une telle approche devrait être très fructueuse pour l'étude de systèmes faisant intervenir des flux, ces auteurs emploient le mot "coût" pour décrire ces forces.
- O.I. Franksen (1974) a proposé deux lois de l'économie qui seraient analogues aux deux principes de la thermodynamique. La première serait exprimée par la loi de Walras : la valeur de tous les biens offerts égale la valeur de tous les biens demandés. Mais cette loi n'indique pas dans quel sens sont dirigés les flux de biens, c'est-à-dire de l'offreur vers le demandeur. C'est l'objectif de la seconde loi qui dit qu'un flux de biens a seulement lieu d'un prix bas à un prix haut : "from a macroscopic view point, in a closed economy, it will not make sense to attempt a production if the corresponding flow of products has a higher price at the resources than at the demand" (p. 259). En d'autres termes, et en transposant ces propos au langage de la thermodynamique des processus irréversibles, O.I. Franksen considère que les prix sont des forces qui conditionnent les flux physiques. J.M. English (1974) a relevé qu'une difficulté pouvait alors surgir vis-à-vis des dimensions : "a possible flaw in his argument (celui de O.I. Franksen) is the dimensionality of goods which requires that price be measured as a reciprocal of a commodity characteristic, e.g. dollars per pound of aluminium" (p. 289). Suivant notre approche, nous avons vu que le produit d'une grandeur intensive et d'une grandeur extensive était une puissance.

Ce problème se trouve résolu à nos yeux en disant que les contenus énergétiques (et non les prix) engendrent le flux physique. Par suite, et ainsi que nous l'avons vu, les prix engendrent le flux d'énergie associé au flux physique.

### 2.2.3 Interprétation 1 : le profit

- (i) On suppose ici que  $p_1$  est le prix de revient (coût de production) du bien et que  $p_2$  est le prix de vente, égal au prix d'achat de l'acheteur. L'équation (2.20) indique donc que le prix au niveau de l'offreur est inférieur au prix au niveau de l'acheteur. Nous définirons la différence entre ces prix comme le profit de l'offreur. L'équilibre est défini de façon analogue à l'équilibre thermodynamique : à l'équilibre, forces et flux sont simultanément nuls, c'est-à-dire qu'il n'y a ni différence de prix, donc pas de profit, ni flux.

Hors de l'équilibre, une différence de prix  $\Delta p$ , donc un profit  $\pi$ , entraîne un flux d'énergie  $\dot{E} = -\dot{E}_1 = \dot{E}_2 > 0$  (fig. 2.2).

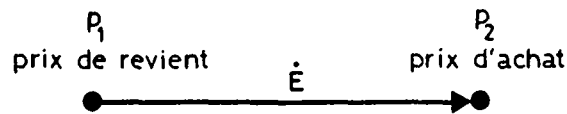


Fig. 2. 2 Flux d'énergie entre un offreur (producteur) et un demandeur (acheteur).

La vitesse de la destruction d'exergie est :

$$\begin{aligned}
 -_i \dot{E}x &= \dot{E} \cdot p_0 \cdot \left( -\frac{1}{p_2} + \frac{1}{p_1} \right) = \dot{E} \cdot p_0 \cdot \left( \frac{p_2 - p_1}{p_1 \cdot p_2} \right) \\
 &= \dot{E} \cdot p_0 \cdot \frac{\pi}{p_1 \cdot p_2} = \dot{E} \cdot p_0 \cdot \frac{\pi}{(p_1 + \pi) \cdot p_1}
 \end{aligned}$$

où  $\pi = p_2 - p_1$  est le profit du producteur. Ainsi le flux d'énergie, et par suite le flux physique, s'établissent dans le sens des profits positifs.

Si le profit  $\pi$  est petit par rapport à  $p_1$ , on a :

$$-{}_i\dot{E}x = \dot{E} \cdot p_0 \cdot \frac{\pi}{p_1^2}$$

et le profit joue le rôle d'une force généralisée. Près de l'équilibre, on a en effet :

$$-{}_i\dot{E}x = \dot{E} \cdot p_0 \cdot \Delta \left( -\frac{1}{p} \right) = \dot{E} \cdot p_0 \cdot \frac{\Delta p}{p^2} \quad (2.21)$$

Si, de plus, le niveau de référence est l'état d'équilibre, on a :

$$-{}_i\dot{E}x = \dot{E} \cdot \frac{\Delta p}{p} \quad (2.22)$$

- (ii) En suivant le même raisonnement qu'en thermodynamique, nous dirons que la différence de prix  $\Delta p$  ou le profit  $\pi$  détermine le flux. Il faut concevoir cette différence de prix comme imposée et impliquant que le système n'est plus à l'équilibre. C'est le cas d'une situation de monopole, qui estime le prix de revient à partir des coûts et des quantités des facteurs primaires et qui détermine le prix de vente. L'introduction de la notion de profit provient du fait que le système étudié n'est pas à l'équilibre. Il nous semble que cette approche est utile si l'on désire faire intervenir le profit et se démarquer des positions d'équilibre. L'économiste J. Ullmo (1970) qui a beaucoup réfléchi sur la notion de profit a fait, en début de son livre, l'observation suivante :

"L'équilibre tel qu'il a été défini par les grands noms de l'économie classique, Walras, Pareto, Marshall, ne laisse pas de place au profit. Lorsqu'il s'agit de l'équilibre sur un marché de vendeurs et d'acheteurs de même nature, la notion en est même absente. Dans le modèle plus général où le marché met en présence des acheteurs-consommateurs et des vendeurs-producteurs, ceux-ci sont bien supposés être motivés par la recherche du profit maximum, mais les équations du modèle démontrent que celui-ci est nul à l'équilibre qui est en même temps un optimum pour chacun des participants au jeu économique. Une sorte d'ironie à l'oeuvre dans ce jeu fait que cette poursuite exclusive du profit par les entrepreneurs aboutit à les en priver tous en même temps (p. 8)".

#### 2.2.4 Interprétation 2 : variation de la demande

- (i) Dans ce paragraphe, l'on suppose une position d'équilibre économique où un flux  $\dot{P}_e$  est fonction du prix d'équilibre  $p_e$ . Nous désirons imposer une variation de prix  $\Delta p = p - p_e$  autour de la position d'équilibre et étudier quelle est la variation de flux correspondante. Nous savons que les fonctions de demande telles qu'elles sont élaborées en science économique lient en particulier les flux aux prix. Dans le cas d'un seul bien, le flux  $\dot{P}^D$  est fonction du prix du bien, tel que :

$$\dot{P}^D = f(p) \quad (2.23)$$

A titre d'exemple, une fonction souvent employée par les économistes est :

$$\dot{P}^D = \alpha \cdot p^F \quad (2.24)$$

où  $\alpha$  est une constante et  $F$  l'élasticité directe de la demande par rapport au prix du bien ( $F < 0$ ). Ainsi, à une augmentation de 1 % du prix correspond une diminution de  $F$  % de la demande.

Supposons un état d'équilibre économique défini de la manière suivante : à l'état d'équilibre, la quantité de bien demandée est  $\dot{P}_e^D = f(p_e)$  où  $p_e$  est le prix d'équilibre économique. Développons la fonction donnée par l'équation (2.23) autour de cet équilibre. Limitons ce développement aux deux premiers termes : on reste au voisinage de l'équilibre.

$$\dot{P}^D = \dot{P}_e^D + (p - p_e) \cdot \left( \frac{d\dot{P}^D}{dp} \right)_e$$

c'est-à-dire :

$$\Delta \dot{P} = \dot{P}^D - \dot{P}_e^D = \left( \frac{d\dot{P}^D}{dp} \right)_e \cdot \Delta p \quad (2.25)$$

La figure 2.3 montre le flux  $\dot{P}^D$  dû à une variation  $\Delta p = p - p_e$  par rapport à l'état d'équilibre économique ( $\dot{P}_e^D, p_e$ ).

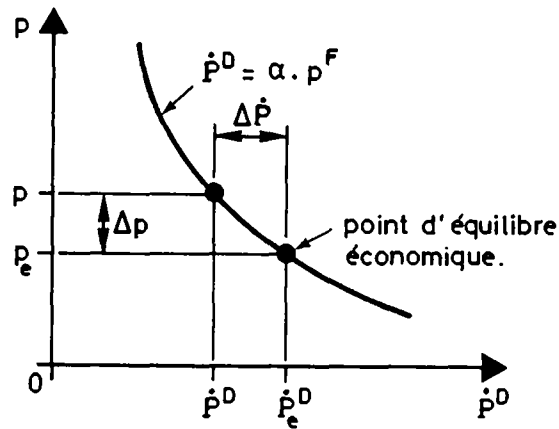


Fig. 2. 3 Courbe de demande.

- (ii) Nous nous proposerons de montrer que la relation (2.25) est une relation phénoménologique entre forces et flux au voisinage de l'équilibre. En effet, au voisinage de l'équilibre, on peut admettre en première approximation que le flux est proportionnel à la force. Reprenons l'équation (2.20) et exprimons la vitesse de destruction d'exergie à la suite d'une variation de prix qui entraîne une variation  $\Delta \dot{E}$  de la quantité d'énergie délivrée au demandeur

$$-{}_i \dot{E}x = -p_0 \cdot \Delta \dot{E} \cdot \Delta \left( -\frac{1}{p} \right)$$

Cette équation exprime que le système n'est plus à sa position d'équilibre. Si  $\Delta \left( -\frac{1}{p} \right) = 0$ ,  $\Delta \dot{E} = 0$  et  $-{}_i \dot{E}x = 0$  : c'est l'équilibre.

Transformons cette équation en faisant l'hypothèse que l'on reste au voisinage de l'équilibre et en introduisant le flux physique :

$$-{}_i \dot{E}x = -p_0 \cdot e^* \cdot \Delta \dot{P} \cdot \frac{\Delta p}{p^2}$$

Rappelons que  $-{}_i \dot{E}x$  est toujours positif. Si  $\Delta p > 0$ ,  $\Delta \dot{P} < 0$  et si  $\Delta p < 0$ ,  $\Delta \dot{P} > 0$ .

Près de l'équilibre, on peut écrire des relations linéaires entre forces  $\Delta p$  et flux  $\dot{\Delta P}$  :

$$\dot{\Delta P} = L \cdot \Delta p \quad (2.26)$$

Comparons cette relation avec les équations (2.24) et (2.25). L'on voit aisément que :

$$L = \left( \frac{d\dot{P}}{dp} \right)_e = \alpha \cdot F \cdot p^{F-1} < 0$$

Autrement dit, l'équation (2.24) est une relation phénoménologique. Plus généralement, les courbes de demande  $\dot{P} = f(p)$  sont des relations phénoménologiques : ce sont des équations de comportement qui mesurent la "résistance" de la demande face à un écart de prix. Il s'ensuit qu'on ne peut généralement écrire des relations linéaires entre forces et flux : celles-ci ne sont en effet valables qu'au voisinage de l'équilibre.

- (iii) Nous voulons à présent étendre les raisonnements précédents à un processus couplé afin de faire intervenir les relations de réciprocity d'Onsager et les vérifier. Dans ce qui suit, les processus se situeront au voisinage de l'équilibre. Nous supposerons un producteur de biens (par exemple acier) qui doit se procurer un certain nombre de facteurs primaires (matières premières, machines, travail humain, ..) à un certain prix. Pour simplifier, nous nous limiterons à deux facteurs primaires ' et '' dont les prix sont respectivement  $p'$  et  $p''$ .
- a) Comme précédemment, exprimons la vitesse de la destruction totale d'exergie, égale à la somme des vitesses des destructions partielles d'exergie :

$$-{}_i \dot{E}x = -{}_i \dot{E}x' - {}_i \dot{E}x'' = -p'_0 \cdot e^{*'} \cdot \dot{\Delta P}' \cdot \frac{\Delta p'}{p'^2} - p''_0 \cdot e^{*''} \cdot \dot{\Delta P}'' \cdot \frac{\Delta p''}{p''^2}$$

où  $e^{*'}$  et  $e^{*''}$  sont les contenus énergétiques par unité physique de chacun des biens,  $p'_0$  et  $p''_0$  leurs prix de référence respectifs,  $\dot{\Delta P}'$  et



et  $\dot{\Delta P}''$  les variations de flux dues à une variation de prix  $\Delta p'$  et  $\Delta p''$  autour du point d'équilibre.

Au voisinage de l'équilibre, on peut écrire des relations linéaires entre les flux  $\dot{\Delta P}'$ ,  $\dot{\Delta P}''$  et les forces  $\Delta p'$  et  $\Delta p''$  telles que :

$$\begin{cases} \dot{\Delta P}' = L_{11} \cdot \Delta p' + L_{12} \cdot \Delta p'' \\ \dot{\Delta P}'' = L_{21} \cdot \Delta p' + L_{22} \cdot \Delta p'' \end{cases} \quad (2.27)$$

$L_{11}$  et  $L_{22}$  sont les coefficients phénoménologiques directs et  $L_{12}$  et  $L_{21}$  les coefficients phénoménologiques de couplage. Nous voulons montrer que les relations d'Onsager sont satisfaites, c'est-à-dire que  $L_{12} = L_{21}$ .

- b) Supposons que les fonctions de demande du producteur en facteurs ' et '' soient :

$$\begin{cases} \dot{P}' = \dot{P}'(p', p'') \\ \dot{P}'' = \dot{P}''(p', p'') \end{cases} \quad (2.28)$$

Ainsi, des effets de substitution entre les facteurs sont possibles : la demande de facteur est fonction de son prix  $p'$  mais aussi du prix  $p''$  de l'autre facteur. De même pour la demande de facteur ''.

Soient  $p'_e$  et  $p''_e$  les prix d'équilibre économique des facteurs ' et ''. Développons les équations (2.28) en série, limitée à deux termes, autour du point d'équilibre, avec  $\Delta P' = P' - P'_e$  et  $\Delta P'' = P'' - P''_e$  :

$$\begin{cases} \dot{\Delta P}' = \left( \frac{\partial \dot{P}'}{\partial p'} \right)_e \cdot (p' - p'_e) + \left( \frac{\partial \dot{P}'}{\partial p''} \right)_e \cdot (p'' - p''_e) \\ \dot{\Delta P}'' = \left( \frac{\partial \dot{P}''}{\partial p'} \right)_e \cdot (p' - p'_e) + \left( \frac{\partial \dot{P}''}{\partial p''} \right)_e \cdot (p'' - p''_e) \end{cases} \quad (2.29)$$

Ce système doit être comparé avec le système (2.27). Les  $L_{ij}$  sont égaux aux dérivées partielles de la demande par rapport aux prix.

- c) Faisons appel à la théorie économique du producteur qui cherche à minimiser le coût total  $\dot{C}$  de ses achats pour une quantité produite  $\dot{P}_0$  donnée (voir J.M. Henderson et R.E. Quandt, 1967, p. 73; P.A. Samuelson, 1971, p. 94). Il s'agit donc de minimiser la fonction de coût suivante (l'on suppose qu'il n'y a pas de charges fixes) :

$$\dot{C} = p' \cdot \dot{P}' + p'' \cdot \dot{P}''$$

compte tenu de la contrainte imposée par la fonction de production  $F$  du producteur :

$$F(\dot{P}', \dot{P}'') = \dot{P}_0 = \text{constante donnée}$$

Utilisons, pour résoudre ce problème, la méthode du multiplicateur de Lagrange  $\lambda$  et définissons la fonction :

$$G = \dot{C} + \lambda \cdot [F(\dot{P}', \dot{P}'') - \dot{P}_0]$$

$$\text{ou } G = p' \cdot \dot{P}' + p'' \cdot \dot{P}'' + \lambda \cdot [F(\dot{P}', \dot{P}'') - \dot{P}_0]$$

Annulons chacune des trois dérivées partielles de la fonction  $G$  pour obtenir le minimum :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial G}{\partial \dot{P}'} = p' + \lambda \cdot \frac{\partial F}{\partial \dot{P}'} = 0 \\ \frac{\partial G}{\partial \dot{P}''} = p'' + \lambda \cdot \frac{\partial F}{\partial \dot{P}''} = 0 \\ \frac{\partial G}{\partial \lambda} = F(\dot{P}', \dot{P}'') - \dot{P}_0 = 0 \end{array} \right. \quad (2.30)$$

Les inconnues de ce système sont les flux  $\dot{P}'$ ,  $\dot{P}''$  et le multiplicateur  $\lambda$ . Les paramètres sont  $\dot{P}_0$  et les prix  $p'$  et  $p''$ . Nous voulons trouver les variations des flux par rapport aux variations des prix croisés  $\frac{\partial \dot{P}'}{\partial p''}$  et  $\frac{\partial \dot{P}''}{\partial p'}$ .

Pour cela, différencions le système (2.30) :

$$\left\{ \begin{array}{l} \lambda \cdot \frac{\partial^2 F}{\partial \dot{P}'^2} \cdot d\dot{P}' + \lambda \cdot \frac{\partial^2 F}{\partial \dot{P}' \cdot \partial \dot{P}''} \cdot d\dot{P}'' + \frac{\partial F}{\partial \dot{P}'} \cdot d\lambda = - dp' \\ \lambda \cdot \frac{\partial^2 F}{\partial \dot{P}'' \cdot \partial \dot{P}'} \cdot d\dot{P}' + \lambda \cdot \frac{\partial^2 F}{\partial \dot{P}''^2} \cdot d\dot{P}'' + \frac{\partial F}{\partial \dot{P}''} \cdot d\lambda = - dp'' \\ \frac{\partial F}{\partial \dot{P}'} \cdot d\dot{P}' + \frac{\partial F}{\partial \dot{P}''} \cdot d\dot{P}'' + 0 = 0 \end{array} \right.$$

Réolvons ce système en  $d\dot{P}'$ ,  $d\dot{P}''$  et  $d\lambda$ . On a en particulier pour  $d\dot{P}'$  et  $d\dot{P}''$  :

$$d\dot{P}' = \frac{\left(\frac{\partial F}{\partial \dot{P}''}\right)^2 \cdot dp' - \frac{\partial F}{\partial \dot{P}''} \cdot \frac{\partial F}{\partial \dot{P}'} \cdot dp''}{\Delta}$$

$$d\dot{P}'' = \frac{-\frac{\partial F}{\partial \dot{P}'} \cdot \frac{\partial F}{\partial \dot{P}''} \cdot dp' + \left(\frac{\partial F}{\partial \dot{P}'}\right)^2 \cdot dp''}{\Delta}$$

où  $\Delta$  est le déterminant du système.

On remarque immédiatement que les dérivées partielles croisées suivantes sont égales :

$$\frac{\partial \dot{P}'}{\partial p''} = \frac{\partial \dot{P}''}{\partial p'}$$

Autrement dit, pour une même production, la variation du flux  $\dot{P}'$  par rapport au prix  $p''$  est égale à la variation du flux  $\dot{P}''$  par rapport au prix  $p'$ . Ce résultat s'applique au système (2.29) et au système (2.27). On en déduit que  $L_{12} = L_{21}$  et que les relations d'Onsager sont vérifiées.

### 2.2.5 Interprétation 3 : aspect production

- (i) Imaginons un producteur  $i$  qui possède une machine qu'il alimente par un flux d'énergie  $\dot{E}_i$ , de laquelle il sort un flux d'énergie  $\dot{E}_j$  (cas d'une centrale thermique, par exemple).

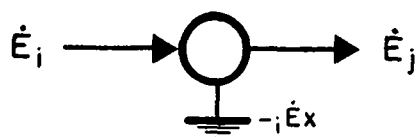


Fig. 2. 4 Machine de transformation de l'énergie.

Supposons que la transformation se fasse d'une part de manière irréversible et d'autre part de manière "iso-prix" (à un prix fixe  $p_i$ ,  $p_i$  étant le prix d'achat de l'énergie qu'achète le producteur). Exprimons la vitesse de destruction d'exergie comme la différence entre les puissances utilisables d'entrée et de sortie, par analogie avec les processus physiques décrits au paragraphe 2.1.2 (équ. (2.2) à (2.4)), le prix jouant le rôle d'une température :

$$-{}_i\dot{E}x_i = \frac{p_0}{p_i} \cdot (\dot{E}_i - \dot{E}_j) \quad (2.31)$$

Il faut noter que s'il n'y a pas de perte d'énergie,  $\dot{E}_i = \dot{E}_j$  et le processus est en équilibre.

- (ii) Dans le cas où ont lieu des pertes d'énergie, le prix de revient  $p_j$  de la quantité produite par le producteur est telle que (égalité des valeurs) :

$$p_j \cdot \dot{E}_j = p_i \cdot \dot{E}_i$$

où  $p_j$  est supérieur à  $p_i$  puisque  $\dot{E}_j$  est inférieur à  $\dot{E}_i$ . On peut exprimer que la quantité  $\dot{E}_j$  a vu son prix passer de  $p_i$  à  $p_j$  de la manière suivante :

$$-{}_i\dot{E}x_{ij} = p_0 \cdot \dot{E}_j \left( \frac{1}{p_i} - \frac{1}{p_j} \right) \quad (2.32)$$

et  $\dot{\Delta P}''$  les variations de flux dues à une variation de prix  $\Delta p'$  et  $\Delta p''$  autour du point d'équilibre.

Au voisinage de l'équilibre, on peut écrire des relations linéaires entre les flux  $\dot{\Delta P}'$ ,  $\dot{\Delta P}''$  et les forcés  $\Delta p'$  et  $\Delta p''$  telles que :

$$\begin{cases} \dot{\Delta P}' = L_{11} \cdot \Delta p' + L_{12} \cdot \Delta p'' \\ \dot{\Delta P}'' = L_{21} \cdot \Delta p' + L_{22} \cdot \Delta p'' \end{cases} \quad (2.27)$$

$L_{11}$  et  $L_{22}$  sont les coefficients phénoménologiques directs et  $L_{12}$  et  $L_{21}$  les coefficients phénoménologiques de couplage. Nous voulons montrer que les relations d'Onsager sont satisfaites, c'est-à-dire que  $L_{12} = L_{21}$ .

- b) Supposons que les fonctions de demande du producteur en facteurs ' et '' soient :

$$\begin{cases} \dot{P}' = \dot{P}'(p', p'') \\ \dot{P}'' = \dot{P}''(p', p'') \end{cases} \quad (2.28)$$

Ainsi, des effets de substitution entre les facteurs sont possibles : la demande de facteur est fonction de son prix  $p'$  mais aussi du prix  $p''$  de l'autre facteur. De même pour la demande de facteur ''.

Soient  $p'_e$  et  $p''_e$  les prix d'équilibre économique des facteurs ' et ''. Développons les équations (2.28) en série, limitée à deux termes, autour du point d'équilibre, avec  $\Delta P' = P' - P'_e$  et  $\Delta P'' = P'' - P''_e$  :

$$\begin{cases} \dot{\Delta P}' = \left( \frac{\partial \dot{P}'}{\partial p'} \right)_e \cdot (p' - p'_e) + \left( \frac{\partial \dot{P}'}{\partial p''} \right)_e \cdot (p'' - p''_e) \\ \dot{\Delta P}'' = \left( \frac{\partial \dot{P}''}{\partial p'} \right)_e \cdot (p' - p'_e) + \left( \frac{\partial \dot{P}''}{\partial p''} \right)_e \cdot (p'' - p''_e) \end{cases} \quad (2.29)$$

Ce système doit être comparé avec le système (2.27). Les  $L_{ij}$  sont égaux aux dérivées partielles de la demande par rapport aux prix.

- c) Faisons appel à la théorie économique du producteur qui cherche à minimiser le coût total  $\dot{C}$  de ses achats pour une quantité produite  $\dot{P}_0$  donnée (voir J.M. Henderson et R.E. Quandt, 1967, p. 73; P.A. Samuelson, 1971, p. 94). Il s'agit donc de minimiser la fonction de coût suivante (l'on suppose qu'il n'y a pas de charges fixes) :

$$\dot{C} = p' \cdot \dot{P}' + p'' \cdot \dot{P}''$$

compte tenu de la contrainte imposée par la fonction de production  $F$  du producteur :

$$F(\dot{P}', \dot{P}'') = \dot{P}_0 = \text{constante donnée}$$

Utilisons, pour résoudre ce problème, la méthode du multiplicateur de Lagrange  $\lambda$  et définissons la fonction :

$$G = \dot{C} + \lambda \cdot [F(\dot{P}', \dot{P}'') - \dot{P}_0]$$

$$\text{ou } G = p' \cdot \dot{P}' + p'' \cdot \dot{P}'' + \lambda \cdot [F(\dot{P}', \dot{P}'') - \dot{P}_0]$$

Annulons chacune des trois dérivées partielles de la fonction  $G$  pour obtenir le minimum :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial G}{\partial \dot{P}'} = p' + \lambda \cdot \frac{\partial F}{\partial \dot{P}'} = 0 \\ \frac{\partial G}{\partial \dot{P}''} = p'' + \lambda \cdot \frac{\partial F}{\partial \dot{P}''} = 0 \\ \frac{\partial G}{\partial \lambda} = F(\dot{P}', \dot{P}'') - \dot{P}_0 = 0 \end{array} \right. \quad (2.30)$$

Les inconnues de ce système sont les flux  $\dot{P}'$ ,  $\dot{P}''$  et le multiplicateur  $\lambda$ . Les paramètres sont  $\dot{P}_0$  et les prix  $p'$  et  $p''$ . Nous voulons trouver les variations des flux par rapport aux variations des prix croisés  $\frac{\partial \dot{P}'}{\partial p''}$  et  $\frac{\partial \dot{P}''}{\partial p'}$ .

Pour cela, différencions le système (2.30) :

$$\left\{ \begin{array}{l} \lambda \cdot \frac{\partial^2 F}{\partial \dot{P}'^2} \cdot d\dot{P}' + \lambda \cdot \frac{\partial^2 F}{\partial \dot{P}' \cdot \partial \dot{P}''} \cdot d\dot{P}'' + \frac{\partial F}{\partial \dot{P}'} \cdot d\lambda = - dp' \\ \lambda \cdot \frac{\partial^2 F}{\partial \dot{P}'' \cdot \partial \dot{P}'} \cdot d\dot{P}' + \lambda \cdot \frac{\partial^2 F}{\partial \dot{P}''^2} \cdot d\dot{P}'' + \frac{\partial F}{\partial \dot{P}''} \cdot d\lambda = - dp'' \\ \frac{\partial F}{\partial \dot{P}'} \cdot d\dot{P}' + \frac{\partial F}{\partial \dot{P}''} \cdot d\dot{P}'' + 0 = 0 \end{array} \right.$$

Réolvons ce système en  $d\dot{P}'$ ,  $d\dot{P}''$  et  $d\lambda$ . On a en particulier pour  $d\dot{P}'$  et  $d\dot{P}''$  :

$$d\dot{P}' = \frac{\left(\frac{\partial F}{\partial \dot{P}''}\right)^2 \cdot dp' - \frac{\partial F}{\partial \dot{P}''} \cdot \frac{\partial F}{\partial \dot{P}'} \cdot dp''}{\Delta}$$

$$d\dot{P}'' = \frac{-\frac{\partial F}{\partial \dot{P}'} \cdot \frac{\partial F}{\partial \dot{P}''} \cdot dp' + \left(\frac{\partial F}{\partial \dot{P}'}\right)^2 \cdot dp''}{\Delta}$$

où  $\Delta$  est le déterminant du système.

On remarque immédiatement que les dérivées partielles croisées suivantes sont égales :

$$\frac{\partial \dot{P}'}{\partial p''} = \frac{\partial \dot{P}''}{\partial p'}$$

Autrement dit, pour une même production, la variation du flux  $\dot{P}'$  par rapport au prix  $p''$  est égale à la variation du flux  $\dot{P}''$  par rapport au prix  $p'$ . Ce résultat s'applique au système (2.29) et au système (2.27). On en déduit que  $L_{12} = L_{21}$  et que les relations d'Onsager sont vérifiées.

2.2.5 Interprétation 3 : aspect production

- (i) Imaginons un producteur  $i$  qui possède une machine qu'il alimente par un flux d'énergie  $\dot{E}_i$ , de laquelle il sort un flux d'énergie  $\dot{E}_j$  (cas d'une centrale thermique, par exemple).

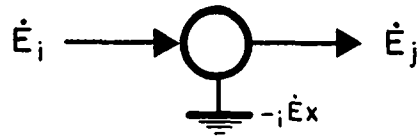


Fig. 2. 4 Machine de transformation de l'énergie.

Supposons que la transformation se fasse d'une part de manière irréversible et d'autre part de manière "iso-prix" (à un prix fixe  $p_i$ ,  $p_i$  étant le prix d'achat de l'énergie qu'achète le producteur). Exprimons la vitesse de destruction d'exergie comme la différence entre les puissances utilisables d'entrée et de sortie, par analogie avec les processus physiques décrits au paragraphe 2.1.2 (équ. (2.2) à (2.4)), le prix jouant le rôle d'une température :

$$-_i\dot{E}x_i = \frac{p_0}{p_i} \cdot (\dot{E}_i - \dot{E}_j) \quad (2.31)$$

Il faut noter que s'il n'y a pas de perte d'énergie,  $\dot{E}_i = \dot{E}_j$  et le processus est en équilibre.

- (ii) Dans le cas où ont lieu des pertes d'énergie, le prix de revient  $p_j$  de la quantité produite par le producteur est telle que (égalité des valeurs) :

$$p_j \cdot \dot{E}_j = p_i \cdot \dot{E}_i$$

où  $p_j$  est supérieur à  $p_i$  puisque  $\dot{E}_j$  est inférieur à  $\dot{E}_i$ . On peut exprimer que la quantité  $\dot{E}_j$  a vu son prix passer de  $p_i$  à  $p_j$  de la manière suivante :

$$-_i\dot{E}x_{ij} = p_0 \cdot \dot{E}_j \left( \frac{1}{p_i} - \frac{1}{p_j} \right) \quad (2.32)$$



Cette équation a la même forme que l'équation (2.20), mais elle n'a plus la même signification. Elle exprime que le prix de revient de la quantité produite a augmenté par suite des pertes d'énergie qui ont lieu lors du processus. S'il n'y a pas de pertes,  $\dot{E}_i = \dot{E}_j$ ,  $p_j = p_i$  et  $-\dot{E}x_{ij} = 0$ .

En additionnant les équations (2.31) et (2.32) on obtient la vitesse de destruction d'exergie due à une perte d'énergie provoquant l'augmentation des prix :

$$-\dot{E}x = \frac{p_0}{p_i} \cdot \dot{E}_i - \frac{p_0}{p_j} \cdot \dot{E}_j \quad (2.33)$$

Nous utiliserons cette relation par la suite.

#### 2.2.6 Conclusion

La démarche que nous avons suivie nous a finalement amené à étendre le problème que nous nous étions initialement posés. Nous sommes en effet partis de l'idée que des forces généralisées pouvaient déterminer, comme en thermodynamique, le flux de biens entre un offreur et un demandeur. Les forces que nous avons considérées sont les prix et il s'est alors agi d'interpréter les résultats obtenus. Une première interprétation s'exprime par la notion de profit qui permet au système de s'écarter de l'équilibre. Une deuxième interprétation revient à considérer qu'il y a destruction d'exergie dès qu'une variation de prix autour de l'équilibre est imposée, entraînant une variation de flux. Nous avons alors montré que les courbes de demande jouaient le rôle de relations phénoménologiques. Autour de l'équilibre les relations d'Onsager sont respectées. Une troisième interprétation consiste à faire intervenir les pertes d'énergie dans une machine de production. Le prix de revient de la production doit augmenter à la suite de ces pertes. Nous allons utiliser ce dernier résultat pour l'appliquer au processus économique.

## 2.3 ETUDE DU PROCESSUS ECONOMIQUE

Dans ce paragraphe, nous présenterons le processus économique global où nous considérerons un seul facteur primaire, l'énergie, qui est transformée dans une succession de machines de production pour être investie sous forme de capital physique. Ce processus global est irréversible puisqu'à chaque stade de transformation ont lieu des pertes d'énergie. Nous étudierons le processus économique en état stationnaire en exprimant le compte exergétique. Par rapport au bilan énergétique, le compte exergétique présente une information supplémentaire : les prix de l'énergie doivent augmenter à la suite des pertes d'énergie qui se produisent tout au long des transformations.

### 2.3.1 Succession de machines de transformation de l'énergie

Nous pouvons imaginer une série de machines de transformation de l'énergie où ont lieu des pertes énergétiques (fig. 2.5). Au début de la chaîne une quantité d'énergie en puissance  $\dot{E}_1$  est à disposition. Ce flux alimente une machine dont sort un flux  $\dot{E}_2$ , alimentant lui-même une autre machine, etc..., jusqu'au pas n.

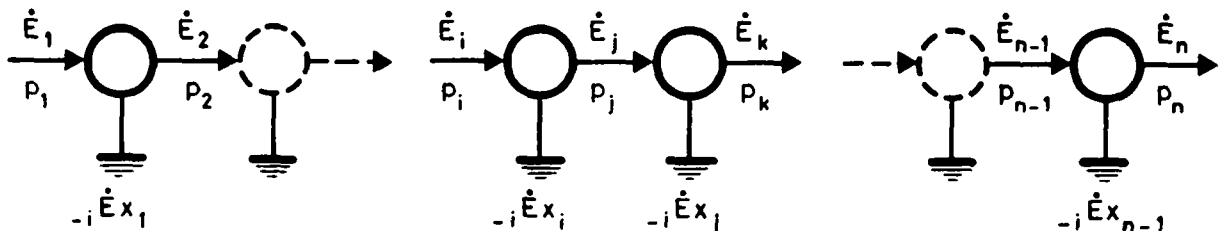


Fig. 2.5 Succession de machines de transformation de l'énergie.

A chaque stade, le prix de l'énergie augmente puisqu'une certaine quantité d'énergie est perdue. Ainsi le producteur  $i$  calculera le prix de revient  $p_j$  de sa production tel que :

$$\dot{E}_j \cdot p_j = \dot{E}_i \cdot p_i$$

La vitesse de destruction totale d'exergie du processus global est la somme des vitesses de destruction partielle d'exergie :

$$-_i \dot{E}x = -_i \dot{E}x_1 - \dots -_i \dot{E}x_i - _i \dot{E}x_j - \dots -_i \dot{E}x_{n-1}$$

Chaque terme de cette équation est donné par l'équation (2.33) :

$$-{}_i\dot{E}x = p_0 \cdot \left( \frac{\dot{E}_1}{p_1} - \frac{\dot{E}_2}{p_2} \right) + \dots + p_0 \left( \frac{\dot{E}_i}{p_i} - \frac{\dot{E}_j}{p_j} \right) + p_0 \left( \frac{\dot{E}_j}{p_j} - \frac{\dot{E}_k}{p_k} \right) + \dots + p_0 \left( \frac{\dot{E}_{n-1}}{p_{n-1}} - \frac{\dot{E}_n}{p_n} \right)$$

qui devient après simplification :

$$-{}_i\dot{E}x = p_0 \cdot \left( \frac{\dot{E}_1}{p_1} - \frac{\dot{E}_n}{p_n} \right) \quad (2.34)$$

On peut faire les remarques suivantes :

- (i) Le bilan énergétique du système s'exprime ainsi :  $\dot{P}' = \dot{E}_1 - \dot{E}_n$   
 où  $\dot{P}'$  est le flux d'énergie perdue. Le compte exergétique apporte une information supplémentaire : entre le début et le fin de la chaîne, les prix doivent augmenter :  $p_n > \dots > p_j > p_i > \dots > p_1$ . Si l'on pose  $p_0 = p_1 = \dots = p_n$  on retrouve le bilan d'énergie.
- (ii) L'équation (2.34) peut être interprétée en termes de puissance utilisable où  $P_1 = p_0 \cdot \dot{E}_1/p_1$  est la puissance en début de chaîne et  $P_n = p_0 \cdot \dot{E}_n/p_n$  est la puissance en fin de chaîne.

### 2.3.2 La formation de capital physique

Nous appliquerons les résultats précédents à la formation de capital physique qui sera supposée correspondre à la fin de la chaîne de la figure 2.5 pour laquelle l'énergie investie sous forme de capital physique est  $\dot{E}_n$ . Une série de remarques nous permettra de situer la formation de capital physique dans le processus économique.

- (i) Nous distinguerons brièvement deux catégories d'études entreprises par les économistes :
- les études portant sur la croissance économique (niveau macro-économique), ses origines et ses implications. Le but de la croissance est de satisfaire les besoins des individus ou de l'humanité grâce à l'innovation et au progrès,

- les études ayant trait au comportement des individus et des entreprises (niveau micro-économique). On admet le plus souvent que l'individu cherche à maximiser ses besoins et que l'entreprise cherche à maximiser son profit.
- (ii) La satisfaction des besoins des individus apparaît donc être un des buts de l'Economie (au sens de P.A. Samuelson, 1972, vol. 1, p.21). Nous admettrons que la satisfaction de ces besoins passe dans une large mesure par la consommation de biens<sup>1/</sup>. Un des buts du processus économique (de l'Economie) est alors de satisfaire la consommation privée.
- (iii) On en est amené à étudier comment satisfaire ces besoins, donc cette consommation. Nous avons vu au chapitre 1 (fig. 1.1) que l'on considère souvent le système économique comme un cycle entre les activités de production et de consommation. Il est donc clair que l'on satisfait la consommation grâce à la production.
- (iv) Il faut ajouter que, pendant une certaine période de temps, une partie de la production est consacrée à la formation de capital physique. N. Georgescu - Roegen (1971, p. 268-275; 1976) a insisté sur le fait que cette formation de capital physique implique la réalisation de nouveaux procédés qui précèdent la production de biens de consommation. Il est alors essentiel d'introduire des durées de temps qui représentent les délais entre la construction et la mise en service des nouveaux procédés.
- (v) Dans les modèles dynamiques élaborés par les économistes pour étudier la croissance, ces délais ne sont généralement pas pris en compte. N. Georgescu - Roegen a montré que, par exemple dans le modèle Entrées-Sorties dynamique de W. Leontief (1970), la production s'accroît juste au moment où une part de la production antérieure

---

1/ on peut retrouver ici la distinction usuellement faite que le produit national brut n'est pas nécessairement une mesure de bien-être (bonheur national).

est consacrée à la formation de capital physique (alors qu'il faudrait attendre un certain temps). Ces lacunes proviennent du fait que les économistes se sont beaucoup plus intéressés à la production de biens de consommation qu'à la formation de capital physique (production de processus) :

"... , as far as one may search the economic literature, all dynamic models (including those concerned with growth) allow for the production of commodities but not for that of processes. The omission is not inconsequential, be it for the theoretical understanding of the economic process or for the relevance of these models as guides for economic planning. For one thing, the omission is responsible for the quasi explosive feature which is ingrained in all current models of dynamic economics..." (N. Georgescu-Roegen, 1971, p.269).

(vi) Le capital physique doit donc être produit grâce à des productions antérieures. Nous admettons alors que la formation de capital physique, remplaçant le capital physique usé et obsolète, et augmentant le capital physique existant, permet d'augmenter la consommation privée, ceci avec un délai de temps. Ainsi que l'indique P.A. Samuelson (1977, vol. 1, p. 82), "le gros de toute activité économique est orienté vers l'avenir; pour la même raison, le gros de la consommation économique courante est le fruit des efforts passés". Le fruit des efforts passés est à nos yeux représenté par le capital physique existant à un certain moment.

(vii) Dans une optique physique du processus économique, on ne peut mettre de plus la consommation privée et le capital physique existant sur le même plan. On retrouve la distinction, importante, entre flux et stock :

- la consommation privée (comme la consommation de matières premières, d'énergie, de biens intermédiaires), la production, le travail humain et la formation de capital physique sont des flux, dépendant de l'époque de temps considérée,

- le capital physique existant constitue un stock qui subsiste, s'il ne s'épuise ni n'augmente, d'une époque de temps à une autre. Il en va de même pour les ressources énergétiques et les ressources de matières premières.

Le stock de capital physique est alimenté par le flux de formation de capital physique. L'exploitation du capital physique permet de produire, donc de satisfaire la consommation privée. En étant exploité, le capital physique s'use. Par ailleurs, sous l'influence du progrès technique, le capital devient obsolète. Il faut donc aussi que ce capital soit remplacé, toujours grâce à la formation de capital physique.

(viii) C'est ainsi que nous dirons que la conséquence du processus économique est la formation de capital physique. C'est une condition nécessaire pour que la consommation privée soit satisfaite.

(ix) Finalement, l'économiste N. Georgescu-Roegen (1971, p.275) qui a beaucoup réfléchi au processus économique a fait la remarque suivante à propos du secteur de production de procédés (le " $\pi$ -sector", ou secteur de production de capital physique) :

"In conclusion, I wish to submit that it is this  $\pi$ -sector that constitutes the fountainhead of the growth and further growth which seems to come about as by magic in the developed economies and which, precisely for this reason, has intrigued economists and puzzled the planners of developing economies. By a now popular metaphor, we speak of the "take-off" of a developing economy as that moment when the economy has succeeded in creating within itself the motive-power of its further growth. In light of the foregoing analysis, an economy can "take off" when and only when it has succeeded in developing a  $\pi$ -sector. It is high time, I believe, for us to recognize that the essence of development consists of the organizational and flexible power to create new processes rather than the power to produce commodities by materially crystallized plants. Ipso facto, we should revise our economics of economic development for the sake of our profession as a pure and practical art".

### 2.3.3 Puissances utilisables d'entrée et de sortie du processus économique

- (i) Certains auteurs ont pu aborder l'étude de la dynamique des systèmes grâce à la notion de puissance (par exemple H.T. Odum (1971, 1972), E.P. Odum (1976)...). Rappelons que la puissance est le produit d'une force généralisée et d'un flux généralisé.
- (ii) Rappelons en outre que nous prendrons l'énergie comme facteur de base pour le déroulement du processus économique. Nous définirons la puissance utilisable d'entrée du processus économique comme égale au flux exergétique correspondant au flux d'énergie primaire nécessaire au déroulement du processus économique. La puissance utilisable de sortie du processus économique sera définie égale au flux exergétique correspondant au flux d'énergie investie sous forme de capital physique.
- (iii) Le processus économique est représenté de manière simplifiée à la figure 2.6.

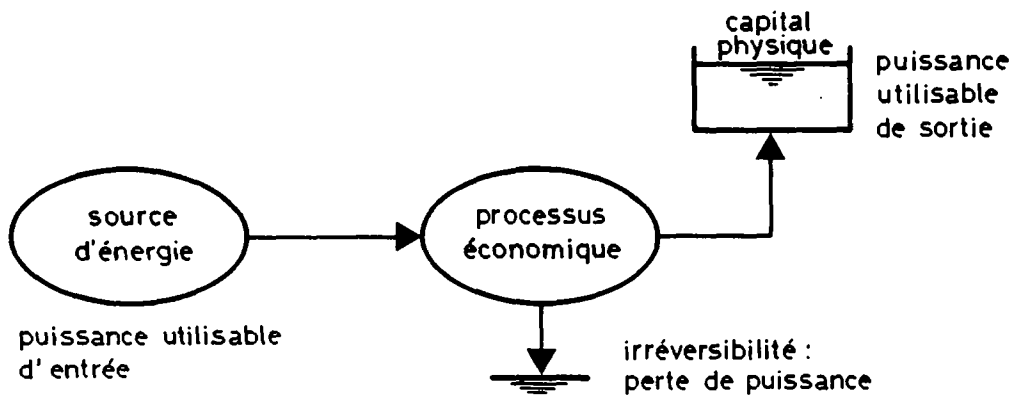


Fig. 2.6 Puissances utilisables du processus économique

Entre l'entrée et la sortie du processus économique, il y a perte de puissance (ou vitesse de destruction de l'exergie) due aux pertes d'énergie qui ont lieu à chaque étape du processus.

- (iv) Puisqu'à l'entrée du processus économique, l'énergie se trouve sous forme primaire, l'exergie à l'entrée peut aussi être qualifiée de primaire. De plus, le processus de la figure 2.6 peut être vu comme une chaîne de transformation de l'énergie primaire en énergie utile. Nous définirons l'énergie utile comme l'énergie investie dans la formation de capital physique.
- (v) Ainsi le contenu énergétique par unité de valeur de formation de capital physique est un contenu en énergie utile qui représente l'énergie utile nécessaire pour former une unité de valeur de capital. Le terme utile est important puisqu'il permet de le dissocier du contenu en énergie primaire : on tient compte des pertes énergétiques qui ont lieu lors du déroulement du processus économique.
- (vi) Le processus économique peut être décrit par trois étapes :
- il prélève de l'énergie et des matières premières (que nous négligeons) à l'environnement,
  - il transforme énergie, matière, capital physique et travail humain,
  - il investit de l'énergie sous forme de capital physique.

#### 2.3.4 Le processus économique en état stationnaire

Nous appliquerons les résultats du §2.3.1 pour étudier la formation de capital physique dans le processus économique. Le processus est en état stationnaire. La figure 2.6 permet d'établir la figure 2.7 où interviennent forces et flux.

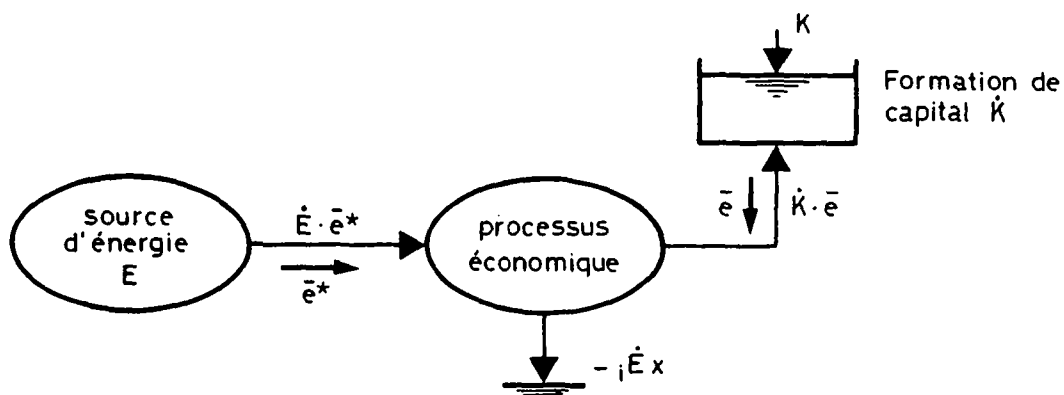


Fig. 2.7 Processus économique sans usure physique : flux en puissance utilisable.



(i) Reprenons l'équation (2.34) :

$$-{}_i\dot{E}x = p_0 \left( \frac{\dot{E}_1}{p_1} - \frac{\dot{E}_n}{p_n} \right)$$

Au pas  $n$ , le flux d'énergie  $\dot{E}_n$  est investi sous forme de capital physique. En introduisant le contenu en énergie utile par unité de valeur de formation de capital physique  $e_n$  et le flux de formation de capital  $\dot{K}$ , l'équation (2.34) devient :

$$-{}_i\dot{E}x = p_0 \left( \frac{\dot{E}_1}{p_1} - \frac{e_n \dot{K}}{p_n} \right)$$

Pour simplifier les notations, posons ( $e_1^* = 1 \text{ J/J}$ ) :

$$\bar{e}^* = \frac{p_0}{p_1} \cdot e_1^* \quad \text{et} \quad \bar{e} = p_0 \cdot \frac{e_n}{p_n}$$

L'équation (2.34) s'écrit en conséquence :

$$-{}_i\dot{E}x = \dot{E} \cdot \bar{e}^* - \dot{K} \cdot \bar{e} \quad (2.35)$$

$\bar{e}^*$  est la force motrice du processus économique. Elle s'exprime en J/J. Elle fait intervenir le prix de l'énergie primaire qui peut être vu comme un prix de rareté des ressources d'énergie.

$\bar{e}$  est une contre-force qui s'exerce à partir du capital existant. Elle peut être assimilée à une force de pression qui s'oppose au stockage d'énergie à une certaine altitude. Elle est fonction du contenu en énergie utile par unité de valeur de formation de capital physique et du prix de l'énergie à ce stade.

$\dot{E} \cdot \bar{e}^*$  est la puissance utilisable d'entrée du processus économique (puissance utilisable primaire).

$\dot{K} \cdot \bar{e}$  est la puissance utilisable de sortie du processus économique (puissance utilisable utile). Le processus économique conduit à investir de l'énergie sous forme de capital physique.

$-{}_i\dot{E}x$  est la vitesse de la destruction de l'exergie lors du déroulement du processus économique. Cette grandeur caractérise l'irréversibilité du processus économique qui se déroule avec des pertes d'énergie.

(ii) Faisons quelques remarques qui permettent de situer notre approche par rapport à d'autres travaux qui font appel au concept de contenu énergétique. Ces travaux ne tiennent pas compte des prix et considèrent la demande finale au lieu de la formation de capital physique.

a) A partir de l'équation (2.35) posons :

- $\dot{D} = \dot{K}$  où  $\dot{D}$  est le flux de demande finale (qui inclue donc la consommation privée et la formation de capital)
- $-_j\dot{E}x = 0$  : la vitesse de la destruction d'exergie est supposée nulle
- $p_0 = p_1 = p_{n-1}$  : on néglige les variations de prix.

On obtient alors (on affecte le contenu énergétique  $e$  d'un indice 0, symbolisant une destruction nulle d'exergie ainsi qu'un prime ' pour exprimer que  $e$  est rapporté à la demande finale et non à la formation de capital physique) :

$$\dot{E} = \dot{D} \cdot {}_0e' \quad (2.36)$$

C'est donc le bilan énergétique du système pour lequel toutes les pertes d'énergie sont nulles : les ressources énergétiques nécessaires à la satisfaction de la demande finale sont intégralement investies dans la demande finale. En d'autres termes, le contenu énergétique  ${}_0e'$  est un contenu en énergie primaire. On trouve ici le concept de contenu énergétique par unité de valeur développé par C.W. Bullard et R.A. Herendeen (1975) pour qui la demande finale représente le "gouffre final énergétique". Ce cas particulier où l'irréversibilité du processus économique n'est pas mise en évidence implique donc que le rendement énergétique  $\eta$  est égal à 1 :

$$\eta = \frac{{}_0e' \cdot \dot{D}}{e' \cdot \dot{E}} = \frac{{}_0e'}{e' \cdot f} = 1$$

en posant  $f = \dot{E}/\dot{D}$ ,  $f$  est donc le rapport de la consommation d'énergie primaire à la valeur de la demande finale, qui est justement un facteur important employé en économie de l'énergie (§1.3.1).

- b) Bien que considérant toujours la demande finale et négligeant la croissance des prix, J. Percebois (1979) a indiqué qu'il serait souhaitable de différencier "intensité énergétique appelée" (contenu en énergie primaire) et "intensité énergétique utile" (contenu en énergie utile)<sup>1/</sup>. C'est donc à une équation du type suivant qu'il faut en venir (bilan d'énergie) :

$$\dot{P}' = \dot{E} - \dot{D} \cdot e' \quad (2.37)$$

où  $\dot{P}'$  symbolise les pertes d'énergie en puissance.

- c) En rapportant le contenu énergétique à la formation de capital physique, on doit écrire :

$$\dot{P}' = \dot{E} - \dot{K} \cdot e \quad (2.38)$$

Cette équation donne du poids à la suggestion de J. Percebois et est en accord avec notre approche. Nous proposerons au chapitre 3 une méthode de calcul de  $e$  (déjà esquissée au §1.3.4 (iii)) qui tienne compte des pertes d'énergie et qui rend la consommation privée dépendante de la formation de capital.

---

1/ ceci pour mieux comprendre les problèmes de substitution entre agents énergétiques, les impacts de leurs prix sur la consommation en énergie utile, et intégrer les rendements des appareils d'utilisation de l'énergie.

## 2.4 CONCLUSION

Nous avons voulu explorer dans ce chapitre les possibilités qu'offre l'application de quelques résultats de thermodynamique à quelques problèmes économiques sous l'angle des flux et forces généralisés et de la destruction d'exergie qui caractérise l'irréversibilité d'un processus. Au niveau d'une interface offreur-demandeur, les forces font appel aux concepts de contenu énergétique et de prix. Ce résultat a été étendu à l'étude de la variation de la demande à la suite d'une variation de prix, puis à un processus de transformation de l'énergie où des pertes d'énergie se produisent impliquant l'augmentation des prix. Le processus économique a été ensuite défini comme une succession de processus de transformation qui prélève de l'énergie à l'environnement pour l'investir sous forme de capital physique. Le compte exergétique correspondant fait intervenir les prix de l'énergie apportant ainsi une information que le bilan énergétique ne donne pas : le flux d'énergie est dirigé dans le sens des prix croissants.

L'approche retenue dans ce chapitre nous semble encore bien incomplètement exploitée. Nous n'avons en effet pas explicitement pris en compte le travail humain et les matières premières puisque nous avons privilégié l'énergie et le capital physique. De plus, nous sommes restés à l'état stationnaire. Nos espoirs seraient comblés si notre approche, basée sur une vision d'ingénieur, pouvait retenir l'attention de ceux qui désirent aller plus en avant dans l'étude du processus économique.

### CHAPITRE 3

## LE CONTENU EN ÉNERGIE UTILE DE LA FORMATION DE CAPITAL PHYSIQUE

La réalisation d'un investissement implique que des biens d'équipement soient produits par les producteurs, qui pour leur production ont besoin de plus ou moins d'énergie. Il en résulte que le contenu énergétique des biens d'équipement diffère de bien en bien. Nous exposerons dans ce chapitre la méthode de calcul des contenus énergétiques en utilisant l'analyse Entrées - Sorties qui sera combinée avec des tables de dissipation énergétique. Celles-ci ont l'avantage d'éviter les problèmes de double comptage de l'énergie, ce qui est une amélioration particulièrement simple des méthodes de calcul habituelles. Nous commencerons par présenter le contenu en énergie primaire par unité de valeur de demande finale. Nous étendrons ensuite la formulation usuelle à l'énergie utile, en incorporant les rendements énergétiques, et à la formation de capital physique. Pour cela nous étudierons le processus de génération de la consommation dû à l'investissement (effet multiplicateur) que nous intégrerons dans l'analyse Entrées - Sorties. Il sera alors possible de calculer le contenu en énergie utile par unité de valeur de formation de capital physique. Finalement, nous proposerons une procédure qui permette de prendre en compte l'énergie associée aux produits importés qui peuvent représenter une part importante de la consommation réelle d'énergie d'un pays, sous forme indirecte.

### 3.1 PRESENTATION ET RAPPELS

Pour la clarté de l'exposé, il nous semble utile de rappeler quelques résultats des chapitres précédents et de préciser les symboles que nous emploierons pour le calcul des contenus énergétiques par unité de valeur.

- (i) Les producteurs, suivant les produits qu'ils fabriquent, ont besoin de plus ou moins d'énergie comme de plus ou moins d'autres produits et de travailleurs. Il est alors probable que l'énergie contenue dans un produit, par unité de valeur de ce produit, est différente de produit en produit. Nous considérerons une économie à  $n$  produits, la production, la demande finale, etc... étant alors des vecteurs colonne. Nous admettrons qu'il y a interdépendance entre produits et secteurs de production pour parler indifféremment des uns ou des autres.
- (ii) Nous insistons sur le fait que la production, la demande finale, etc, sont des flux<sup>1/</sup>. En conséquence,  $\dot{X}$  est le vecteur-flux de la production totale en valeur. De même pour  $\dot{D}$  (demande finale),  $\dot{C}$  (consommation privée),  $\dot{K}$  (formation de capital physique),  $\dot{M}$  (importations),  $\dot{Z}$  (exportations). Dans la suite, on sous-entendra la locution "vecteur-flux en valeur".
- (iii) Dans tout ce chapitre, la formation de capital physique sera symbolisée par  $\dot{K}$  (au lieu de  $\dot{N}$  - voir équation (1.1) et § 2.3.4), ceci parce que l'on supposera que le processus économique est en état stationnaire :  $\dot{K} = \dot{N}$ . Pour cette raison, les pertes d'énergie seront, dans ce chapitre comme au chapitre 1, symbolisées par  $\dot{P}'$  (et non  $\dot{P}$  - voir § 1.3.3 (iii), point d)).
- (iv) Rappelons que pour un ensemble fermé (pas d'importation ni d'exportation), la demande finale comprend la consommation privée et la

---

1/ dans le chapitre 1, nous avons raisonné sur une période de temps  $\Delta T$  pour présenter les relations du modèle Entrées-Sorties comme le font les économistes qui récoltent généralement les statistiques pour une période  $\Delta T = 1$  année.

formation de capital physique. Ces deux éléments ne sont pas indépendants l'un de l'autre (fig. 1.2) et l'on ne doit pas mettre sur un même plan biens de consommation et biens d'équipement. Nous rendrons la consommation privée dépendante de la formation de capital physique (§ 3.3). Auparavant, nous commencerons néanmoins par raisonner sur la demande finale (§ 3.2).

- (v) Nous introduirons alors la matrice A des coefficients d'entrée, de dimension  $n \times n$ , n étant le nombre de secteurs industriels considérés, à l'exclusion du travail humain et de la consommation privée qui font respectivement partie de la valeur ajoutée et de la demande finale. L'équation de base de l'analyse Entrées - Sorties permettant de trouver la production à atteindre dans chaque secteur pour satisfaire à un vecteur de demande finale donnée est :

$$\dot{X} = (I - A)^{-1} \cdot \dot{D} \quad (1.6)$$

- (vi) Conformément au paragraphe 1.1.2 (i), on exprimera :

- les rapports de deux valeurs en lettres majuscules (coefficient d'entrée A)
- les rapports d'une valeur et d'une quantité physique ou d'une quantité physique et d'une valeur en lettres minuscules (ainsi, le contenu énergétique par unité de valeur est : e).

- (vii) Nous avons pris la précaution au paragraphe 2.3.4 (ii) de différencier les contenus énergétiques par unité de valeur selon que :

- ils sont exprimés en énergie primaire ou en énergie utile,
- ils sont rapportés à la demande finale ou à la formation de capital seule.

Soit  $\dot{E}$  l'énergie primaire en puissance consommée pour le déroulement du processus économique (ci-après,  $\dot{E}$  est un scalaire).

Définissons, à partir des équations (2.36) à (2.38) :

- le vecteur ligne (n composantes) des contenus en énergie primaire par unité de valeur de demande finale,  ${}_0e'$ , tel que (pas de pertes énergétiques) :

$$\dot{E} = {}_0 e' \cdot \dot{D} \quad (3.1)$$

- le vecteur ligne des contenus en énergie utile par unité de valeur de demande finale,  $e'$ , tel que :

$$\dot{P}' = \dot{E} - e' \cdot \dot{D} \quad (3.2)$$

$\dot{P}'$  (scalaire) représente les pertes d'énergie en puissance. Il faut noter que, en suivant strictement notre approche, cette équation est impropre dans la mesure où l'on ne peut définir l'énergie utile au niveau de la demande finale. Néanmoins, cette relation nous permettra d'être plus clair dans la suite de nos raisonnements;

- le vecteur ligne des contenus en énergie primaire par unité de valeur de formation de capital,  ${}_0 e$ , tel que (pas de pertes énergétiques) :

$$\dot{E} = {}_0 e \cdot \dot{K} \quad (3.3)$$

- le vecteur ligne des contenus en énergie utile par unité de valeur de formation de capital,  $e$ , tel que :

$$\dot{P}' = \dot{E} - e \cdot \dot{K} \quad (3.4)$$

(viii) Nous désirons établir ici le lien avec les relations (1.40) et (1.41) trouvées auparavant. Nous supposons momentanément qu'il est possible d'introduire une matrice  $\bar{A}$  de dimension  $n+1 \times n+1$  intégrant travail humain et consommation privée que l'on peut traiter de la même manière que la matrice  $A$ , de dimension  $n \times n$ . On cherche donc à satisfaire un vecteur de formation de capital  $\dot{K}$ , par un vecteur de production  $\dot{X}$  tel que :

$$\dot{X} = (I - \bar{A})^{-1} \cdot \dot{K} \quad (3.5)$$

Prenons l'équation (3.4) et combinons-la avec l'équation (3.5), pour obtenir :

$$\begin{aligned} \dot{E} &= \dot{P}' + e \cdot (I - \bar{A}) \cdot \dot{X} \\ \dot{E} &= \dot{P}' + e \cdot \dot{X} - e \cdot \bar{A} \cdot \dot{X} \end{aligned}$$



Décomposons les scalaires  $\dot{E}$  et  $\dot{P}'$  en une somme de scalaires, tels que :

$$\dot{E} = \sum_j \dot{E}_j, \quad \dot{P}' = \sum_j \dot{P}'_j$$

On obtient alors :

$$\dot{E}_j = \dot{P}'_j + e_j \cdot \dot{X}_j - \sum_i e_i \cdot \bar{A}_{ij} \cdot \dot{X}_j$$

On retrouve donc l'équation (1.40) (après avoir posé

$\dot{E}_j - \dot{P}'_j = \eta_j \cdot r_j \cdot \dot{X}_j$ , où  $\eta_j$  est le rendement énergétique du secteur  $j$  et  $r_j$  l'intensité énergétique de ce secteur  $j$ ).

(ix) Finalement, il faut faire deux remarques :

- Le contenu énergétique  $e$  est exprimé par unité de valeur de formation de capital. Cette remarque s'applique, à posteriori, aux équations du paragraphe 1.3.3 (iii), point i). Dans le chapitre 1, nous n'avons en effet parlé que de contenu énergétique par unité de valeur, sans spécifier à quel vecteur cette valeur devait être rapportée. Il est évident, au vu des équations (3.3) et (3.4), que si  $e$  est rapporté à la production (qui est toujours au moins supérieure à la formation de capital), on retire plus d'énergie que l'on en a introduit. En définitive, il faut respecter le bilan énergétique : si l'on néglige les pertes, toute l'énergie primaire se retrouve dans la formation de capital; en tenant compte des pertes, c'est l'énergie utile qui y est contenue.
- Le même type d'analyse peut être effectuée vis-à-vis de la demande finale (équations (1.6), (3.1), (3.2)) : en négligeant les pertes, toute l'énergie primaire se retrouve dans la demande finale. Nous présenterons au paragraphe suivant le calcul des contenus énergétiques par unité de valeur de demande finale, en employant la méthode de R.A. Herendeen. Cette méthode sera étendue en intégrant les pertes, puis en considérant la formation de capital physique comme seule exogène au modèle (en imaginant une procédure qui permette d'utiliser la matrice  $A$  et non la matrice  $\bar{A}$ ).

### 3.2 LE CONTENU ENERGETIQUE PAR UNITE DE VALEUR DE DEMANDE FINALE

Nous commencerons par rappeler la méthode de R.A. Herendeen (1974) pour le calcul des contenus en énergie primaire par unité de valeur de demande finale. Cette méthode permet d'introduire explicitement différents agents énergétiques, ainsi que leurs transformations au sein du système énergétique (représenté matriciellement en valeur par la sous-matrice énergie-énergie de la matrice A (voir fig. 1.9, quadrant I)). Nous introduirons ensuite les rendements énergétiques des aménagements, procédés industriels, appareils d'utilisation pour calculer le contenu en énergie utile (fictif puisque rapporté à la demande finale). Finalement, nous ferons quelques remarques importantes à propos du calcul pratique des contenus énergétiques (problème du double comptage et coefficients d'équivalence des agents énergétiques).

#### 3.2.1 La méthode de R.A. Herendeen

Cette méthode propose de convertir la table Entrées-Sorties exprimée en valeur, en termes énergétiques, pour ensuite en déduire les contenus en énergie primaire. Pour cela, on considère que :

- il y a  $n_E$  agents énergétiques (ou en admettant une interdépendance entre produits et activités,  $n_E$  secteurs énergétiques),
- il y a  $n_M$  biens ou services produits (ou  $n_M$  secteurs de production de biens ou secteurs industriels),
- il y a donc  $n = n_E + n_M$  produits (ou secteurs de production).

Chaque secteur énergétique  $i$  ( $i = 1, \dots, n_E$ ) "produit" une quantité d'énergie  $\dot{E}_i$  qui est délivrée aux différents secteurs énergétiques  $k$  (pour transformation), aux différents secteurs industriels  $k$  et à la demande finale  $\dot{D}$  :

$$\dot{E}_i = \sum_{k=1}^{n_E} \dot{E}_{ik} + \sum_{k=1}^{n_M} \dot{E}_{ik} + \dot{E}_{iD} \quad i = 1, \dots, n_E$$

$$\dot{E}_i = \sum_{k=1}^n \dot{E}_{ik} + \dot{E}_{iD} \quad i = 1, \dots, n_E \quad (3.6)$$

On appelle le premier terme du membre de droite "énergie indirecte" et le second "énergie directe" (délivrée directement à la demande finale). L'énergie directe représente les besoins en énergie des consommateurs : énergie de chauffage des habitations, de transports, etc..

L'équation (3.6) peut se transformer ainsi :

$$\dot{E}_i = \sum_{k=1}^n \left( \frac{\dot{E}_{ik}}{\dot{X}_k} \right) \cdot \dot{X}_k + \left( \frac{\dot{E}_i \dot{D}}{\dot{D}_j} \right) \cdot \dot{D}_j \quad (3.7)$$

En introduisant l'équation (1.6), on a :

$$\begin{aligned} \dot{E}_i &= \sum_{k=1}^n \frac{\dot{E}_{ik}}{\dot{X}_k} \cdot \sum_{j=1}^n \left[ (I-A)^{-1} \right]_{kj} \cdot \dot{D}_j + \left( \frac{\dot{E}_i \dot{D}}{\dot{D}_j} \right) \cdot \dot{D}_j \\ &= \sum_{k=1}^n \sum_{j=1}^n \frac{\dot{E}_{ik}}{\dot{X}_k} \left[ (I-A)^{-1} \right]_{kj} \cdot \dot{D}_j + \left( \frac{\dot{E}_i \dot{D}}{\dot{D}_j} \right) \cdot \dot{D}_j \end{aligned} \quad (3.8)$$

Définissons :

- $0^r_{ik} = \frac{\dot{E}_{ik}}{\dot{X}_k}$  qui représente l'intensité énergétique en énergie de type  $i$  du secteur  $k$
- $0^s_{ij} = \frac{\dot{E}_i \dot{D}}{\dot{D}_j}$  qui représente l'énergie de type  $i$  délivrée à la demande finale, par unité de valeur de demande finale de produit  $j$ . Ainsi, si  $i \neq j$ ,  $0^s_{ij} = 0$  ( $i$  est un secteur énergétique).

L'équation (3.8) devient :

$$\dot{E}_i = \sum_{k=1}^n \sum_{j=1}^n 0^r_{ik} \cdot \left[ (I-A)^{-1} \right]_{kj} \cdot \dot{D}_j + 0^s_{ij} \cdot \dot{D}_j \quad (3.9)$$

Soit  $\dot{E}$  le vecteur de consommation d'énergie primaire ( $n_E$  composantes).

En relation matricielle, on a, après avoir formé les matrices  $0^r = ((0^r_{ik}))$  et  $0^s = ((0^s_{ij}))$ , de dimension  $n_E \times n$  :

$$\dot{E} = \left[ 0^r \cdot (I-A)^{-1} + 0^s \right] \cdot \dot{D} = 0^t \cdot \dot{D} \quad (3.10)$$

Chaque élément  ${}_0t'_{ij}$  de la matrice  ${}_0t'$ , de dimension  $n_E \times n$  indique la production totale d'énergie de chaque secteur énergétique  $i$  nécessaire pour fournir une valeur unitaire d'énergie, de bien ou de service  $j$  à la demande finale. Le contenu énergétique de chaque secteur  $j$ ,  ${}_0e'_j$ , est donc la somme de toutes les contributions de chaque secteur énergétique au secteur  $j$ , par unité de valeur de vente de produit  $j$  à la demande finale :

$${}_0e'_j = \sum_{i=1}^{n_E} {}_0t'_{ij} \quad \begin{matrix} j = 1, \dots, n \\ i = \text{secteur énergétique} \end{matrix} \quad (3.11)$$

L'équation (3.10) est ainsi la même que l'équation (1.43) à la différence près que l'on a considéré ici plusieurs agents énergétiques (alors qu'au chapitre 1, on a généralement considéré l'énergie, dans son ensemble).

L'équation (3.10) peut s'écrire :

$$\dot{E} = {}_0t' \cdot \dot{D} = {}_0t' \cdot (I-A) \cdot \dot{X}$$

Par secteur énergétique  $i$  :

$$\begin{aligned} \dot{E}_i &= \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n {}_0t'_{ij} \cdot (I-A)_{jk} \cdot \dot{X}_k \\ \dot{E}_i &= \sum_{j=1}^n {}_0t'_{ij} \cdot \dot{X}_j - \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n {}_0t'_{ij} \cdot A_{jk} \cdot \dot{X}_k \\ \dot{E}_i &= \sum_{j=1}^n {}_0t'_{ij} \cdot \dot{X}_j - \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n {}_0t'_{ij} \cdot \dot{C}_{jk} \end{aligned} \quad (3.12)$$

où  $\dot{C}_{jk}$  est la valeur des produits  $j$  vendus au secteur  $k$  (consommation intermédiaire). Le premier terme du membre de droite représente l'énergie (primaire) de type  $i$  contenue dans toute la production totale, le second l'énergie (primaire) de type  $i$  contenue dans toutes les entrées intermédiaires. La figure 3.1 permet de visualiser ce bilan énergétique dans lequel les pertes d'énergie n'interviennent pas.



Fig. 3.1 Bilan énergétique.

### 3.2.2 Intégration des pertes d'énergie

Imaginons qu'une quantité d'énergie de type  $i$ ,  $\dot{P}'_i$  est perdue, dans la représentation précédente. L'équation (3.12) peut être étendue de la manière suivante :

$$\dot{E}_i - \dot{P}'_i = \sum_{j=1}^n t'_{ij} \cdot \dot{X}_j - \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n t'_{ij} \cdot \dot{C}_{jk} \quad (3.13)$$

où les  $t'_{ij}$  sont les contenus en énergie, pertes énergétiques à l'amont déduites. Chaque élément  $t'_{ij}$  est tel que :

$$t'_{ij} = \sum_{k=1}^n r_{ik} \cdot (I-A)^{-1}_{kj} + s_{ij} \quad (3.14)$$

- $r_{ik} = \frac{\dot{E}_{ik} - \dot{P}'_{ik}}{\dot{X}_k}$  est l'intensité énergétique nette du secteur  $k$  ( $\dot{E}_{ik}$  et  $\dot{P}'_{ik}$  sont respectivement l'énergie et les pertes en énergie de type  $i$  perdus lors de la production de produits  $k$ ). En posant  $\dot{E}_{ik} - \dot{P}'_{ik} = \eta_{ik} \cdot \dot{E}_{ik}$ , où  $\eta_{ik}$  est le rendement énergétique des installations utilisant l'agent énergétique  $i$  pour produire des produits  $k$ , on a :

$$r_{ik} = \eta_{ik} \cdot \frac{\dot{E}_{ik}}{\dot{X}_k} = \eta_{ik} \cdot o_{ik}$$

- $s_{ij} = \eta_{ij} \cdot o_{ij}$  représente l'énergie de type  $i$  délivrée à la demande finale, les pertes énergétiques à l'utilisation étant déduites ( $\eta_{ij}$  est le rendement énergétique des appareils d'utilisation, pour  $i = j$ ; si  $i \neq j$ ,  $s_{ij} = 0$ ).

En définissant les matrices  $r = ((r_{ik}))$  et  $s = ((s_{ij}))$  de dimension  $n_E \times n$ , la matrice des contenus en énergie utile  $t' = ((t'_{ij}))$  s'écrit :

$$t' = r \cdot (I-A)^{-1} + s \quad (3.15)$$

Le contenu en énergie utile d'une unité de valeur de demande finale de produit  $j$  est égal à la somme des contenus en énergie utile de type  $i$  :

$$e'_j = \sum_{i=1}^{n_E} t'_{ij} \quad \begin{array}{l} j = 1, \dots, n \\ i = \text{secteur énergétique} \end{array}$$

Finalement, en relation matricielle, après avoir formé les vecteurs  $\dot{E} = (\dot{E}_i)$  et  $\dot{P}' = (\dot{P}'_i)$ , la relation (3.13) s'écrit :

$$\dot{E} - \dot{P}' = t' \cdot \dot{D}$$

L'énergie contenue dans la demande finale est donc égale à l'énergie primaire diminuée de toutes les pertes énergétiques.

### 3.2.3 Remarques

(i) Pour le calcul des contenus énergétiques, on doit posséder un certain nombre de statistiques. Ces dernières étant données pour une certaine époque, les contenus énergétiques seront valables pour cette époque. Sont nécessaires :

- une table des échanges inter-industriels, les vecteurs de production totale et de demande finale, pour  $n$  secteurs ( $n_E$  secteurs énergétiques et  $n_M$  secteurs industriels). On peut alors calculer la matrice  $A$  des coefficients d'entrée;
- une table des transactions énergétiques, pour les  $n$  secteurs correspondants. Chaque élément de cette table indique la quantité d'énergie de type  $i$  délivrée à un secteur  $k$ , pour que ce secteur  $k$  puisse produire. On peut alors calculer la matrice des intensités énergétiques  ${}_0r$ . On peut remarquer que  ${}_0r_{ik} = \dot{E}_{ik} / \dot{X}_K = \dot{C}_{ik} / \dot{X}_K \cdot p_{ik} = A_{ik} / p_{ik}$  où  $p_{ik}$  est le prix auquel le secteur  $k$  achète une unité d'énergie de type  $i$ . Ainsi, lorsque l'on connaît la matrice  $((A_{ik}))$  et la matrice  $((p_{ik}))$  des prix auxquels est délivrée l'énergie à tous les secteurs, on obtient directement la matrice  $(({}_0r_{ik}))$ ;
- une table des quantités d'énergie délivrée directement à la demande finale afin de calculer la matrice  ${}_0s$ ;

- pour le calcul des contenus en énergie utile, une table des rendements énergétiques des installations, par type d'énergie et par secteur.

(ij) Le tableau des échanges inter-industriels, puisqu'il comprend un certain nombre de secteurs énergétiques, décrit les échanges en valeur qui s'effectuent entre ces secteurs énergétiques. La sous-matrice "énergie-énergie" (quadrant I de la fig. 1.9) est donc une représentation en valeur du système énergétique de production. En raisonnant en termes d'énergie (joules), cette sous-matrice représente les transformations d'agents énergétiques primaires en agents énergétiques secondaires ou dérivés. Ceux-ci sont délivrés ensuite aux consommateurs intermédiaires (industries) et à la demande finale. En sommant sur toutes les lignes du tableau en termes énergétiques, la quantité d'énergie obtenue est supérieure à la quantité d'énergie réellement apportée (par exemple, on compte une fois l'énergie alimentant une centrale thermique et une fois l'énergie en sortant, qui seule est en fait délivrée aux consommateurs). Ce double comptage est dû à deux raisons :

- à la structure quelque peu différente du tableau des échanges inter-industriels et du tableau des transactions énergétiques (fig. 3.2). Alors que c'est la valeur ajoutée de chacun des secteurs énergétiques et industriels qui permet le bouclage du système économique, l'énergie est "produite" (c'est-à-dire extraite des sources d'énergie et s'il y a lieu concentrée, et importée) par les seuls secteurs énergétiques;
- au fait que les pertes d'énergie ne sont pas explicitement prises en compte.

Une application de l'équation (3.10), sans avoir remarqué ces questions, conduit inévitablement à une surestimation des contenus énergétiques : l'énergie contenue dans la demande finale serait supérieure à l'énergie réellement apportée. Nous allons raisonner alors en termes de pertes d'énergie, en construisant une table de dissipation énergétique qui ne comptabilise que les pertes d'énergie, là où elles ont lieu. Par exemple, la transformation de charbon en

électricité dans des centrales thermiques est représentée à l'intersection de la ligne "charbon" et de la colonne "électricité". Au lieu de compter le nombre de joules sous forme de charbon introduits dans les centrales, puis de distribuer la quantité d'électricité produite aux consommateurs, on indique simplement les pertes d'énergie qui ont lieu lors de cette transformation. L'électricité sortante est elle aussi une perte d'énergie possible puisque les consommateurs ne l'utiliseront qu'avec un certain rendement. Le système de production et de consommation d'énergie doit alors être vu comme un système de dissipation de l'énergie : tout se passe comme si, au lieu d'acheter de l'énergie, les consommateurs achètent la possibilité de perdre l'énergie qu'ils acquièrent. Les tables de dissipation de l'énergie suivent donc strictement le principe de conservation de l'énergie. Il s'ensuit que, en particulier, le kWh électrique doit naturellement être compté à 3600 kJ (revoir § 1.2.2 (ii)). On retrouvera ces questions à l'annexe A (§ A.2).

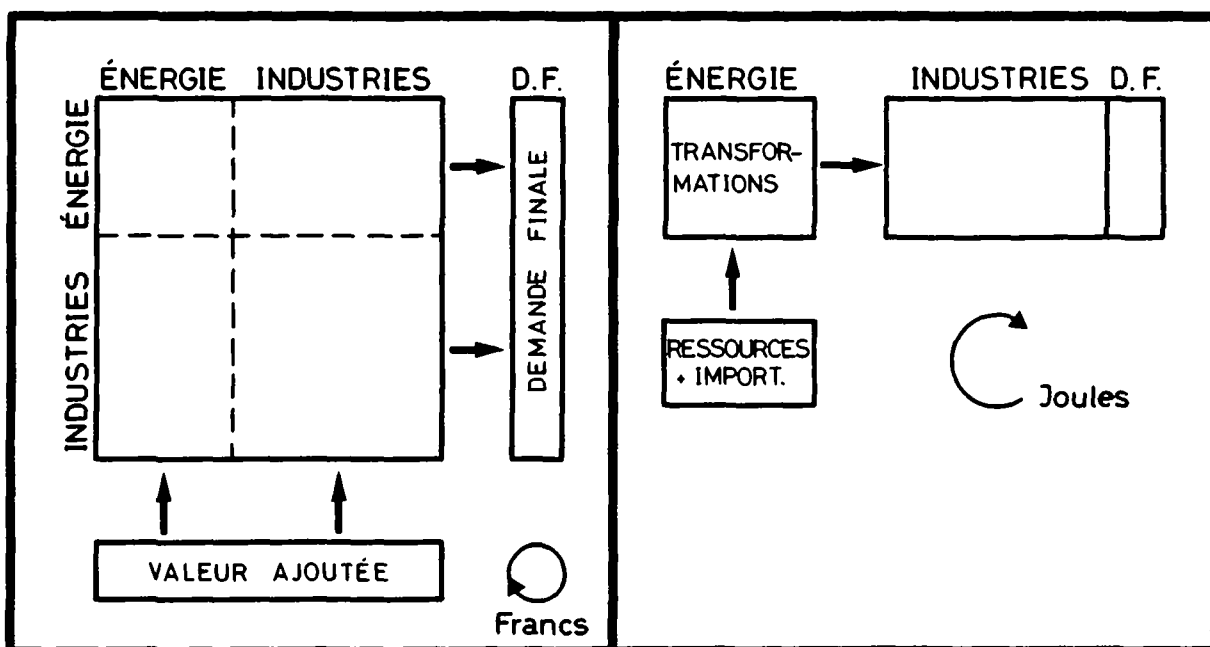


Fig. 3.2 Table des échanges inter-industriels et table de transactions énergétiques.



(iii) Le fait de compter non plus les flux énergétiques mais les pertes énergétiques, là où elles ont réellement lieu, rejoint la suggestion de J.L.R. Proops (1977) qui tend à développer des tables de dissipation énergétique. Pour chaque secteur  $i$ , une équation de dissipation peut être établie :

$$\dot{E}_i = \sum_j \dot{E}_{ij} + \dot{E}_{iD} \quad (3.16)$$

où  $\dot{E}_{ij}$  symbolise les pertes d'énergie provenant de la transformation  $i-j$  et  $\dot{E}_{iD}$  les pertes à la demande finale. En faisant l'hypothèse de fonctions de production linéaires, telles que :

$$\dot{E}_{ij} = q_{ij} \cdot \dot{E}_j, \quad (3.17)$$

l'équation (3.16) devient :

$$\dot{E}_i = \sum_j q_{ij} \cdot \dot{E}_j + \dot{E}_{iD}$$

En écriture matricielle, on obtient :

$$\dot{E} = (I - q)^{-1} \cdot \dot{E}_D \quad (3.18)$$

On remarquera la similitude de cette relation avec les équations (1.6) et (1.33).

### 3.3 LA GENERATION DE LA CONSOMMATION PRIVEE

Dans ce paragraphe, nous étudierons le modèle Entrées-Sorties de sorte que la production de tous les secteurs d'activité satisfasse à un vecteur de formation de capital (investissement) donné, la consommation privée étant rendue endogène et induite par l'investissement. On peut imaginer deux possibilités pour rendre endogène la consommation privée dans l'analyse Entrées-Sorties (K. Miyazawa, 1976) :

- soit considérer une matrice où un nouveau secteur serait introduit, celui des consommateurs privés. Le travail humain serait la production de ce secteur et les produits consommés en seraient les ressources. Cela revient à définir, comme nous l'avons fait auparavant une matrice  $\bar{A}$  de dimension  $n+1 \times n+1$ . Cependant, les coefficients de ce secteur ne sont pas à notre avis équivalents aux coefficients techniques (ou d'entrée) puisqu'ils dépendent fortement des décisions et des choix des consommateurs, en fonction de leurs revenus;
- soit introduire une fonction de consommation, sous forme matricielle, désagrégée suivant les différents secteurs économique et dépendante de la formation de capital. C'est dans cette voie que nous nous engageons, qui fait intervenir de manière explicite revenus et consommation. On considèrera donc que l'investissement est une donnée exogène au modèle, dont la consommation privée dépend. Ceci n'est pas sans rappeler l'effet multiplicateur de l'investissement introduit dans la théorie keynésienne.

#### 3.3.1 Le multiplicateur et l'analyse Entrées-Sorties

La théorie keynésienne a apporté à la discipline économique un nouveau concept, celui de la fonction de consommation dépendant des revenus (par exemple, au niveau général, du PIB) :

$$C = C(Y)$$

En supposant une fonction de consommation linéaire, on peut écrire, en appelant  $c$  la propension à consommer (c'est-à-dire la part du revenu qui est

consacrée à la consommation)<sup>1/</sup> :

$$\dot{C} = c \cdot \dot{Y} \quad (3.19)$$

Le revenu est donné par<sup>2/</sup> :

$$\dot{Y} = \dot{C} + \dot{K}$$

ou 
$$\dot{Y} = c \cdot \dot{Y} + \dot{K}$$

$\dot{Y}$  est ainsi fonction de  $\dot{K}$  :

$$\dot{Y} = \frac{\dot{K}}{1 - c} \quad (3.20)$$

C'est l'effet multiplicateur de l'investissement. Si la propension à consommer est égale à 0,60, le multiplicateur  $1/1 - c$  est égal à 2,5 et  $\dot{Y} = 2,5 \cdot \dot{K}$ . Cet effet, ainsi que le souligne L. Stoleru (1973) n'est pas dû à l'effet productif de l'investissement qui accroîtrait la capacité de production. C'est simplement un effet d'équilibre à court terme (et même instantané). La réalisation d'un investissement, au travers des salaires versés, est générateur d'une consommation supplémentaire (directe) puisqu'une partie de ces salaires est allouée à la consommation. Cette consommation constitue des revenus supplémentaires pour d'autres personnes qui elles-mêmes vont consommer, etc... Elle est donc génératrice de consommations supplémentaires (indirectes). L'accroissement total de la consommation qu'un investissement entraîne est donc :

$$\dot{C} = \frac{c}{1 - c} \cdot \dot{K} \quad (3.21)$$

---

1/ selon la théorie économique, on écrit en fait :  $\Delta C = c \cdot \Delta Y$  : à une variation de revenu correspond une variation de la consommation. Nous supposons donc qu'il n'est pas nécessaire d'écrire des équations différées dans le temps prenant en considération des délais de réaction.

2/ cette équation est en fait une équation d'équilibre. Par définition, le revenu est égal à la consommation plus l'épargne. A l'équilibre, l'épargne est égale à l'investissement.

L'investissement a ainsi une répercussion sur la consommation<sup>1/</sup>. Dans l'analyse Entrées-Sorties classique, cet effet n'est pas inclus puisque la consommation privée est exogène et ne dépend pas de l'investissement. Nous imaginerons donc une procédure où elle est endogène.

### 3.3.2 L'endogénéisation de la consommation privée

Pour une valeur donnée de la production  $\dot{X}$  (n composantes correspondant aux n secteurs d'activité), définissons un revenu total  $\dot{W}$ , scindé entre r classes de revenu, tel que :

$$\dot{W} = W \cdot \dot{X} \quad (3.22)$$

La matrice  $W$ , de dimension  $r \times n$ , représente la distribution des revenus, par unité de valeur de production des n secteurs d'activité, entre les r classes de revenu. Chaque élément  $W_{ij}$  indique donc la proportion de la production du secteur  $j$  attribuée à la classe de revenu  $i$ . Puisqu'une part de la production est réservée à l'achat de biens intermédiaires et à l'amortissement du capital, il est bien évident que :

$$\sum_{i=1}^r W_{ij} < 1$$

Ces revenus sont dépensés pour la consommation et épargnés. En utilisant une fonction de consommation linéaire, la consommation dépend des revenus :

$$\dot{C} = C \cdot \dot{W} \quad (3.23)$$

$\dot{C}$  est le vecteur de consommation privée (n composantes).  $C$  est la matrice  $n \times r$  des propensions à consommer. Chaque élément  $C_{ij}$  représente

---

1/ le multiplicateur montre donc l'action de l'investissement sur la production. Mais il existe une réaction de la production sur l'investissement: ce sont les investissements induits (P. Massé, 1968); tout accroissement de la production incite les entreprises à investir. L'investissement a donc aussi une répercussion sur les investissements dans d'autres secteurs. C'est le problème de la dynamique de l'investissement (principe d'accélération) qui ne sera pas abordé ici.

la proportion du revenu de la classe  $j$  dépensée pour l'achat de biens du secteur  $i$ . En combinant les équations (3.22) et (3.23), on obtient :

$$\dot{C} = CW \cdot \dot{X} \quad (3.24)$$

La consommation est donc ainsi fonction de la production.

On peut maintenant introduire dans l'analyse Entrées-Sorties la consommation privée, devenant endogène et induite par les investissements. A cet effet, il faut effectuer la chaîne des opérations suivantes (J.M. Toinet, 1978) :

- pour un investissement  $\dot{K}$ , la production directe à satisfaire par tous les secteurs économiques est :

$$\dot{X}_1 = (I-A)^{-1} \cdot \dot{K}$$

- cette production directe génère une consommation supplémentaire  $\dot{C}_1$ , donnée par l'équation (3.24) :

$$\dot{C}_1 = CW \cdot \dot{X}_1 = CW \cdot (I-A)^{-1} \cdot \dot{K}$$

- à son tour, cette consommation nécessite une nouvelle production supplémentaire  $\dot{X}_2$ , égale à :

$$\dot{X}_2 = (I-A)^{-1} \cdot \dot{C}_1 = (I-A)^{-1} \cdot CW \cdot (I-A)^{-1} \cdot \dot{K}$$

- celle-ci génère une consommation  $\dot{C}_2$  :

$$\dot{C}_2 = CW \cdot \dot{X}_2 = CW \cdot (I-A)^{-1} \cdot CW \cdot (I-A)^{-1} \cdot \dot{K}$$

et ainsi de suite.

Utilisons la notation :

$$H = CW \cdot (I-A)^{-1} \quad (3.25)$$

L'effet multiplicateur peut être décrit pas à pas :

$$\begin{aligned}\dot{X}_1 &= (I-A)^{-1} \cdot \dot{K} \\ \dot{X}_2 &= (I-A)^{-1} \cdot H \cdot \dot{K} \\ \dot{X}_3 &= (I-A)^{-1} \cdot H^2 \cdot \dot{K} \\ &\vdots \\ &\vdots\end{aligned}$$

et au pas  $n + 1$  :

$$\dot{X}_{n+1} = (I-A)^{-1} \cdot H^n \cdot \dot{K}$$

La production totale est alors :

$$\begin{aligned}\dot{X} &= \dot{X}_1 + \dot{X}_2 + \dots + \dot{X}_{n+1} \\ &= (I-A)^{-1} \cdot (I + H + H^2 + \dots + H^n) \cdot \dot{K}\end{aligned}$$

Pour que cette série converge, il est nécessaire et suffisant qu'elle tende vers  $(I-A)^{-1} \cdot (I-H)^{-1}$ . La production totale est donc :

$$\begin{aligned}\dot{X} &= (I-A)^{-1} \cdot (I-H)^{-1} \cdot \dot{K} \\ \dot{X} &= (I-A)^{-1} \cdot (I - CW \cdot (I-A)^{-1})^{-1} \cdot \dot{K}\end{aligned}\tag{3.26}$$

La consommation privée est ainsi rendue endogène par la matrice  $(I - CW \cdot (I-A)^{-1})^{-1}$ , qui indique le changement de la production totale due à la consommation induite par l'investissement. Le produit  $(I - CW \cdot (I-A)^{-1})^{-1} \cdot \dot{K}$  est égal à  $\dot{D}$  (demande finale).

L'équation (3.26) se met sous la forme suivante :

$$\begin{aligned}\dot{X} &= \left[ (I - CW \cdot (I-A)^{-1}) \cdot (I-A) \right]^{-1} \cdot \dot{K} \\ \dot{X} &= (I - A - CW)^{-1} \cdot \dot{K}\end{aligned}\tag{3.27}$$

Connaissant les matrices  $A$ ,  $C$  et  $W$ , l'augmentation de la production dans tous les secteurs d'activité nécessaire pour satisfaire un vecteur de formation de capital est donnée par l'équation (3.27), compte tenu des aspects induits. La consommation totale générée est :

$$\begin{aligned}\dot{C} &= CW \cdot \dot{X} \\ \dot{C} &= CW \cdot (I - A - CW)^{-1} \cdot \dot{K}\end{aligned}$$

On peut noter que si la répartition des salaires ou les modes de consommation changent, la production correspondante peut être aisément déterminée en élaborant de nouvelles matrices  $W$  et  $C$  qui refléteront ces changements (en supposant toutefois la constance des coefficients d'entrée).

### 3.4 LE CONTENU ENERGETIQUE PAR UNITE DE VALEUR DE FORMATION DE CAPITAL PHYSIQUE

Il est maintenant possible de déterminer l'énergie associée à la formation de capital physique, les impacts sur la consommation étant directement intégrés. Nous appellerons l'énergie investie dans le capital physique : énergie utile.

- (i) Rappelons que, dans notre approche, nous donnons un aspect physique au travail humain qui présente donc un certain contenu énergétique (fig. 1.8). L'énergie associée au travail humain n'est plus seulement l'énergie nécessaire au travail musculaire que peut fournir un homme, mais l'énergie associée à sa consommation totale de produits. Cette énergie est une contribution nécessaire à la formation de capital physique. Nous appliquerons les résultats des paragraphes précédents pour calculer l'énergie investie dans la formation de capital physique. Celle-ci peut alors être décomposée en une part directe (directement investie dans la formation de capital, comme si on assimilait un bien d'équipement à un bien de consommation) et une part indirecte (due à la génération de la consommation, ce qui permet de faire la différence entre un bien d'équipement et un bien de consommation) (fig. 3.3).

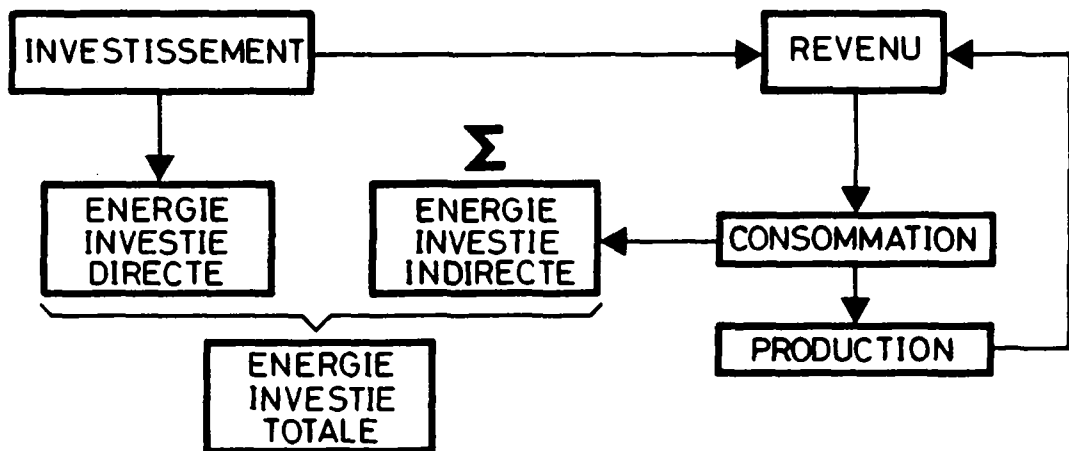


Fig. 3.3 Investissement et énergie investie



- (ii) Pour un vecteur de formation de capital physique, l'énergie investie est donnée par l'équation (3.10) :

$$\dot{E}_1 = [r \cdot (I-A)^{-1} + s] \cdot \dot{K}$$

On doit ici noter que la matrice  $s$  qui a des termes non nuls uniquement sur la diagonale et pour les seuls secteurs énergétiques n'a aucune influence sur  $\dot{E}_1$ . Le vecteur  $\dot{K}$  a en effet des termes non nuls uniquement pour les secteurs industriels<sup>1/</sup>.

La consommation induite par  $\dot{K}$  est :

$$C_1 = CW \cdot (I-A)^{-1} \cdot \dot{K}$$

qui, pour être satisfaite, nécessite la fourniture d'une quantité d'énergie  $\dot{E}_2$  :

$$\dot{E}_2 = [r \cdot (I-A)^{-1} + s] \cdot CW \cdot (I-A)^{-1} \cdot \dot{K}$$

En répétant le même raisonnement pour  $n$  étapes, on trouve finalement l'énergie investie telle que :

$$\dot{E} = [r \cdot (I-A)^{-1} + s] \cdot [I - CW \cdot (I-A)^{-1}]^{-1} \cdot \dot{K} \quad (3.29)$$

Cette équation peut se mettre sous la forme suivante :

$$\dot{E} = \left\{ r \cdot (I - A - CW)^{-1} + s \cdot [I - CW \cdot (I - A)^{-1}]^{-1} \right\} \cdot \dot{K}$$

Le deuxième terme du membre de droite montre l'effet de la consommation en énergie directe des consommateurs privés.

---

1/ c'est pour cette raison que l'on a négligé au chapitre 1 (§ 1.3.3 (iii) point d) et § 1.3.4 (i)) la consommation directe d'énergie nécessaire pour assembler le capital physique, qui n'est pas donnée dans les statistiques : on investit en biens d'équipement et non en énergie directe.

Le contenu en énergie utile d'une unité de valeur de formation de capital physique dans le secteur  $j$  est, comme précédemment :

$$e_j = \sum_{i=1}^{n_E} \left\{ [r \cdot (I-A)^{-1} + s] \cdot [I - CW \cdot (I-A)^{-1}]^{-1} \right\}_{ij} \quad (3.30)$$

Si les rendements énergétiques sont négligés, le contenu en énergie primaire par unité de valeur de formation de capital,  ${}_0e$  se calcule avec cette même équation, les matrices  $r$  et  $s$  étant respectivement remplacées par  ${}_0r$  et  ${}_0s$ .

### 3.5 LE CONTENU ENERGETIQUE DES IMPORTATIONS

Les contenus énergétiques tels qu'ils ont été présentés ne sont valables que pour le marché intérieur du système considéré. En ouvrant ce dernier sur l'extérieur, il faut tenir compte des échanges de produits avec d'autres systèmes. Ainsi, les importations ont un contenu énergétique qu'il faut intégrer dans le calcul du contenu réel. En effet, les producteurs peuvent acquérir leurs fournitures à l'extérieur et importent de manière indirecte une quantité d'énergie qui sera incorporée dans leur propre production. Il va de soi que l'énergie importée de manière indirecte peut être calculée si l'on connaît les contenus énergétiques des produits des pays exportateurs. Mais ceux-ci importent eux-mêmes des produits et il est nécessaire d'établir une procédure qui permette d'estimer l'augmentation des contenus énergétiques due à l'énergie contenue dans les biens importés (R. Denton, 1975; J.M. Toinet, 1979).

- (i) Les importations sont retranchées de la demande finale pour former la demande finale nette, dont toutes les composantes font partir du PIB (§ 1.1.1 (x)). De cette manière, la production totale  $\dot{X}$  devient la production totale indigène. La demande de produits importés peut alors être endogénéisée, comme la consommation privée, au paragraphe 3.3. En définissant une matrice de propension à importer  $M$ , de dimension  $n \times n$ , la valeur des importations  $\dot{M}$  est définie par :

$$\dot{M} = M \cdot \dot{X} \quad (3.31)$$

Chaque élément  $M_{ij}$  de la matrice  $M$  indique la valeur des produits que le secteur  $i$  doit importer pour que soit réalisée une production de valeur unitaire dans le secteur  $j$ . Ainsi, chaque composant  $\dot{M}_i$  du vecteur  $\dot{M}$  représente la valeur des produits importés par le secteur  $i$ . Or, ces produits importés ne sont pas nécessairement des produits de ce secteur : le secteur "machines" peut fort bien avoir besoin d'importer des produits du secteur "chimie". Une matrice  $B$ , de dimension  $n \times n$ , dont chaque élément  $B_{ki}$  mesure la part des importations du secteur  $i$  en produits du secteur  $k$ , permettra de définir le vecteur  $\dot{B}$  dont chaque composante  $\dot{B}_k$  représente la valeur totale

des biens  $k$  que tous les secteurs  $i$  devront importer pour que chaque secteur  $j$  puisse produire une valeur unitaire de produits  $j$  :

$$\dot{B}_k = \sum_i B_{ki} \cdot \dot{M}_i = \sum_i \sum_j B_{ki} \cdot M_{ij} \cdot \dot{X}_j$$

ou  $\dot{B} = B \cdot \dot{M} = BM \cdot \dot{X}$  (3.32)

Pour des raisons statistiques, la matrice de distribution des importations  $B$  n'est pas toujours connue. Une première approximation consiste à supposer que chaque secteur importe des biens principalement classés dans son secteur, de telle sorte que  $B$  est une matrice diagonale unité. On a alors  $BM = M$  et  $\dot{B} = \dot{M}$ .

L'équation de base de l'analyse Entrées-Sorties s'applique à la production intérieure. Pour satisfaire à la demande finale, la production à atteindre par tous les secteurs est telle que :

$$\dot{X} = A \cdot \dot{X} + \dot{D} - \dot{M}$$

Pour satisfaire à la formation de capital physique, elle est :

$$\dot{X} = A \cdot \dot{X} + CW \cdot \dot{X} + \dot{K} - \dot{M}$$

Les vecteurs des importations,  $\dot{B}$ , se présente alors sous deux formes, suivant que l'on désire satisfaire la demande finale ou la formation de capital :

$$\dot{B} = BM \cdot (I - A + M)^{-1} \cdot \dot{D}$$

$$\dot{B} = BM \cdot (I - A + M - CW)^{-1} \cdot \dot{K}$$

(3.33)

(ii) Nous raisonnerons ici avec la première de ces équations (satisfaction de la demande finale). Il en va de même pour l'autre (satisfaction de la formation de capital), à la matrice  $CW$  près. Toujours pour simplifier les notations, le contenu énergétique sera noté  $e$ .

Soit  $e_{Mk}$  le contenu énergétique du produit  $k$  importé, parmi les  $n$  différents produits. L'énergie totale contenue dans les importations est :

$$\dot{E}_M = \sum_{k=1}^n e_{Mk} \cdot \dot{B}_k$$

ou, en formant le vecteur ligne  $e_M$  et en utilisant l'équation (3.33) :

$$\dot{E}_M = e_M \cdot \dot{B} = e_M \cdot BM \cdot (I - A + M)^{-1} \cdot \dot{D} \quad (3.34)$$

L'énergie totale  $\dot{E}_T$ , consommée par le système, est formée de l'énergie directe nécessaire à la production intérieure,  $\dot{E}_I$ , et de l'énergie contenue dans les importations :

$$\dot{E}_T = \dot{E}_I + \dot{E}_M$$

En utilisant les équations (3.10) et (3.34), on a :

$$\dot{E}_T = [r \cdot (I - A)^{-1} \cdot s] \cdot \dot{D} + e_M \cdot BM \cdot (I - A + M)^{-1} \cdot \dot{D} \quad (3.35)$$

Le contenu énergétique total d'un produit j est donc :

$$e_{Tj} = \sum_{i=1}^{n_E} [r \cdot (I - A)^{-1} + s]_{ij} + \sum_{k=1}^n e_{Mk} \cdot [BM \cdot (I - A + M)^{-1}]_{kj} \quad (3.36)$$

ceci pour tout j parmi les n produits,  $n_E$  étant le nombre d'agents énergétiques considérés.

Simplifions les notations en posant :

$$t = r \cdot (I - A)^{-1} + s$$

$$G = BM \cdot (I - A + M)^{-1}$$

L'équation (3.36) s'écrit alors :

$$e_{Tj} = \sum_{i=1}^{n_E} t_{ij} + \sum_{k=1}^n e_{Mk} \cdot G_{kj}$$

Le premier terme du membre de droite est le contenu énergétique intérieur  $e_j$  :

$$e_{Tj} = e_j + \sum_{k=1}^n e_{Mk} \cdot G_{kj} \quad (3.37)$$

- (iii) Une procédure par itérations permettra d'estimer le contenu énergétique des produits  $k$  importés,  $e_{Mk}$ , à partir de l'équation (3.37). Dans un premier temps, on suppose qu'un système 1 ou qu'un pays 1 (indice 1) importe tous ses biens du même système 2 ou pays 2 (indice 2) :

$$1^{e_{Tj}} = 1^{e_j} + \sum_{k=1}^n 2^{e_{Tk}} \cdot 1^{G_{kj}} \quad (3.38)$$

puisque le contenu de tous les biens exportés par le pays 2 est égal au contenu de tous les biens importés par le pays 1 ( $1^{e_{Mk}} = 2^{e_{Tk}}$ ).

On peut appliquer la même hypothèse pour le pays 2 qui importerait tous ses biens du même pays 3 :

$$2^{e_{Tk}} = 2^{e_k} + \sum_{i=1}^n 3^{e_{Ti}} \cdot 2^{G_{ik}} \quad (3.39)$$

Combinons les équations (3.38) et (3.39) :

$$1^{e_{Tj}} = 1^{e_j} + \sum_{k=1}^n 2^{e_k} \cdot 1^{G_{kj}} + \sum_{k=1}^n \sum_{i=1}^n 3^{e_{Ti}} \cdot 2^{G_{ik}} \cdot 1^{G_{kj}}$$

Cette procédure peut être appliquée pour  $l$  pays. On trouve alors l'équation (3.40), où  $\alpha$  est une fonction des contenus énergétiques du  $l$ -ième pays et du produit des éléments  $h^{G_{ij}}$  pour les  $l$  pays :

$$1^{e_{Tj}} = 1^{e_j} + \sum_{k=1}^n 2^{e_k} \cdot 1^{G_{kj}} + \sum_{k=1}^n \sum_{i=1}^n 3^{e_i} \cdot 2^{G_{ik}} \cdot 1^{G_{kj}} + \dots + \alpha \left( 1^{e_{Tj}}, \prod_{h=1}^l h^{G_{ij}} \right) \quad (3.40)$$

Les importations ne forment généralement qu'une part de la production d'un pays. Cela implique que  $\alpha$  tend vers 0 quand le nombre de pays considérés,  $l$ , s'accroît (du reste, dans les applications pratiques, l'équation (3.40) converge très rapidement). Si l'on s'arrête aux deux premiers termes et si l'on suppose que les contenus énergétiques intérieurs des deux pays considérés sont égaux, on obtient :

$$1^{e_{Tj}} = 1^{e_j} + \sum_{k=1}^n 1^{e_k} \cdot G_{kj}$$

ou, en relation matricielle :

$$e_T = e \cdot (I + G) \quad (3.41)$$

Cette relation sera utilisée par la suite. Un niveau plus élevé des contenus énergétiques peut être trouvé en supposant en outre que la structure des importations est identique pour tous les pays ( ${}_iG = {}_jG$ ). Sous forme matricielle, l'équation (3.40) devient :

$$e_T = e \cdot (I + G + G^2 + \dots + G^Z)$$
$$e_T = e \cdot (I - G)^{-1} \quad (3.42)$$

Rappelons finalement que si l'on connaît les contenus énergétiques totaux des produits exportés par tous les pays contribuant aux importations d'un pays, ainsi que la structure des importations de ce pays importateur, on peut calculer directement l'énergie importée de manière indirecte sans avoir recours aux estimations données par les équations précédentes. Cela fournit donc un bon contrôle.

### 3.6 CONCLUSIONS

L'analyse Entrées - Sorties présente deux avantages importants : elle est détaillée (ventilation des secteurs d'activité) et globale (toutes les activités économiques sont incluses). Combinée avec des tables de dissipation énergétique, elle est particulièrement adaptée au calcul des contenus énergétiques. Etendue pour intégrer le processus de génération de la consommation induite par l'investissement, elle permet le calcul des contenus énergétiques par unité de valeur de formation de capital physique, dans différents secteurs. Si l'on introduit les rendements énergétiques des transformations à la production et à la consommation, il est possible de trouver l'énergie utile investie dans la formation de capital physique. Nous appliquerons tous les résultats obtenus dans ce chapitre à des cas concrets, pour divers pays européens.



## CHAPITRE 4

### APPLICATIONS : UNE COMPARAISON DES CONTENUS ÉNERGÉTIQUES DANS PLUSIEURS PAYS EUROPÉENS

Nous présentons dans ce chapitre une application pratique du contenu énergétique pour différents secteurs d'activité de plusieurs pays européens. Les structures économiques de chaque pays ne sont pas identiques puisqu'elles dépendent, entre autres, des investissements effectués par le passé, donc du capital physique existant. Les investissements qui permettent de modifier les structures économiques sont d'actualité dans le problème des restructurations industrielles et dans le problème de la dépendance vis-à-vis de l'extérieur. Ils ne sont alors pas sans conséquences à propos des questions énergétiques.

Le concept de contenu énergétique est particulièrement adapté pour estimer les répercussions énergétiques de modifications économiques : par exemple la croissance du PIB<sup>1/</sup>, ou un changement de structure du PIB ont certains impacts sur la consommation et sur les importations d'énergie, comme sur la consommation et sur les importations de biens. Ces dernières présentant un contenu énergétique, il y a lieu d'en tenir compte, ainsi que de l'énergie associée aux exportations de biens, pour établir la balance énergétique d'un pays et estimer la véritable consommation d'énergie.

Les contenus énergétiques seront calculés à l'aide des équations développées au chapitre précédent; les secteurs d'activité des tables Entrées-Sorties et des tables de dissipation énergétique doivent correspondre. En outre, les données disponibles doivent être cohérentes, complètes et suffisamment désagrégées. Les statistiques publiées par l'Office statistique des Communautés européennes (OSCE) remplissent ces conditions, pour autant que quelques modifications et compléments puissent y être apportés.

---

1/ le PIB est certes la résultante d'un ensemble de facteurs contribuant à sa réalisation. Cependant, on peut utiliser la méthode des scénarios économiques en faisant des hypothèses de croissance du PIB et en évaluer de manière mécanique les répercussions sur un certain nombre de variables (voir page 44).

Les pays pour lesquels ces contenus énergétiques seront estimés sont : la République Fédérale d'Allemagne, la France, l'Italie, la Belgique et le Royaume-Uni. Un ensemble "moyen et représentatif" des conditions énergétiques et économiques prévalant en Europe est en outre donné par l'Europe des Six (c'est-à-dire les pays mentionnés, sans le Royaume-Uni et en ajoutant les Pays-Bas et le Luxembourg). Pour ces pays, on calculera les contenus énergétiques de 14 secteurs industriels à l'aide des statistiques de l'OSCE. L'année de référence est 1970, pour laquelle les statistiques sont disponibles et uniformisées sur une même base (les tables Entrées - Sorties pour 1975 ne sont pas encore publiées).

De plus, un effort particulier sera porté sur la Suisse, malgré les lacunes statistiques, en construisant une table Entrées-Sorties de 17 secteurs industriels (méthode "rAs"), puis en estimant les contenus énergétiques sur la base des échanges extérieurs avec les pays de la Communauté européenne. L'énergie contenue dans les biens importés et exportés sera explicitement mise en évidence pour établir la consommation réelle d'énergie de ces pays.

Le but de ce chapitre est de présenter les contenus énergétiques pour un certain nombre de secteurs industriels de divers pays et la même année. Les contenus énergétiques ne seront pas désagrégés suivant les agents énergétiques qui y contribuent (bien que cette désagrégation ait été nécessaire pour leur calcul) afin de ne pas alourdir les résultats et comparaisons. C'est un choix dû au fait qu'il n'est ici pas question d'étudier les parts de marché des différents agents ni les possibilités de substitution entre les agents. Ce qui nous intéresse est de montrer l'importance de l'énergie pour former une unité de valeur de demande finale ou une unité de valeur de capital physique.

#### 4.1 LES CONTENUS ENERGETIQUES DANS QUELQUES PAYS DES COMMUNAUTES EUROPEENNES, EN 1970

##### 4.1.1 Les tables de dissipation énergétique

L'annexe A décrit les étapes qui ont conduit à l'établissement des tables de dissipation de l'énergie pour les pays mentionnés, suivant les lignes exposées au chapitre 3. Le double comptage dû aux agents énergétiques dérivés et à la structure des tables Entrées-Sorties est évité en raisonnant en termes de pertes d'énergie. Ainsi, les "ressources"<sup>1/</sup> énergétiques sont vues comme des pertes potentielles d'énergie et les consommateurs achètent la possibilité de perdre l'énergie. Ces tables respectant le principe de conservation de l'énergie, il s'ensuit que l'énergie électrique est comptée à sa valeur calorifique (1 kWh = 3600 kJ) et n'est pas valorisée pour tenir compte de ses possibilités "nobles" d'utilisation (1 kWh  $\cong$  2,5 x 3600 kJ) ce qui amènerait une sous-estimation des pertes d'énergie (voir §1.2.2 (ii)). Par suite, le rendement des centrales nucléaires est introduit et les pertes de chaleur<sup>2/</sup> équivalentes sont comptées. A cet effet, on introduit le secteur "minerais et produits de la transformation des matières fissiles et fertiles" (ou secteur "uranium") qui est considéré comme un secteur énergétique où ont lieu des pertes d'énergie.

Les produits énergétiques utilisés à des fins non énergétiques (dérivés du pétrole, naphtas, ...) ont été répartis entre les diverses industries, car ils ont un certain contenu énergétique, comme les biens.

Les secteurs énergétiques et les secteurs industriels pour lesquels existent des statistiques en termes d'énergie ne sont pas nécessairement identiques aux secteurs pour lesquels on possède des statistiques en valeur. Une correspondance a dû être effectuée, d'une part en agrégeant certains secteurs

---

1/ les "ressources" sont à prendre ici au sens de la terminologie Entrées-Sorties (à ne pas confondre avec les ressources d'énergie qui ont une signification autre en économie de l'énergie).

2/ si les rejets thermiques des centrales étaient utilisés, la comptabilité en termes de pertes d'énergie serait tout à fait appropriée. L'agent énergétique "chaleur à 40°C" distribuée aux consommateurs serait alors explicitement introduit. Les pertes énergétiques se résumeraient aux pertes par cheminées, tuyaux, échangeurs, etc...

entre eux, d'autre part en faisant appel à des statistiques ou des estimations d'origine diverse (voir annexe A). Finalement, les secteurs considérés dans ce paragraphe sont les suivants (pour plus de détails, voir les tableaux A.29 et A.37) :

SECTEURS ENERGETIQUES

1. Charbon, lignite et briquettes
2. Produits de la cokéfaction
3. Pétrole brut, gaz naturel et produits pétroliers
4. Energie électrique, gaz dérivés, vapeur et eau
5. Minerais et produits de la transformation des matières fissiles et fertiles

SECTEURS INDUSTRIELS

1. Minerais et métaux ferreux et non ferreux autres que fertiles et fissiles
2. Minéraux et produits à base de minéraux non métalliques
3. Produits chimiques
4. Construction
5. Fabrications métalliques
6. Construction de machines
7. Fabrications électriques
8. Textiles, habillement, cuir
9. Papier, articles en papier et imprimés
10. Produits alimentaires
11. Autres industries manufacturières
12. Transport par route et rail
13. Transport par air et eau
14. Services

Il faut noter que le secteur No 11 est un secteur qui regroupe des activités diverses (industrie du bois, du caoutchouc, bijouterie, instruments de musique, etc...) et qui est encore moins homogène que les autres secteurs (il a été nécessaire de l'introduire pour respecter la comptabilité globale en termes de valeur et en termes d'énergie). De plus, les secteurs

No 12 et 13 sont des secteurs "services de transport" (donc commerciaux). On doit bien les différencier des transports privés des consommateurs. Ainsi, pour ses transports, un consommateur privé peut faire appel à des services commerciaux (par exemple, train, secteur No 12) ou acquérir un véhicule (secteur No 6 "construction de machines" qu'il n'a pas été possible de ventiler en plusieurs sous-secteurs à cause du manque de données énergétiques) et des carburants (secteur No 3).

L'annexe C donne en outre la liste des 44 secteurs des tables Entrées-Sorties élaborées par l'OSCE suivant la nomenclature NIPRO. Ces tables ont donc été agrégées suivant les 19 secteurs ci-dessus, pour lesquels des statistiques en termes énergétiques existent.

#### 4.1.2 Les contenus en énergie primaire par unité de valeur de demande finale

Pour faciliter les comparaisons entre pays, une unité monétaire commune a été choisie : l'unité de compte européenne (EUR). Le tableau 4.1 indique les taux de change en 1970 avec les monnaies nationales pour les 5 pays des Communautés européennes.

R. F. A.	France	Italie	Belgique	Royaume-Uni
D. M.	F. F.	LIT.	B F R	U.K.L.
3,66000	5,55419	625,000	50,0000	0,416667

Tableau 4.1 Taux de change d'une unité de compte européenne (EUR) dans les monnaies nationales , 1970.

Le tableau 4.2 présente le contenu énergétique<sup>1/</sup> des 14 secteurs industriels par unité de valeur de demande finale, en MJ/EUR pour les 5 pays et l'Europe des Six.

Numéro des secteurs	R.F.A.		FRANCE		ITALIE		BELGIQUE		ROYAUME-UNI		EUROPE DES SIX	
	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B
1	42,9	62,1	40,8	79,7	36,4	78,0	37,7	74,8	65,4	89,1	49,3	72,0
2	76,4	100,3	100,1	113,4	136,6	164,1	104,9	137,8	121,6	149,9	102,6	123,5
3	72,4	111,7	80,8	98,6	143,8	179,2	90,0	124,0	131,5	167,8	106,1	135,6
4	28,6	41,0	25,2	35,2	37,4	51,8	37,4	60,8	43,8	60,7	32,7	44,5
5	92,9	107,5	75,3	86,3	103,2	126,5	185,4	203,2	137,0	160,3	103,6	116,1
6	27,9	38,8	24,3	32,9	33,8	48,8	20,1	31,0	45,5	58,4	33,6	43,7
7	28,2	39,8	22,9	31,5	29,1	42,9	16,4	25,7	48,3	63,4	31,0	41,3
8	26,0	39,1	24,4	32,4	34,4	46,3	21,2	35,4	54,0	70,0	33,0	43,9
9	27,2	38,4	34,0	42,0	53,8	70,2	29,2	45,8	38,2	51,0	36,3	47,5
10	20,2	32,7	19,1	25,1	19,2	26,3	19,8	32,8	31,4	42,7	22,2	31,7
11	31,7	46,5	26,6	36,6	43,1	61,7	39,6	55,4	60,4	85,1	37,9	50,7
12	65,7	98,6	52,2	63,6	75,6	107,5	53,8	89,5	71,3	91,1	64,2	90,7
13	31,7	83,2	20,1	31,2	29,4	71,5	30,6	113,2	32,1	95,5	30,5	69,0
14	25,5	36,0	15,3	20,4	17,9	25,4	18,1	34,4	26,6	33,7	22,4	30,7

Tableau 4.2 Contenus en énergie primaire par unité de valeur de demande finale, en MJ/EUR, 1970.

Colonne A : sans l'énergie contenue dans les importations de biens.

Colonne B : avec l'énergie contenue dans les importations de biens.

La consommation annuelle en énergie primaire d'un pays (qui est la somme de l'énergie directe importée et de l'énergie directe produite de manière indigène) est donc retrouvée par multiplication du vecteur-ligne des contenus énergétiques et du vecteur-colonne de la demande finale annuelle.

<sup>1/</sup> en raisonnant en termes de pertes d'énergie, il faudrait dire contenu en pertes potentielles d'énergie primaire.

La colonne A indique les contenus sans tenir compte de l'énergie contenue dans les biens importés (application de l'équation (3.11)). La colonne B indique ces contenus en intégrant l'énergie contenue dans les biens importés, en utilisant l'équation (3.41). L'application de l'équation (3.42) conduit à des contenus supérieurs, de l'ordre de 10 % en plus. On a préféré l'équation (3.41) afin de considérer que les pays moins développés exportaient des biens à contenu énergétique moindre.

Pour chaque pays, les poids relatifs des contenus énergétiques entre les différents secteurs restent sensiblement identiques : les secteurs à haut contenu sont les secteurs "minéraux et produits à base de minéraux non métalliques" (No 2), "chimie" (No 3) et "fabrications métalliques" (No 5) (fig. 4.3). Le secteur "services" (No 14) demande le moins d'énergie directe et indirecte, ainsi que le secteur "alimentation" (No 10, qui n'inclue pas les engrais comptés dans le secteur "chimie"). Par contre, des différences assez importantes ont lieu dans la comparaison entre pays. La France et la R.F.A. ont dans l'ensemble des contenus comparables sauf pour les secteurs No 12 et 13 "transports". Ceci est peut-être dû à la mauvaise qualité de la ventilation des données entre les transports à des fins commerciales et les transports privés (voir annexe A). La Belgique se rapproche pour certains secteurs de ces deux pays (transformation de produits semi-finis en produits finis, biens de consommation) alors que les autres secteurs belges sont proches des secteurs correspondants du Royaume-Uni, exception faite du secteur No 5 "fabrications métalliques". Les contenus énergétiques du Royaume-Uni sont souvent les plus élevés, ce qui peut être attribué à la vétusté de l'appareil de production (comme pour les secteurs belges de production de produits semi-finis). L'Italie se situe à mi-chemin entre la Belgique et le Royaume-Uni, avec des pointes dans les secteurs No 2 "minéraux", No 3 "chimie" et No 9 "papier". Ces différences peuvent paraître surprenantes dans la mesure où la consommation globale d'énergie par unité de valeur de demande finale est sensiblement identique en Italie, en Belgique, en R.F.A. et en France (de 42 MJ/EUR à 46 MJ/EUR) mais est nettement plus forte au Royaume-Uni (61 MJ/EUR) (tableau 4.4).

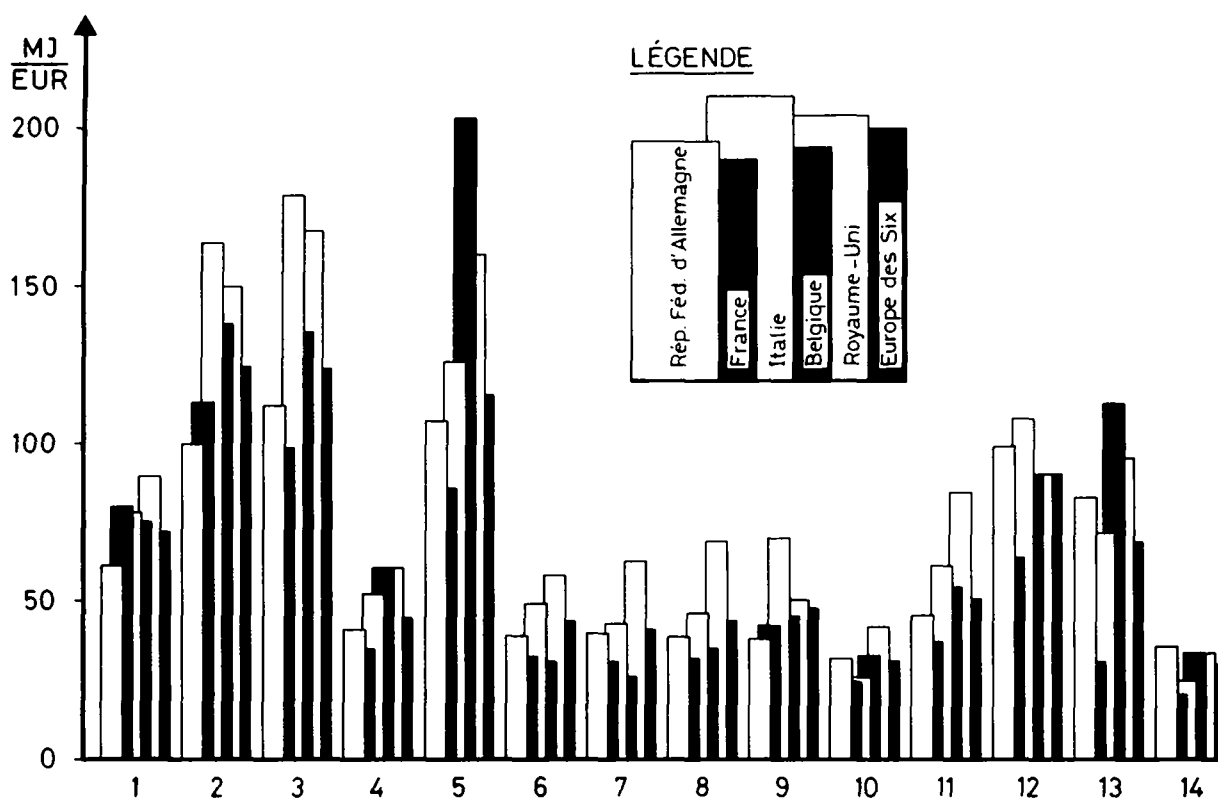


Fig. 4.3 Contenus en énergie primaire par unité de valeur de demande finale en MJ/EUR, 1970.

	Énergie consommée par unité de valeur de			
	PIB (Y)	demande finale	consommation finale	formation de capital
	É / Y	É / D	É / C	É / K
R.F.A.	54,4	46,1	78,8	204,0
FRANCE	48,7	42,4	66,2	208,1
ITALIE	50,6	42,9	65,2	237,9
BELGIQUE	67,5	45,7	92,6	297,6
ROYAUME - UNI	73,7	60,7	91,9	399,0

Tableau 4.4 Comparaison entre pays européens, en MJ/EUR, 1970 (contenu énergétique des biens importés non considéré)



Ces valeurs moyennes dépendent de la structure de la demande finale. Celle-ci est donc orientée dans une direction plus "énergivore" au Royaume-Uni que dans les autres pays. En intégrant importations et exportations, la situation au point de vue énergétique est nettement plus favorable en France et en Italie qu'en Belgique et au Royaume-Uni. Par comparaison avec le niveau des contenus énergétiques (fig. 4.3) on peut donc dire que les consommateurs italiens achètent moins de produits à haut contenu énergétique que les Belges et les Britanniques, et qu'il en va de même des Français vis-à-vis des Allemands<sup>1/</sup>. A l'inverse, les consommateurs français achètent plutôt plus de produits à haut contenu énergétique que les Italiens puisqu'en général les contenus énergétiques sont plus élevés en Italie qu'en France. Un effort d'économies d'énergie dans les industries italiennes aurait ainsi un impact sur la consommation globale d'énergie du pays (pour autant que les investissements nécessaires soient rentables). Inversement, en R.F.A., les consommateurs ont un rôle à jouer pour la diminution de la consommation d'énergie tandis qu'en Belgique et au Royaume-Uni, c'est à la fois sur les consommateurs et les industries qu'il faut agir. Il en va de même, mais dans une bien moindre mesure, pour la France.

#### 4.1.3 Le contenu en énergie primaire par unité de valeur de formation de capital physique

Le tableau 4.4 montre aussi les différences dans le rapport énergie primaire consommée / formation de capital. Le rapport  $E/K$  varie du simple au double entre la R.F.A. et le Royaume-Uni. Il est intéressant de voir comment se dissocie ce rapport, suivant les contenus énergétiques des différents secteurs d'activité, par unité de valeur de formation de capital. Pour cela, on a employé l'équation (3.30) dont l'application a nécessité, en plus des tables de dissipation énergétique et Entrées-Sorties, la construction de la matrice CW qui reflète la consommation induite par l'investissement. La ventilation de la consommation et des revenus entre les différentes classes de revenus n'a pas ici été effectuée, principalement par manque de statistiques à disposition. Il faudrait en effet définir plusieurs classes de revenus, étudier comment les personnes qui appartiennent à chaque classe dépensent leurs revenus et connaître pour chaque secteur industriel la

---

*1/ ces résultats sont valables pour autant que l'on considère le niveau de désagrégation suffisant.*

répartition de ces classes. La matrice CW a alors été générée par un vecteur de consommation et un vecteur de revenus sur la base des données de 1970. Autrement dit, on ne considère qu'une seule classe de revenu et qu'une manière de consommer, quel que soit le revenu.

Le tableau 4.5 indique les contenus en énergie primaire des secteurs, la première colonne négligeant l'énergie contenue dans les importations de biens, la seconde en tenant compte. D'autre part, on a considéré que l'effet multiplicateur a évidemment une influence sur le volume des importations de biens (puisque les produits consommés par les consommateurs privés peuvent être pour une part importés), donc sur l'énergie correspondante, mais qu'il n'entraîne pas à l'étranger de consommation induite.

Numéro des secteurs	R.F.A.		FRANCE		ITALIE		BELGIQUE		ROYAUME-UNI		EUROPE DES SIX	
	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B
1	185,8	232,6	178,5	248,8	219,7	314,1	263,5	386,6	373,1	468,2	226,3	281,2
2	256,5	295,2	269,3	291,3	408,9	457,4	443,6	523,6	514,3	582,9	311,5	343,7
3	236,3	302,2	229,4	273,4	367,1	439,6	318,2	412,5	486,0	589,7	300,1	353,3
4	230,9	257,8	217,5	243,1	336,1	370,0	445,8	522,4	476,3	522,5	255,7	279,8
5	271,5	309,3	250,9	278,2	349,4	408,8	491,9	565,1	516,1	584,9	312,5	343,1
6	196,8	226,5	178,2	205,5	248,1	295,4	197,0	260,6	415,2	470,7	233,3	260,2
7	199,6	232,1	182,1	208,6	255,0	308,3	256,9	321,0	416,4	482,7	232,6	262,0
8	178,4	219,3	194,7	228,5	305,1	364,1	299,0	392,7	420,2	496,4	238,2	273,5
9	209,8	243,0	198,2	228,3	307,5	360,7	317,8	407,2	407,4	482,1	237,6	271,2
10	179,3	214,9	189,8	210,6	268,8	308,5	301,1	377,1	369,8	429,2	216,4	246,9
11	206,7	245,0	190,6	220,9	306,7	373,5	266,2	341,4	386,1	478,3	238,6	274,4
12	258,1	301,3	238,5	262,9	375,2	421,0	505,9	564,2	524,0	558,7	281,9	317,9
13	195,1	275,4	186,7	212,3	309,4	403,4	467,4	608,7	475,6	749,1	231,2	292,5
14	230,7	252,2	211,1	223,1	326,6	345,3	469,7	512,7	461,6	488,2	247,6	263,4

Tableau 4.5 Contenus en énergie primaire par unité de valeur de formation de capital en MJ/EUR, 1970.

Colonne A : sans l'énergie contenue dans les importations de biens  
Colonne B : avec l'énergie contenue dans les importations de biens

La figure 4.6 permet de visualiser le contenu énergétique total (y compris les importations) entre les pays.

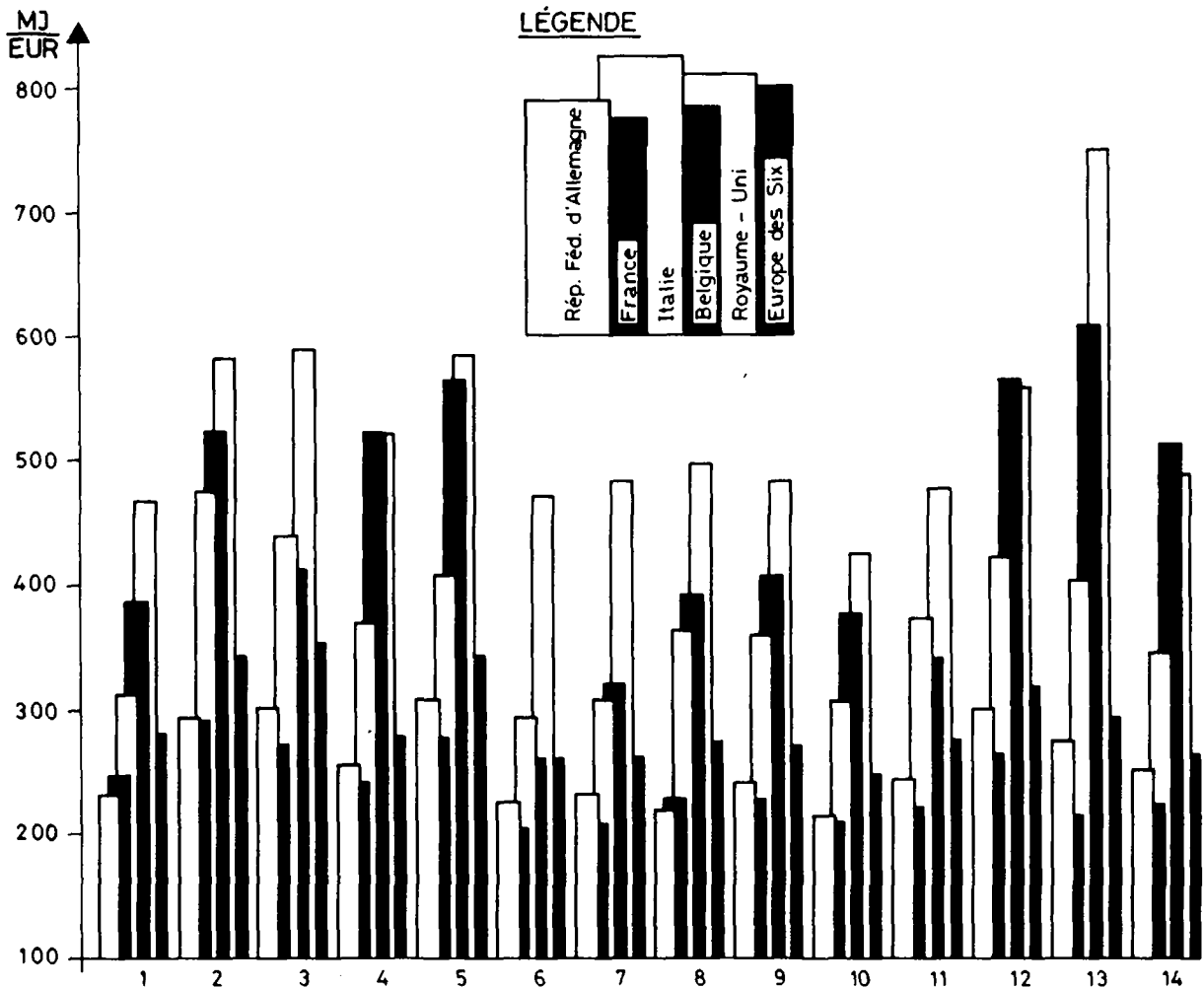


Fig.4.6 Contenus en énergie primaire par unité de valeur de formation de capital, en MJ/EUR, 1970.

On remarquera les contenus plutôt faibles en R.F.A. et en France, plus élevés en Italie et en Belgique, en général nettement plus bas qu'au Royaume-Uni. L'influence du processus de génération de la consommation est particulièrement sensible dans les secteurs No 4 "construction" et No 14 "services" ce qui n'est guère surprenant si l'on pense à l'effet stimulateur sur l'ensemble de l'économie du premier et à l'importance croissante du second, indiquant la place réelle que prend le tertiaire vis-à-vis de l'industrie. Le secteur No 13 "transports par air et par eau" a un contenu énergétique plus grand que le secteur No 12 "transports par route et par rail",

particulièrement au Royaume-Uni. Il faut toutefois rappeler la nature des données dans ces secteurs rendant difficiles les comparaisons entre pays. On ne doit d'autre part pas s'étonner que les rapports  $\dot{E}/\dot{K}$  du tableau 4.4 soient inférieurs aux contenus énergétiques "moyens" du tableau 4.5. Ces derniers comprennent en effet une part d'énergie indirecte exportée, puisque l'investissement a aussi des effets stimulateurs et induits sur les exportations de biens (c'est-à-dire que les exportations ont été aussi endogénéisées, à l'instar de la consommation privée).

#### 4.1.4 Les contenus en énergie utile par unité de valeur de formation de capital physique

Rappelons que l'énergie utile est l'énergie investie dans le capital physique. Les pertes énergétiques de l'extraction de l'énergie à la formation de capital doivent donc être déduites : elles ont lieu à la conversion de l'énergie, à sa distribution et sa consommation, aussi bien lors de la production de biens que chez les consommateurs qui concourent à la formation de capital grâce à leur travail. Chacune de ces étapes est caractérisée par un rendement énergétique qui diffère suivant les agents énergétiques et les technologies. Si les rendements à la production sont assez bien connus, il n'en est pas toujours de même à la consommation. De l'énergie directe que se procure le consommateur ne subsiste après transformation qu'une part, elle-même scindée en deux : une part énergétique "utile" au consommateur, l'autre part inutile au sens énergétique (exemple : éclairage trop diffus mais agréable...). Ne nous intéressant pas aux modes de consommation des consommateurs, les rendements à la consommation seront des rendements techniques, indépendants de la manière dont le consommateur "utilise" (consomme, voire "gaspille") l'énergie<sup>1/</sup>.

---

1/ cela ne doit pas cacher le fait que les rendements techniques à l'utilisation sont difficiles à mesurer car ils dépendent des frontières du système. Mentionnons que certains chercheurs (B. Saugy, 1979; D. Bonnard, 1982) dépassent le concept de rendement technique en définissant un rendement à l'utilisation sur la base de la prestation, ou service, fournie par le procédé au consommateur privé.

Ces rendements dépendent donc des procédés qui diffèrent suivant les secteurs d'activité. L'OSCE (1978, 1980) fait la synthèse des bilans en "énergie utile" et proposent un certain nombre de rendements à l'utilisation. A partir de la répartition des consommations par type d'appareils, de leur rendement chez les consommateurs et de l'agent énergétique à l'entrée, nous faisons une première approximation des rendements par secteur d'activité et par agent énergétique au tableau 4.7.

	Houille	Coke	Pétroles Gaz naturel	Électricité Gaz dérivés
1. Minéraux et métaux ferreux et non ferreux autres que fertiles et fissiles.	0,7	0,7	0,7	0,9
2. Minéraux et produits à base de minéraux non métalliques	0,7	0,7	0,4	0,6
3. Produits chimiques	0,7	0,7	0,7	0,6
4. Construction	0,6	0,6	0,5	0,7
5. Fabrications métalliques	0,7	0,8	0,7	0,9
6. Construction de machines	0,7	0,7	0,7	0,9
7. Fabrications électriques	0,7	0,7	0,7	0,9
8. Textiles , habillement , cuir	0,7	0,7	0,7	0,9
9. Papier , articles en papier , imprimés	0,7	0,7	0,7	0,9
10. Denrées alimentaires	0,7	0,7	0,7	0,9
11. Autres industries manufacturières	0,7	0,7	0,7	0,9
12. Transport par route et rail	0,3	0,3	0,2	0,9
13. Transport par air et eau	0,3	0,3	0,3	—
14. Services	0,7	0,7	0,7	0,9
Foyers domestiques , etc. ,	0,5	0,5	0,5	0,3

Tableau 4.7 Rendements énergétiques pour les différents secteurs d'activité et les foyers domestiques , par agent énergétique.

On considère que ces rendements sont identiques, quelque soit le pays étudié. Il a alors été possible de calculer les matrices  $r$  et  $s$  de l'équation (3.30). Les contenus en énergie utile par unité de valeur de formation de capital sont dressés au tableau 4.8. L'énergie contenue dans les biens importés  $y$  est comptée puisqu'elle concourt à la formation de capital.

Numéro des secteurs	R. F. A.		FRANCE		ITALIE		BELGIQUE		ROYAUME-UNI		EUROPE DES SIX	
	MJ/EUR	%	MJ/EUR	%	MJ/EUR	%	MJ/EUR	%	MJ/EUR	%	MJ/EUR	%
1	98,5	42	106,4	43	145,2	46	178,3	46	192,1	41	122,1	43
2	129,0	44	123,2	42	207,3	45	246,7	47	250,3	43	151,3	44
3	114,8	38	133,1	49	231,0	53	210,8	51	268,8	46	175,8	50
4	117,3	46	104,9	43	174,8	47	252,8	48	222,4	43	128,1	46
5	158,2	51	139,4	50	215,0	53	321,1	57	276,6	47	178,7	52
6	104,2	46	92,0	45	143,8	49	129,7	50	203,5	43	121,7	47
7	106,3	46	92,7	44	148,7	48	156,1	49	208,7	43	121,6	46
8	102,0	47	102,8	45	177,8	49	191,5	49	217,7	44	129,1	47
9	113,3	47	103,8	45	179,3	50	199,5	49	208,3	43	128,7	47
10	98,2	46	93,3	44	148,5	48	183,4	49	184,9	43	114,7	46
11	113,2	46	99,0	45	183,4	49	171,5	50	213,0	45	129,4	47
12	123,8	41	102,8	39	182,4	43	258,1	46	222,7	40	132,1	42
13	120,3	44	87,9	41	185,6	46	286,2	47	315,3	42	128,8	44
14	116,3	46	96,8	43	165,6	48	247,8	48	207,2	42	122,1	46

Tab. 4.8 Contenus en énergie utile par unité de valeur de formation de capital, en MJ/EUR et rapports avec les contenus en énergie primaire correspondants, en %, 1970.

Sur ce même tableau sont indiqués pour chaque secteur et chaque pays les rapports contenus en énergie utile - contenu en énergie primaire par unité de valeur de formation de capital correspondant (tableau 4.5). On constate que ce rapport est compris entre 40 et 50 %, si ce n'est quelques exceptions de tendance supérieure (Italie, Belgique - secteur No 5) ou de

tendance inférieure (R.F.A., secteur No 3). Ces rapports sont en général élevés en Belgique puis en Italie, plus faibles en France et au Royaume-Uni.

D'autre part, par secteur d'activité, les rapports sont plus hauts dans les secteurs "fabrications métalliques" (No 5) et "chimie" (No 3), sauf pour la R.F.A., sont moyens dans les industries de transformation (produits finis, secteurs No 6 à 11), plus faibles dans les industries de base (No 1 et 2) et dans les transports (No 13 et 14). Le rendement des engins de transport étant par ailleurs faibles (0,2 à 0,3), c'est dire l'impact des transports sur les autres secteurs qui ont des rendements énergétiques bien supérieurs à 50 % (tableau 4.7).

Ainsi, comme nous avons pu mettre en évidence, grâce au contenu en énergie primaire, l'importance de la construction et des services, le contenu en énergie utile permet aussi de montrer l'importance des transports vis-à-vis de la consommation d'énergie. Des améliorations des rendements des transports, même faibles, auront ainsi sensiblement d'effets sur le rendement énergétique global<sup>1/</sup>.

Finalement, les contenus en énergie utile sont présentés graphiquement à la figure 4.9.

---

*1/ ce qui, encore une fois, n'implique pas nécessairement une diminution de la demande globale d'énergie. Que l'on pense à cet effet aux énormes investissements engagés dans la recherche et le développement de l'industrie automobile qui induisent une demande d'énergie importante. On ne peut seulement dire que la part relative de la consommation d'énergie dans les transports sera réduite dès la mise sur le marché de moteurs plus performants.*

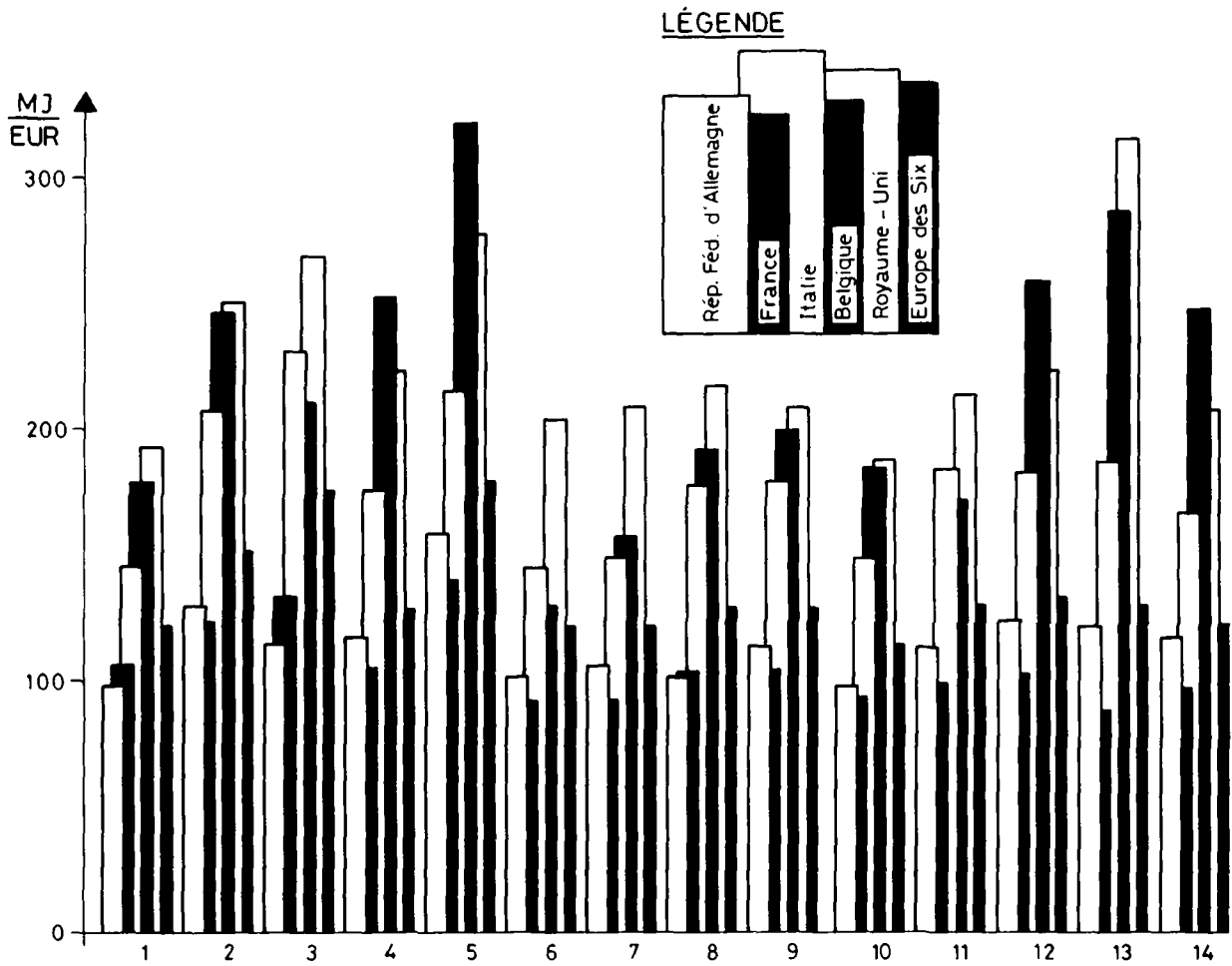


Fig.4.9 Contenus en énergie utile par unité de valeur de formation de capital, en MJ/EUR, 1970.



#### 4.2 LES CONTENUS ENERGETIQUES EN SUISSE, EN 1970

Par rapport aux pays des Communautés européennes, la Suisse présente un certain nombre de particularités qui peuvent avoir des influences sur les contenus énergétiques :

- ainsi le rapport  $\dot{E}/\dot{Y}$  est sensiblement inférieur aux rapports des autres pays (tableau 4.4), bien que la Suisse soit aussi un pays industrialisé européen,
- la Suisse est très dépendante de l'étranger, non seulement au niveau énergétique, mais encore au niveau des importations de biens et services,
- la structure économique de la Suisse est différente de celle de nombreux pays industrialisés : peu de matières premières indigènes, peu d'industries de transformation de base (sidérurgie, ...), orientation vers la chimie et la transformation de produits semi-finis (importés) en produits finis, place très importante du tertiaire.

Il est alors intéressant de connaître les contenus énergétiques de divers secteurs de l'économie suisse afin de mieux aborder les problèmes énergétiques. Malheureusement, toutes les opérations qui ont conduit précédemment au calcul des contenus énergétiques sont délicates à appliquer pour la Suisse, pour deux raisons :

- l'inexistence d'une table Entrées-Sorties suisse, élaborée à partir d'observations de la réalité,
- l'inexistence de bilans énergétiques suisses complets dans lesquels la consommation soit désagrégée entre secteurs industriels. Il n'y a que des estimations basées sur des sondages ponctuels des consommations par secteur industriel et agent énergétique.

Les paragraphes 4.2.1 et 4.2.2 suivants décrivent la manière dont nous avons comblé ces lacunes afin d'estimer par la suite les contenus énergétiques en Suisse pour l'année 1970.

#### 4.2.1 Estimation d'une table Entrées-Sorties par la méthode de cadrage "rAs"

La publication d'un compte de production de l'économie suisse pour 1970 par le Bureau fédéral de statistiques (1978), et les études déjà entreprises par le Centre d'économétrie de l'Université de Genève (G. Antille et al. 1971) ont servi de base à l'élaboration d'une table pour la Suisse, par une application de la méthode de cadrage "rAs". Proposée par R. Stone et J.A.C. Brown (1962), la méthode "rAs" avait à l'origine pour but de permettre l'étude de l'évolution des échanges inter-industriels dans le temps, sur la base de consommations et d'entrées intermédiaires variables dans le temps. Les coefficients d'entrée seraient alors "mis à jour".

Soit  $A_T$  la matrice connue des coefficients d'entrée au temps T et  $A_{T'}$  la matrice à déterminer des coefficients d'entrée au temps T'. En écriture matricielle, la relation de base de la méthode "rAs" stipule une double proportionnalité entre  $A_T$  et  $A_{T'}$ , telle que :

$$A_{T'} = \hat{r} \cdot A_T \cdot \hat{s} \quad (4.1)$$

où  $\hat{r}$  et  $\hat{s}$  sont deux matrices diagonales de paramètres.

G. Antille et al. (1971) ont tenté d'appliquer cette méthode à la Suisse pour 1967, en prenant comme matrice de départ non pas une matrice connue  $A_T$  (qui n'existait pas pour la Suisse) mais une ou des matrices de pays étrangers  $A_{etr}$  à partir de laquelle la matrice suisse  $A_{CH}$  peut être déterminée :

$$A_{CH} = \hat{r} \cdot A_{etr} \cdot \hat{s} \quad (4.2)$$

C'est cette équation qui sera appliquée par la suite, pour diverses matrices  $A_{etr}$  fournies par les Communautés européennes.

On fait ensuite appel aux propositions de R. Stone et J.A.C. Brown, qui permettent de trouver les matrices  $\hat{r}$  et  $\hat{s}$  en fonction du vecteur des consommations intermédiaires  $C_{CH}$  et du vecteur des entrées intermédiaires  $E_{CH}$ , connus :

$$(\hat{r} \cdot A_{etr} \cdot \hat{s}) \cdot \hat{X}_{CH} \cdot u = C_{CH} \quad (4.3)$$

$$u^T \cdot (\hat{r} \cdot A_{etr} \cdot \hat{s}) \cdot \hat{X}_{CH} = E_{CH}^T \quad (4.4)$$

$\hat{X}_{CH}$  est la matrice diagonale formée à partir du vecteur de production totale suisse (connu à partir des vecteurs consommation intermédiaire et demande finale, ou entrées intermédiaires et valeur ajoutée),  $u$  un vecteur unité et  $T$  le symbole de transposition. L'équation (4.3) représente donc la somme en ligne de tous les éléments de la matrice  $A_{CH}$  tandis que l'équation (4.4) en représente la somme en colonne. L'algorithme de résolution des équations (4.3) et (4.4), mis au point pour trouver les matrices  $\hat{r}$  et  $\hat{s}$ , est tel que :

- à partir de  $A_{etr}$ , on multiplie chaque ligne  $i$  par un scalaire  $\rho_i$ , de telle manière que la somme en ligne (équation (4.3)) de la nouvelle matrice obtenue soit égale pour chaque  $i$  à la consommation intermédiaire, mais pas la somme en colonne;
- à partir de cette nouvelle matrice, on multiplie chaque colonne  $j$  par un scalaire  $\sigma_j$  pour que la somme en colonne (équation (4.4)) soit égale aux entrées intermédiaires;
- on réitère cette suite d'opérations jusqu'à ce que l'algorithme converge, c'est-à-dire jusqu'à ce que les sommes des lignes et des colonnes soient, à la précision voulue près, égales aux vecteurs de cadrages  $C_{CH}$  et  $E_{CH}$ . Les matrices  $\hat{r}$  et  $\hat{s}$  sont alors déterminées par les produits de tous les scalaires correspondants à chaque itérations :

$$r_{ij} = \prod_{\text{itérations}} \rho_i \quad s_{jj} = \prod_{\text{itérations}} \sigma_j$$

Les coefficients de la matrice  $A_{CH}$  sont donc définis à partir de deux effets combinés (G. Antille et al.) :

- un effet de substitution parmi les consommations intermédiaires qui se manifeste en ligne (coefficients  $r_{ij}$ )
- un effet de fabrication qui mesure les changements dans la proportion des apports; cet effet se mesure en colonne (coefficients  $s_{jj}$ ).

#### 4.2.2 Les contenus énergétiques en Suisse, en 1970

Il n'a pas été possible de retenir les mêmes secteurs pour le calcul des contenus énergétiques en Suisse que les secteurs des Communautés européennes. Les secteurs énergétiques et industriels suisses ont été définis sur la base de deux critères :

- conformité des secteurs NACE-CLIO-R44 des Communautés européennes et des secteurs du compte de production de l'économie suisse pour ajuster les tables Entrées-Sorties étrangères à partir des vecteurs de consommations et d'entrées intermédiaires suisses,
- existence de statistiques énergétiques suisses conformes avec les secteurs nécessaires à l'estimation d'une table Entrées-Sorties.

L'annexe B présente les données qui ont été utilisées et les agrégations ou ventilations de secteurs qu'il a été nécessaire d'effectuer. En définitive, 22 secteurs, dont 17 secteurs industriels, ont pu être définis :

##### SECTEURS ENERGETIQUES

1. Houille
2. Coke
3. Produits pétroliers
4. Electricité, gaz
5. Uranium

##### SECTEURS INDUSTRIELS

- |                          |   |
|--------------------------|---|
| 1. Agriculture           | 10. Machines, véhicules   |
| 2. Produits alimentaires | 11. Machines électriques  |
| 3. Textiles              | 12. Horlogerie, bijouterie et autres industries manufacturières |
| 4. Bois, liège           | 13. Bâtiment  |
| 5. Papier                | 14. Commerce  |
| 6. Cuir, plastiques      | 15. Banques   |
| 7. Chimie                | 16. Transports  |
| 8. Pierre, terre, mines  | 17. Services divers   |
| 9. Métallurgie           |   |

Sur la base des statistiques à disposition (compte de production, statistiques des Douanes, balance des revenus, statistiques énergétiques,... voir annexe B), nous avons estimé pour chacun de ces secteurs :

- la valeur de la production totale, de la consommation des ménages, de la consommation publique, de la variation des stocks, de la formation de capital, des exportations, de la valeur ajoutée et des importations, ceci pour connaître les valeurs des consommations et d'entrées intermédiaires;
- la consommation d'énergie pour former la table de dissipation de l'énergie.

La méthode "rAs" a été appliquée à partir des tables Entrées-Sorties de R.F.A., France, Italie, Belgique, Royaume-Uni et Europe des Six. Elle a porté sur les matrices de production totale A et sur les matrices de production intérieure  $A_{int}$ , la matrice des importations M ayant été déduite par différence :

$$M = A - A_{int}$$

Cette estimation de la matrice M revient à faire l'hypothèse que chaque secteur suisse a importé des produits correspondants à son secteur et les a distribués aux autres secteurs suisses proportionnellement à leur propre production. La connaissance des divers produits, pouvant être classés dans d'autres secteurs, que chaque secteur importe, éviterait cette hypothèse.

Les matrices suisses de production totale, de production intérieure et des importations calculées à partir des pays cités étant connues, ainsi que la table suisse de la dissipation d'énergie, les équations du chapitre 3 sont appliquées pour déterminer les contenus énergétiques. On obtient donc 6 séries de contenus énergétiques correspondant aux 6 pays de départ. Les contenus par secteur obtenus diffèrent d'une série à l'autre : de 10 à 20 % suivant le pays de départ. Finalement, les contenus énergétiques suisses sont présentés au tableau 4.10 et à la figure 4.11; ils ont été obtenus par une pondération des 6 séries de contenus sur la base de la provenance des importations suisses. Celles-ci pèsent en effet lourdement sur la valeur des contenus énergétiques allant jusqu'à doubler le contenu intérieur, ce

qui montre bien la dépendance de la Suisse vis-à-vis de l'étranger.

	en MJ/fr		en MJ/EUR	
	A	B	A	B
1. Agriculture	2,1	4,7	9,1	20,4
2. Produits alimentaires	2,6	6,2	11,0	26,7
3. Textiles	2,8	6,1	12,0	26,4
4. Bois , liège	2,8	5,0	12,0	21,6
5. Papier	4,1	7,0	17,5	30,2
6. Cuir , plastiques	2,7	7,6	11,7	32,6
7. Chimie	6,3	17,1	27,3	73,7
8. Pierre , terre , mines	7,4	13,0	32,1	56,1
9. Métallurgie	3,2	7,7	13,7	33,0
10. Machines , véhicules	2,2	5,6	9,3	23,9
11. Machines électriques	2,4	6,2	10,4	26,5
12. Horlogerie ,bijouterie , autres	2,2	5,9	9,4	25,6
13. Bâtiment	2,5	4,7	10,9	20,2
14. Commerces	2,0	4,0	8,5	17,4
15. Banques	1,1	1,3	4,6	5,7
16. Transports	5,2	11,2	22,6	48,2
17. Services divers	2,8	5,1	11,9	22,0

Tableau 4.10 Contenus en énergie primaire par unité de valeur de demande finale ,en Suisse, en MJ/fr et MJ/EUR , 1970.

Colonne A: sans l'énergie contenue dans les importations de biens.  
Colonne B: avec l'énergie contenue dans les importations de biens.

Ces contenus sont exprimés en énergie primaire par unité de valeur de demande finale (MJ/fr). Ils sont particulièrement élevés dans les secteurs "chimie", "pierre, terre"(produits non métalliques), et "transports". On retrouve la structure de l'économie suisse plutôt axée sur la transformation de produits semi-finis : ceux-ci sont à haut contenu énergétique et

leur transformation, comparativement, nécessite moins d'énergie directe. Ainsi, les produits de base des secteurs "chimie" et "métallurgie", demandant beaucoup d'énergie pour leur fabrication, proviennent en général d'autres pays (il n'a pas été possible de dissocier la production d'aluminium), alors que le ciment fabriqué en Suisse accroît sensiblement la consommation d'énergie du secteur "pierre, terre". Les secteurs à bas contenu énergétique sont les secteurs du tertiaire (commerces, banques et services divers - sauf transports bien entendu), ainsi que l'agriculture (les engrais et fertilisants sont comptés au poste "chimie").

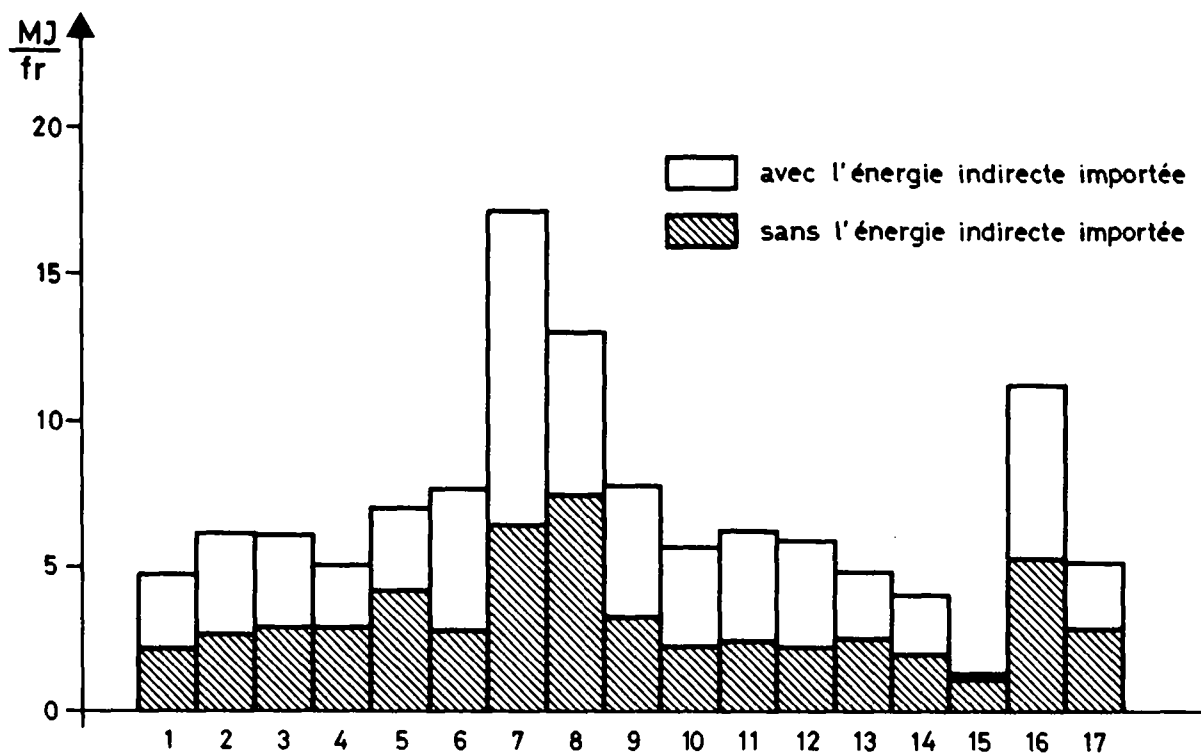


Fig.4 .11 Contenus en énergie primaire par unité de valeur de demande finale en Suisse , en MJ/fr , 1970.

Ces contenus peuvent être comparés -pour autant que les secteurs correspondent- avec les contenus énergétiques par unité de valeur de demande finale des pays des Communautés européennes (fig. 4.3). On se basera sur le taux de change en vigueur en 1970 (1 fr = 0,232 EUR), ce qui porte le rapport É/Y à 32,1 MJ/EUR (7,5 MJ/fr) nettement inférieur aux rapports

des autres pays (tableau 4.4). Ainsi, les contenus énergétiques suisses sont en général plus bas pour les industries de base (chimie, produits non métalliques, métallurgie) et s'approchent de ceux de la France. Pour les industries de transformation, les contenus suisses sont proches de ceux de la France et dans une moindre mesure de ceux de la R.F.A. et de l'Italie, voire supérieurs (par exemple, pour l'alimentation : 25,1 MJ/EUR en France, 26,3 MJ/EUR en Italie, 26,7 MJ/EUR en Suisse, quoiqu'il faille aussi inclure l'agriculture pour être plus exact quant à la définition des secteurs). Enfin, pour le tertiaire, le contenu des services divers en Suisse est supérieur à celui de la France et proche de celui de l'Italie. Néanmoins, ceci devrait être corrigé par l'intégration du secteur "banques", très faible et celui du secteur "commerces".

Il n'a pas été possible de calculer les contenus énergétiques suisses par unité de valeur de formation de capital, par manque de données homogènes et cohérentes. Cependant, il est possible de tirer quelques enseignements par comparaison avec les valeurs des contenus des pays des Communautés européennes. Par exemple, il faut s'attendre à ce que les contenus suisses par unité de valeur de formation de capital soient particulièrement forts dans le bâtiment, les services et les banques.

A l'inverse, l'hétérogénéité de la correspondance des secteurs entre la Suisse et les pays des Communautés européennes permet aussi de faire un classement entre les contenus énergétiques par unité de valeur de demande finale. Il est ainsi facile d'imaginer que, comme en Suisse, le contenu du secteur "banques" d'autres pays est plus faible que celui des autres services. De même si l'on désire dissocier agriculture et alimentation ou textiles et cuir.

Par rapport au consommateur, on peut dire que la quantité d'énergie consommée de manière indirecte sera la moins forte quand il dépense son revenu dans les secteurs de transformation (en particulier l'alimentation). Au contraire, s'il épargne son revenu et qu'il est investi par les banques, la consommation d'énergie, au niveau global, sera plus importante du fait que cet argent peut être investi, et ceci bien que le consommateur ne voie pas directement sa propre consommation d'énergie s'accroître.



Remarque

On peut se demander si le taux de change est une bonne mesure permettant la comparaison des contenus énergétiques entre divers pays. Ainsi, le taux de croissance d'un pays peut décroître alors que sa monnaie est valorisée sur le marché de l'argent, semblant indiquer que le PIB a augmenté dans le contexte international (cas de la Grande-Bretagne ces dernières années). Il semble à cet égard qu'un taux de change basé sur la parité des pouvoirs d'achat des consommateurs ou sur la productivité du capital (suivant que le contenu énergétique est rapporté à la demande finale ou à la formation de capital) soit plus correct. Les études entreprises par les Communautés européennes montrent ainsi, en 1975, que la Livre Sterling, calculée sur la base du panier de la ménagère, équivaut à plus de Deutsche Marken et à plus de Francs français que ne l'indiquent les taux de change. Les écarts entre les contenus énergétiques se trouvent alors réduits.

#### 4.3 LES BALANCES ENERGETIQUES DE QUELQUES PAYS EUROPEENS, 1970

Il est intéressant d'évaluer la véritable consommation d'énergie d'un pays en incorporant l'énergie contenue dans les biens importés et en retirant l'énergie contenue dans les biens exportés. On peut en effet imaginer que ces quantités d'énergie sont importantes quand par exemple pour le cas de la Suisse, la valeur des importations ou des exportations atteint environ 30 % du PIB. De la même manière que l'on établit une balance des paiements, nous dresserons les balances énergétiques<sup>1/</sup> de quelques pays européens. La consommation réelle d'énergie (directe et indirecte) peut être supérieure à la consommation d'énergie directe (donnée par les bilans énergétiques) (on parlera alors de balance excédentaire) ou inférieure (la balance sera déficitaire).

La connaissance des contenus énergétiques, des vecteurs d'importation et d'exportation, permettent l'évaluation de ces balances énergétiques. Elles sont dressées au tableau 4.12, pour les pays étudiés auparavant. Dans le cas de la Suisse, un contrôle de l'énergie importée de manière indirecte a été effectué de la manière suivante :

- d'une part, connaissant les contenus totaux (donc y compris la part d'énergie indirecte importée) et le vecteur des importations, on détermine une énergie contenue dans les biens importés de 399 PJ,
- d'autre part, connaissant les contenus énergétiques sectoriels des pays exportateurs à destination de la Suisse et les vecteurs des importations suisses par pays et secteur correspondant (voir annexe B, § B.2), l'énergie importée indirectement est de 366 PJ. Les cinq pays des Communautés européennes considérés fournissent 63 % des importations suisses; le solde est conjugué avec les contenus de l'Europe des Six, ensemble "moyen et représentatif".

Il y a donc une différence de moins de 10 % entre les deux approches, ce qui paraît satisfaisant au vu des imprécisions ayant conduit à l'estimation

---

1/ les "bilans énergétiques" ayant usuellement une autre signification, nous emploierons la locution "balances énergétiques".

des tables Entrées-Sorties suisses. Ce résultat justifie, à posteriori, les valeurs des contenus énergétiques obtenues pour la Suisse.

	Consommation d'énergie primaire directe	Énergie primaire contenue dans les biens importés	Énergie primaire contenue dans les biens exportés	Consommation réelle d'énergie primaire
R.F.A.	10 099	2 907 (+ 29 %)	2 099 (- 21 %)	10 907 (+ 8 %)
France	6 859	1 264 (+ 18 %)	973 (- 14 %)	7 150 (+ 4 %)
Italie	4 696	1 297 (+ 28 %)	1 011 (- 22 %)	4 982 (+ 6 %)
Belgique	1 704	698 (+ 41 %)	791 (- 46 %)	1 611 (- 5 %)
Royaume-Uni	8 836	1 957 (+ 22 %)	2 033 (- 23 %)	8 760 (- 1 %)
Suisse	675	399 (+ 59 %)	232 (- 34 %)	842 (+ 25%)

Tableau 4.12 Balances énergétiques de quelque pays européens en PJ, 1970.

La R.F.A., la France et l'Italie présentent des balances énergétiques excédentaires, alors que celle de la Belgique est déficitaire, celle du Royaume-Uni est plutôt équilibrée. Par contre, la Suisse a une balance très largement excédentaire. La consommation réelle d'énergie en Suisse est d'environ 840 PJ, au lieu des 675 PJ d'énergie directe, c'est-à-dire qu'elle est augmentée de 25 %. Cette énergie supplémentaire profite aux consommateurs suisses et accroît le rapport "Consommation d'énergie - Produit intérieur brut". Ce rapport reste donc stable au Royaume-Uni, diminue en Belgique et augmente dans les autres pays.

Cette consommation réelle d'énergie peut être ventilée entre les secteurs économiques afin d'étudier les activités excédentaires ou déficitaires en énergie.

A titre d'exemple, le tableau 4.13 indique les balances énergétiques des secteurs économiques suisses. Les chiffres de ce tableau doivent être interprétés comme suit : chaque secteur peut acheter les produits qui ne sont pas classés dans son propre secteur. Par exemple, le secteur "alimentation"

n'achète pas que des produits alimentaires à l'étranger (mais il fabrique surtout des produits alimentaires). On ne s'étonnera donc pas que le secteur "construction" importe de la "construction" de l'étranger; cela correspond à des briques, poutrelles d'acier, camions, etc... classés dans d'autres activités. Par contre, il n'y a pas d'exportations de construction. Il en va de même pour les services, qui présentent de cette façon une balance très excédentaire. Le secteur le plus excédentaire est celui des produits alimentaires. Les secteurs déficitaires sont la chimie et le secteur "horlogerie et divers" dans une moindre proportion, et pour autant que l'on puisse considérer ce secteur comme homogène.

	Énergie primaire contenue dans les biens importés	Énergie primaire contenue dans les biens exportés	Balance énergétique + : excédentaire - : déficitaire
1. Agriculture	10,5	0,2	+ 10,3
2. Produits alimentaires	50,9	8,7	+ 42,2
3. Textiles	17,2	11,9	+ 5,3
4. Bois, liège	2,4	0,7	+ 1,7
5. Papier	4,7	2,9	+ 1,8
6. Cuir, plastiques	5,5	2,6	+ 2,9
7. Chimie	58,4	82,3	- 23,9
8. Pierre, terre, mines	3,9	2,0	+ 1,9
9. Métallurgie	27,1	10,3	+ 16,8
10. Machines, véhicules	49,4	30,3	+ 19,1
11. Machines électriques	14,0	8,6	+ 5,4
12. Horlogerie, autres	21,4	27,5	- 6,1
13. Bâtiment	26,5	0,0	+ 26,5
14. Commerce	22,6	0,9	+ 21,7
15. Banques	0,4	0,4	≈ 0
16. Transports	22,0	15,3	+ 6,7
17. Services divers	62,0	26,9	+ 35,1
<b>Total</b>	<b>398,9</b>	<b>231,5</b>	<b>+ 167,4</b>

Tableau 4.13 Balances énergétiques de la Suisse, par secteur économique, en PJ, 1970.

#### 4.4 CONCLUSIONS

Les calculs de contenu énergétique effectués dans ce chapitre ont permis de mettre en évidence quelques caractéristiques des pays étudiés sur les plans énergétique et économique. Certaines particularités liées à la structure économique de production ressortent : elles ont trait à la séparation des industries de base et des industries de transformation, à l'importance de la construction, du secteur tertiaire et des transports. Tous les secteurs ont de larges impacts sur la consommation d'énergie. Le concept de contenu énergétique apparaît comme un concept important pour évaluer en termes énergétiques quelques variables-clé des activités économiques. Au moment où un certain nombre de difficultés économiques surgissent, dues pour une part à des questions d'ordre énergétique, ce concept devrait permettre de mieux comprendre les liens énergie - économie et, s'il est employé à bon escient, de mieux évaluer les impacts de changements économiques sur la consommation d'énergie (importations, balance énergétique, effets induits, ...). Ce concept reflète l'importance de l'énergie pour le déroulement du processus économique. Finalement, il reste encore à explorer toutes ses implications, sur le plan théorique (liaison avec les prix dans l'analyse Entrées-Sorties), comme sur le plan pratique. Sur ce dernier plan, il nous paraît souhaitable que les résultats soient affinés, grâce à des saisies de données plus complètes, préparées expressément pour le calcul des contenus énergétiques (plus de secteurs, sur plusieurs années, afin de montrer les changements structurels). Il est significatif que des organisations (Communautés européennes, ...) aient récemment lancé des programmes s'engageant dans cette voie. Il sera alors possible, à la suite des travaux déjà entrepris (par exemple : J. Darmstadter et al., 1977, 1978) d'étudier de manière plus systématique les liens entre les structures économiques et l'utilisation de l'énergie.



## CHAPITRE 5

### CONCLUSIONS GÉNÉRALES

Nous avons voulu montrer dans ce travail l'importance de l'énergie pour le déroulement du processus économique. Nous avons insisté sur le fait qu'à chaque activité du processus économique est associée une certaine quantité d'énergie. La production physique d'un bien nécessite de l'énergie, du travail humain, du capital physique et des biens intermédiaires. La consommation de ce bien correspond à la consommation indirecte d'une certaine quantité d'énergie, investie dans ce bien. En effet, les deux considérations originales suivantes doivent être émises :

- de l'énergie est associée au travail humain parce que la rémunération du travail humain permet d'acheter des produits, donc de consommer de manière indirecte de l'énergie, incorporée dans ces produits,
- de l'énergie est associée au capital physique, constitué de constructions, de machines, de biens d'équipement, ..., qui ont demandé de l'énergie pour être réalisés.

Deux constatations doivent ensuite être faites : d'une part, les économistes représentent sous forme de cycle les activités (production, consommation) qui composent le système économique et, d'autre part, les ingénieurs établissent des flux directionnels d'énergie, de l'énergie primaire à l'énergie utile, des pertes d'énergie ayant lieu lors de chaque opération de transformation, de transport, d'utilisation de l'énergie. Dès lors, il faut se demander s'il est possible de concilier les vues des uns et des autres en gardant les spécificités qui leur sont propres : comment intégrer dans un cycle continu les pertes d'énergie et à quel stade du cycle économique définir l'énergie utile ?

L'analyse des flux d'énergie entre les diverses activités du cycle économique fournit des éléments de réponse. Les activités de production, de consommation, le travail humain constituent des flux auxquels de l'énergie est associée. Le capital physique constitue un patrimoine. Le processus économique peut être décrit par trois étapes : de l'énergie primaire est prélevée à l'environnement, transformée avec des pertes d'énergie puis investie sous forme de capital physique. C'est à ce stade que l'on définira l'énergie utile qui est celle investie dans le capital physique. Cette énergie n'est pas entièrement récupérable. Elle est déduite de l'énergie primaire en faisant intervenir les rendements énergétiques techniques de toutes les activités qui concourent à la formation de capital physique, c'est-à-dire les rendements à la production et à la consommation.

L'énergie et la valeur monétaire se trouvent réunies grâce au concept de contenu énergétique par unité de valeur. Ce concept peut être rapporté à la formation de capital physique et à l'énergie utile investie correspondante : on parlera alors de contenu en énergie utile par unité de valeur de formation de capital physique. Ce contenu est qualifié d'utile pour prendre en compte le fait que des pertes d'énergie ont eu lieu tout au long des opérations qui conduisent à la formation de capital physique.

Les pertes d'énergie impliquent que le processus économique est de nature irréversible : les flux sont dirigés dans une certaine direction et il est impossible d'inverser sans pertes les opérations qui conduisent à la fabrication d'un bien. Cela amène naturellement à vouloir établir un parallèle entre le système économique et un système thermodynamique ouvert, où ont lieu des échanges d'énergie et de matière avec l'extérieur.

Il nous semble en effet d'un grand intérêt d'établir une analogie entre phénomènes thermodynamiques et économiques, à l'instar de nombreux économistes, afin de mieux comprendre les phénomènes économiques en se servant des résultats établis dans un autre domaine. Les raisonnements par analogie sont extrêmement puissants et fructueux pour élargir le champ des connaissances. La thermodynamique de l'équilibre a servi de base, dans diverses études antérieures, au développement d'analogies avec des phénomènes économiques. Au moment où la thermodynamique du non-équilibre, actuellement en plein essor, apporte des contributions originales et importantes à l'étude des systèmes



ouverts autres que thermodynamiques, stricto sensu, tels que les systèmes biologiques ou écologiques, il est intéressant de tenter une telle approche avec le système économique. C'est un effort qui mérite d'être fait. Certes les hypothèses sont au départ nombreuses par souci de simplification et le modèle doit encore être développé. Nous espérons avoir fait un pas dans nouveau champ d'investigations en proposant un formalisme mathématique, sans lequel tout développement ultérieur serait rendu difficile, mettant en évidence l'irréversibilité du processus économique.

L'approche originale retenue consiste à utiliser quelques développements de la thermodynamique des processus irréversibles pour les appliquer au système économique. L'irréversibilité d'un processus se manifeste par une création d'entropie ou une destruction d'exergie, égale à une somme de produits de forces généralisées et de flux généralisés. Un interface offreuse-demandeur du processus économique peut être analysé en termes de flux et de forces en introduisant d'une part le flux physique et le flux d'énergie dirigé de l'offreur vers le demandeur et, d'autre part, les contenus énergétiques par unité de valeur et les prix qui jouent le rôle de forces généralisées. Les prix apparaissent comme des grandeurs analogues à la température. L'interprétation des résultats obtenus nous a conduit à introduire la notion de profit pour que le système étudié ne soit plus à l'équilibre au sens de la thermodynamique, de telle manière que les flux physiques soient dirigés dans le sens des profits positifs. Le modèle proposé a été ensuite étendu à l'étude d'une variation de demande à la suite d'une variation imposée de prix. Les courbes de demande des économistes sont analogues à des relations phénoménologiques reliant forces et flux telles qu'employées en thermodynamique. Près de l'équilibre économique, les relations d'Onsager sont satisfaites. Finalement, nous avons examiné l'aspect production : les pertes d'énergie qui ont lieu lors de la production entraînent l'augmentation des prix. Une succession de machines de transformation de l'énergie peut être envisagée pour former du capital physique. Les prix croissent au fur et à mesure que l'énergie est transformée et les contenus en énergie par unité de valeur décroissent. Cela représente à nos yeux la seconde loi de la thermodynamique appliquée à l'économie. Ces résultats nous semblent encourageants pour persévérer dans cette direction qui synthétise de

manière étroite des notions d'ordre énergétique et des notions d'ordre économique par des applications de la thermodynamique des processus irréversibles. La destruction d'exergie, les contenus énergétiques et les prix y jouent un rôle important.

Dans tous nos raisonnements, nous avons considéré les prix comme étant des grandeurs fixes et exogènes au modèle et déterminant les flux. Ceci est une hypothèse qui se démarque de la science économique classique, pour laquelle les prix sont endogènes et sont déterminés par les conditions du marché. Mais il faut souligner que l'hypothèse de prix fixes est à l'heure actuelle une hypothèse de travail à l'origine d'un nouveau et important courant de pensée des économistes. Ce n'est que dans un second temps que l'on pourra étudier les questions de détermination des prix. Nous n'avons donc pas pris en compte de manière explicite le comportement des producteurs et des consommateurs.

Tout au long de ce travail, nous avons favorisé un facteur primaire, l'énergie, que nous avons voulu relier aux biens, au capital physique et au travail humain. C'est une approche énergétique du processus économique puisque, en fin de compte, nous avons représenté les biens, le capital et le travail humain par l'énergie qui leur était associée, de manière directe et indirecte. Ceci n'est pas sans rappeler à certains égards la théorie de la valeur travail. De plus, nous n'avons pas fait intervenir les spécificités essentielles du capital et du travail humain (productivité, rapports capital-production,...). Il nous semble qu'il serait alors judicieux de revenir à des modèles de type KLEM où capital, travail, énergie, matières et biens seraient traités en parallèle. Même plus, d'autres dimensions devraient être apportées : le temps, le progrès technique et l'information. Si le temps et le progrès technique sont pris en compte dans certains modèles KLEM dynamiques, ce n'est pas encore le cas de l'information. Il n'est du reste pas exclu, quoique ce problème soit fort controversé, que la thermodynamique apporte des éléments de réponse sur ce sujet. Mentionnons en outre que quelques efforts ont porté dans d'autres études sur les relations économie - information. Le système économique apparaît alors comme un système ouvert, échangeant matière, énergie et information avec l'extérieur. En définitive, par rapport à des modèles globaux où plusieurs facteurs primaires doivent intervenir, c'est à une

projection selon l' "axe énergie" que nous avons procédé. Nous n'avons donc en particulier ni abordé les possibilités de substitution entre les facteurs primaires, ni incorporé l'influence du progrès technique, ni celle du temps. Ces remarques se retrouvent à propos du modèle Entrées-Sorties statique que nous avons présenté. Les fonctions de production  $y$  sont linéaires, les facteurs de production non substituables et les coefficients techniques fixes. De plus, nous n'y avons pas intégré le temps, de manière à pouvoir vérifier que les capacités de production sont suffisantes. C'est pour ces raisons que nous utilisons les applications du modèle Entrées-Sorties à des fins explicatives de la situation de pays à un moment donné, pour lequel les tables des échanges inter-industriels ont été dressées sur une base statistique observée. Par la suite, on pourra développer le modèle à des fins prospectives ou de simulation pour évaluer les répercussions mécaniques de différents paramètres, dans le cadre de scénarios. A cet égard, il est bon de souligner les possibilités de couplage du modèle Entrées-Sorties avec des modèles de type KLEM où les coefficients techniques deviendraient des paramètres endogènes, ou avec des modèles techniques de flux physiques.

Nous avons voulu montrer l'intérêt du concept de contenu énergétique en donnant des valeurs chiffrées. On rejoint là une des préoccupations de l'économie énergétique pour laquelle un paramètre important est le rapport de la consommation d'énergie primaire au Produit Intérieur Brut (PIB). Ce rapport est en fait le contenu en énergie primaire du PIB. Il est alors naturel de vouloir dissocier ce contenu global entre différents secteurs d'activité contribuant au PIB et donc de faire appel à l'analyse Entrées - Sorties. De plus, notre approche implique que l'on considère la formation de capital physique et l'énergie utile. Cela conduit à introduire deux originalités : l'effet multiplicateur dans l'analyse Entrées-Sorties, et les rendements énergétiques dans les tables de dissipation énergétique. Les difficultés de concilier l'analyse Entrées-Sorties et des tables de dissipation énergétique proviennent de problèmes de double comptage et d'équivalence entre agents énergétiques. Ils trouvent une solution originale et appropriée par l'élaboration de tables de dissipation énergétique où l'on compte les pertes d'énergie lors de chaque activité.

Le calcul des contenus énergétiques pour les secteurs de différents pays et la même année conduit à des comparaisons intéressantes puisque l'on prend en compte la structure de production et la place de l'énergie dans cette production. Il nous faut souligner ici le gros travail de préparation des données qu'il faut effectuer de manière à pouvoir traiter simultanément des données d'ordre économique et des données d'ordre énergétique. Devant le manque de statistiques à disposition, particulièrement dans le cas de la Suisse, nous avons été conduit à faire certaines hypothèses. La précision des résultats est évidemment inférieure à la précision des données. Elle dépend de la valeur des hypothèses qu'il a été nécessaire de faire. C'est, en dernier ressort, une analyse de sensibilité des résultats qu'il faudrait faire. Si les données économiques des Communautés européennes peuvent être considérées comme faibles, les statistiques concernant la distribution de l'énergie dans les secteurs d'activité ne sont pas encore suffisamment précises. S'y ajoute le problème de la nomenclature de ces secteurs, qui doit être homogène et cohérente. Nous ne pouvons donc qu'insister sur la nécessité de procéder à des saisies de données non seulement économiques mais encore énergétiques sur la base d'une nomenclature commune et, autant que faire se peut, aussi désagrégée que possible. Nos espoirs seraient comblés si, en montrant l'intérêt qu'il y a de chiffrer les contenus énergétiques, nous incitons à de nombreuses et plus précises saisies de données pour s'affranchir d'un certain nombre d'hypothèses et augmenter ainsi la fiabilité des résultats. Il n'en reste pas moins que les valeurs trouvées ici sont de premières estimations des contenus énergétiques pour les mêmes secteurs de divers pays et pour la même année. Ces contenus ont été calculés par un traitement identique sur des bases statistiques uniformisées. Finalement, l'intégration de l'énergie associée aux biens importés et exportés conduit à l'établissement de balances énergétiques à partir desquelles la véritable consommation d'énergie peut être déterminée. Des prévisions de la demande d'énergie à court terme, avec l'hypothèse de coefficients techniques constants, peuvent alors être entreprises à partir de vecteurs de demande finale ou de formation de capital dans le cadre de scénarios économiques.

## ANNEXE A

### PRÉPARATION DES DONNÉES ÉNERGÉTIQUES : LES TABLES DE DISSIPATION ÉNERGÉTIQUE

Cette annexe a pour but d'exposer comment ont été établies les tables de dissipation énergétique pour quelques pays européens, en vue de calculer les contenus énergétiques de différents secteurs d'activité économique en 1970. La formation de ces tables fait d'une part appel à des statistiques énergétiques détaillées et doit d'autre part être en conformité avec la structure des tables Entrées - Sorties pour le traitement ultérieur. Il faut être attentif à ce qu'une même quantité d'énergie ne soit pas comptée deux fois (problème du double comptage, dû aux transformations énergétiques et aux produits dérivés). En raisonnant en termes de pertes d'énergie, on compte les pertes là où elles ont lieu et l'on satisfait ainsi au principe de la conservation de l'énergie : tout se passe comme si un acheteur achetait non pas de l'énergie mais la possibilité de perdre de l'énergie. On évite ainsi le double comptage et les problèmes de facteurs de conservation entre différents agents énergétiques (cas de l'électricité).

Les pays étudiés dans cette annexe sont la République Fédérale d'Allemagne, la France, l'Italie, la Belgique et le Royaume-Uni. S'y ajoute l'Europe des Six qui comprend en outre le Luxembourg et les Pays-Bas mais sans le Royaume-Uni. Les statistiques de base sont celles de l'Office statistique des Communautés européennes (OSCE) qui publie à la fois des données énergétiques et des données économiques (tables Entrées-Sorties). Toute les données portent sur l'année 1970. Les quantités d'énergie seront exprimées dans cette annexe généralement en tec (tonnes d'équivalent charbon) puisque les bilans globaux des statistiques dont sont tirées les données sont exprimées dans cette même unité. Nous employons pour les résultats du chapitre 4 l'unité S.I. (joule).

Finalement, nous voulons rendre le lecteur attentif au fait qu'un certain nombre d'hypothèses ont dû être faites pour mener à bien notre objectif. Ces hypothèses devraient être confirmées par des saisies de données faisant actuellement défaut.

## A.1 LA REPRESENTATION DES TRANSFORMATIONS ENERGETIQUES SOUS FORME DE TABLEAU

Dans ce paragraphe, nous représenterons les transformations des agents énergétiques sous forme de tableau. Nous verrons par la suite que, pour un traitement compatible avec les tables des échanges inter-industriels, cette représentation soulève quelques difficultés dues au problème des agents énergétiques dérivés. Nous commencerons donc par mettre le poids sur les produits dérivés et présenterons les statistiques des Communautés européennes (OSCE-EUROSTAT) que nous emploierons.

### A.1.1 Produits dérivés

Les produits dérivés sont des produits créés simultanément lors d'une transformation d'un agent énergétique. Ils sont utilisés par les industries et les ménages à des fins énergétiques ou à des fins non énergétiques. Les produits vendus à des fins non énergétiques présentent en fait un certain contenu énergétique puisqu'il a fallu de l'énergie pour les fabriquer. Cette énergie doit alors être comptabilisée; donc l'énergie primaire correspondante à l'extraction (ou à l'importation) doit l'être aussi. La connaissance de l'énergie indirecte délivrée à des fins non énergétiques se ramène à l'étude des transformations dans les secteurs énergétiques. On doit ainsi considérer l'énergie primaire totale dans les bilans d'énergie. Cette remarque importe dans la mesure où les statistiques traitent souvent de la consommation finale énergétique seule, oubliant l'énergie contenue dans les produits à fins non énergétiques (et, à fortiori, dans les biens et les services).

A titre d'exemple, prenons le cas de deux agents énergétiques, le charbon et le pétrole brut, qui forment après conversion des produits dérivés, tels le coke et le gaz, et le pétrole raffiné. Les transformations correspondantes sont complexes et dépendent de la diversité des produits, des conditions locales et des coûts (Y. Mainguy, 1967). Ainsi :

- dès l'extraction, il y a production de produits dérivés dépendants des différentes qualités de gisements : charbons classés, braisettes, grains et fines pour l'extraction de charbons, pétrole brut et gaz légers pour celle du pétrole. (A noter qu'en fait l'exploitation d'un gisement de gaz naturel amène aussi des huiles : gaz naturel et

huiles sont des produits liés à cet égard, il est préférable de parler d'hydrocarbures).

- Ces différents combustibles peuvent ensuite être transformés souvent sur le site, pour fournir de nouveaux combustibles (techniques d'agglomération, de cokéfaction et de distillation de la houille, techniques de distillation, de cracking et de reforming du pétrole).
- Les produits obtenus sont utilisés à des fins énergétiques (gaz de cokeries, coke, essences, kérosène, gaz-oils, gaz de raffineries, etc...) ou non énergétiques (coke en tant que réducteur dans les hauts-fourneaux, produits de la carbochimie, résidus de produits de raffinage épurés, polymérisés, etc.. pour la pétrochimie).

#### A.1.2 Présentation des statistiques énergétiques OSCE-EUROSTAT

La description des flux d'énergie est présentée dans les statistiques sous forme d'un "bilan". Ces bilans sont structurés de manière fort différente selon les organismes qui les constituent. Les principales statistiques sont celles de l'ONU, de l'OCDE, de la CEE-ONU (Commission économique pour l'Europe) et des Communautés européennes (OSCE-EUROSTAT), élaborées à partir des bilans nationaux de chacun des pays participants.

Comme pour les tables Entrées-Sorties, une uniformisation est indispensable pour mener à bien une étude comparative entre plusieurs pays. Les bilans EUROSTAT, outre qu'ils proviennent du même Office que les tables Entrées-Sorties que nous emploierons, sont les plus détaillés et les plus utiles pour la formation de tables matricielles de transformations énergétiques.

Dans les statistiques EUROSTAT, le cheminement de l'énergie est décrit globalement et par agent énergétique selon la structure des agrégats du tableau A.1.

La liste des agents énergétiques considérés est dressée au tableau A.2.

Production de sources primaires + Importations
= RESSOURCES ± Variations de stocks - Exportations
= CONSOMMATION BRUTE - Soutes
= CONSOMMATION INTÉRIEURE BRUTE - Transformation + Production de produits dérivés - Consommation du secteur énergie - Pertes sur les réseaux - Consommation finale non énergétique ± Différences statistiques
= CONSOMMATION FINALE ÉNERGÉTIQUE

Tableau A.1 Bilan global de l'énergie (structure EUROSTAT)

Sources primaires :	Produits dérivés :
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Houille</li> <li>• Lignite</li> <li>• Tourbe</li> <li>• Pétrole brut</li> <li>• Produits pétroliers primaires</li> <li>• Gaz naturel</li> <li>• Gaz de pétroles liquéfiés primaires</li> <li>• Électricité primaire (hydraulique, géothermique et nucléaire)</li> <li>• Autres combustibles (bois, ordures...)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Agglomérés de houille</li> <li>• Coke</li> <li>• Produits pétroliers non gazeux                             <ul style="list-style-type: none"> <li>essences moteur</li> <li>pétrole lampant et carburateurs</li> <li>naphas</li> <li>gaz-oil et fuel-oil liquides</li> <li>fuel-oil résiduel</li> <li>autres</li> </ul> </li> <li>• Gaz dérivés                             <ul style="list-style-type: none"> <li>gaz de cokeries</li> <li>gaz de hauts fourneaux</li> <li>gaz d'usines à gaz</li> <li>gaz de raffineries</li> <li>gaz de pétrole liquéfiés</li> </ul> </li> <li>• Énergie électrique dérivée</li> <li>• Chaleur</li> </ul>

Tableau A.2 Agents énergétiques des statistiques EUROSTAT.



Un certain nombre de remarques doivent être faites :

- (i) Les statistiques EUROSTAT, du fait de la nette distinction entre énergie primaire et énergie dérivée donnent la possibilité de suivre avec de bons détails une chaîne énergétique.
- (ii) La ventilation des secteurs "consommation du secteur énergie" et "pertes sur les réseaux" résoud un des problèmes posés par la production d'énergie dérivée puisqu'on peut connaître exactement quelle est la proportion de ces produits pour l'autoconsommation. A noter que l'autoconsommation des raffineries est donnée directement en consommation de pétrole brut.
- (iii) La production de produits dérivés peut se faire dans les secteurs industriels : cas des gaz de hauts fourneaux produits dans les sidérurgies à partir de coke. Les gaz de hauts fourneaux produits rentrent dans le tableau des transformations énergétiques et la déduction correspondante des livraisons de coke à la sidérurgie est opérée.
- (iv) L'unité de base employée dans ces statistiques est le tec (tonne - équivalent - charbon) à 7000 kcal/kg. Le tableau A.3 donne les facteurs de conversion en tec à partir des pouvoirs calorifiques supérieur et inférieur des combustibles solides, liquides et gazeux, eux-mêmes exprimés par leurs unités spécifiques dans les bilans par agents.
- (v) La question des coefficients d'équivalence n'en reste pas moins posée pour l'électricité. L'OSCE a considéré cette conversion de la manière suivante : "la conversion en tec de l'énergie électrique est effectuée, pour toutes les lignes du bilan, sur la base de la consommation spécifique moyenne de l'ensemble des centrales classiques de chaque pays : le facteur de conversion correspond ainsi à la quantité moyenne de combustibles, exprimés en grammes d'équivalent charbon, nécessaire chaque année pour produire un kWh brut. Ce facteur est variable selon le pays et selon l'année". Le tableau A.4 donne ces facteurs de conversion.

Agents énergétiques	Unités des bilans par agent	Facteur de conversion
Houille	tec	1
Agglomérés de houille	t	1
Coke	t	1
Lignite et tourbe	tec	1
Briquettes de lignite et de tourbe	t	0,686
Pétrole brut et produits pétroliers non gazeux	t	1,43
Gaz naturel	Tcal (PCS)	131
Gaz d'usines et de cokeries	Tcal (PCS)	131
Gaz de hauts fourneaux	Tcal (PCS)	143
GPL et gaz de raffineries	Tcal (PCS)	131
Autres combustibles (bois, ordures ménagères, vapeur achetée et récupérée, goudron, etc.)	Tcal (PCI)	143
Chaleur	Tcal	143

Tableau A.3 Conversion en tec des combustibles solides, liquides et gazeux.

Pays	1970	1971	1972	1973	1974	1975
R.F.A.	338	332	333	330	329	325
FRANCE	320	320	316	315	314	311
ITALIE	320	316	315	314	315	314
PAYS - BAS	333	331	327	325	323	318
BELGIQUE	338	339	337	330	329	321
LUXEMBOURG	467	465	467	468	474	461
ROYAUME - UNI	389	378	375	365	360	354
IRLANDE	384	396	376	386	380	375
DANEMARK	314	300	299	306	302	296

Tableau A.4 Conversion en tec de l'énergie électrique (1GWh=....tec)

### A.1.3 Les tables de transformations énergétiques de quelques pays des Communautés européennes

Sur la base des statistiques de l'énergie de l'OSCE (1976<sup>a</sup>), les tables de transformations énergétiques de pays européens et de l'Europe des Six, en 1970, ont été élaborées. Quelques remarques servent de base à la compréhension des tableaux A.5 à A.10.

- (i) Les unités sont en  $10^3$  tec. Nous les garderons tout au long de cette annexe pour pouvoir se référer commodément aux statistiques.
- (ii) Dans les tables qui sont dressées tout au long de cette annexe, nous avons appelé "ressources" la quantité d'énergie primaire consommée en 1970 (égale à la somme de l'énergie produite intérieurement et des importations d'énergie). C'est un terme impropre au sens de l'économie de l'énergie mais non dénué de signification au sens économique et usuel dans la terminologie Entrées-Sorties (voir §1.1). Les ressources se présentent sous forme d'agents énergétiques et sont allouées aux secteurs énergétiques pour transformation et distribuées à la demande finale, composée des industries et des ménages (énergie distribuée), compte tenu des variations de stocks et des exportations. Par exemple, une part des "ressources" de la houille sert à la production d'agglomérés, une autre à la production de coke, d'électricité, etc..., une part est exportée, une part est stockée (ou déstockée), le solde étant distribué aux industries et ménages.
- (iii) La colonne "pertes" ne prend en considération dans ces tableaux que les pertes de distribution (réseaux) ainsi que les pertes de pompage d'énergie hydraulique. Pour compter les pertes énergétiques qui ont lieu lors des transformations d'agents primaires en agents dérivés, une colonne "production dérivée" a été introduite, indiquant les quantités produites à partir des agents primaires. Les pertes correspondantes se déduisent naturellement par différence entre les quantités d'énergie entrantes et les produits dérivés sortants. Nous reviendrons sur ce point au paragraphe A.2. Il s'ensuit d'autre part que la différence entre la production totale et la production dérivée définit les ressources à disposition.

- (iv) Un problème de distribution intervient très certainement au niveau des gaz de cokeries et des gaz d'usines, qui ne sont pas comptabilisés de manière vraiment indépendante dans les statistiques. La preuve en est dans les valeurs importantes des "écarts statistiques".
- (v) Des écarts statistiques sont donnés pour chaque agent. Ils ont été mis sur le même plan que les variations de stocks, les exportations et l'énergie distribuée pour former la demande finale totale. Il est à noter que celle-ci est négative, de ce fait, pour le pétrole brut en Italie. Des corrections seront apportées par la suite, en intégrant ces écarts dans les variations de stocks (§A.2).
- (vi) Les statistiques donnent les valeurs de "consommation du secteur énergie", qui n'est pas forcément identique à l'autoconsommation des processus de transformations. Cette distinction permet d'expliquer pourquoi la production d'agents dérivés peut être supérieure à l'énergie principale entrante. Ainsi dans le cas de la production des agglomérés, nous rajouterons à la houille de l'électricité comme agent énergétique auxiliaire (voir tableau A.19, §A.2.2.3).
- (vii) L'autoconsommation des raffineries est portée entre parenthèses de la ligne "pétrole brut", la transformation de pétrole brut en produits pétroliers non gazeux et en G.P.L. (gaz de pétroles liquéfiés) étant indiquée à l'intersection de la ligne et de la colonne "pétrole brut".
- (viii) Le coefficient d'équivalence de l'électricité pour l'Europe des Six est supposé égal à 330 kWh/tec.
- (ix) Il faut être conscient que les chiffres de ces tables ne sont en réalité que des indications et n'ont qu'une valeur approximative : plus importants que les valeurs absolues sont leurs poids relatifs, les uns par rapport aux autres.

	HOUILLE	AGGLOMÉRÉS	LIGNITE	BRIQUETTES	COKE	GAZ COKERIES	GAZ HF	GAZ USINES	GAZ NATUREL	GPL	PÉTROLE BRUT	P. P. NON GAZEUX	ELECTRICITE	SOME TRANSFORMATIONS	CONSUMATION SECTEUR ENERG.	PERTES	VARIATION STOCKS	EXPORTATIONS	ENERGIE DISTRIBUÉE	ECART STATISTIQUE	SOME DEMANDE FINALE	PRODUCTION TOTALE	PRODUCTION DERIVEE
HOUILLE		3688			51963			3082					34288	92981	2065		-2362	15772	12277	+266	25853	121889	
AGGLOMÉRÉS														0	11		0	306	3684	+ 4	4014	4025	3725
LIGNITE				6726									21829	28655	1694		55	4	851	+ 5	905	31288	
BRIQUETTES													268	268	20		-22	643	7081	- 40	7662	7950	6726
COKE					95		8045	6					807	8146	255		730	10260	23680	- 3	34667	43068	42479
GAZ COKERIES													807	807	3724	300	0	0	2080	+3183	5273	10104	10104
GAZ HF													2312	2312	693	0	0	0	5033	+ 7	5040	8045	8045
GAZ USINES													0	0	306	0	39	174	6196	-3087	3312	3618	3614
GAZ NATUREL								680					4343	5023	482		42	10	12911	+ 27	12980	18488	
GPL								1687					376	2063	427		-7	683	2765	0	3441	5931	5504
PÉTROLE BRUT										153024				153024	(10970)		570	192	196	+ 289	1247	154277	
P. P. NON GAZEUX								566					11618	12184	0		470	17196	148683	+1424	16773	178957	135983
ÉLECTRICITÉ														0	9444	5439	0	2138	69736	0	71874	86757	74432
TOTAL		3688			51963		8045	5981			153024		75941	305463	20021	5739	- 485	47378	295183	+ 2065	344157	675374	290612
IMPORTATIONS	9720	300	536	1224	589	0	0	4	4122	418	143488	43967	4757	209127									
PRODUCTION INDIGÈNE	112779	0	30718	0	0	0	0	0	14373	9	10775	13	7568	175635									
RESSOURCES	121699	300	31254	1224	589	0	0	4	18435	427	154271	43974	12325	384762									

Tableau A.5 Table de transformations énergétiques en 10<sup>3</sup> tec.  
R.F. A., 1970

	HOUILLE	AGGLOMÉRÉS	LIGNITE	BRIQUETTES	COKE	GAZ COKERIES	GAZ HF	GAZ USINES	GAZ NATUREL	GPL	PÉTROLE BRUT	P. P. NON GAZEUX	ÉLECTRICITÉ	TOTAL	IMPORTATIONS	PRODUCTION INDIGÈNE	RESSOURCES
HOUILLE	4101				18492			12									
AGGLOMÉRÉS																	
LIGNITE																	
BRIQUETTES																	
COKE					484		5613										
GAZ COKERIES																	
GAZ HF																	
GAZ USINES																	
GAZ NATUREL								1004									
GPL								308									
PÉTROLE BRUT											146546						
P. P. NON GAZEUX								332									
ÉLECTRICITÉ																	
TOTAL	4101				18976		5613	1656			146546						
IMPORTATIONS	13722	199	0	206	3428	0	0	52	4129	338	144922	8777	1414				
PRODUCTION INDIGÈNE	34472	0	1265	0	0	0	0	0	8470	422	3346	432	20088				
RESSOURCES	48194	199	1265	206	3428	0	0	52	12599	760	148268	9209	21502				
HOUILLE																	
AGGLOMÉRÉS																	
LIGNITE																	
BRIQUETTES																	
COKE																	
GAZ COKERIES																	
GAZ HF																	
GAZ USINES																	
GAZ NATUREL																	
GPL																	
PÉTROLE BRUT																	
P. P. NON GAZEUX																	
ÉLECTRICITÉ																	
TOTAL																	
IMPORTATIONS																	
PRODUCTION INDIGÈNE																	
RESSOURCES																	
HOUILLE																	
AGGLOMÉRÉS																	
LIGNITE																	
BRIQUETTES																	
COKE																	
GAZ COKERIES																	
GAZ HF																	
GAZ USINES																	
GAZ NATUREL																	
GPL																	
PÉTROLE BRUT																	
P. P. NON GAZEUX																	
ÉLECTRICITÉ																	
TOTAL																	
IMPORTATIONS																	
PRODUCTION INDIGÈNE																	
RESSOURCES																	
HOUILLE																	
AGGLOMÉRÉS																	
LIGNITE																	
BRIQUETTES																	
COKE																	
GAZ COKERIES																	
GAZ HF																	
GAZ USINES																	
GAZ NATUREL																	
GPL																	
PÉTROLE BRUT																	
P. P. NON GAZEUX																	
ÉLECTRICITÉ																	
TOTAL																	
IMPORTATIONS																	
PRODUCTION INDIGÈNE																	
RESSOURCES																	

Tableau A.6 Table de transformations énergétiques, en 10<sup>3</sup> tec.  
France, 1970

	HOUILLE	AGGLOMÉRÉS	LIGNITE	BRIQUETTES	COKE	GAZ COKERIES	GAZ HF	GAZ USINES	GAZ NATUREL	GPL	PÉTROLE BRUT	P.P. NON GAZEUX	ELECTRICITÉ	SOMME TRANSFORMATIONS	CONSUMATION SECTEUR ENERG.	PERTES	VARIATION STOCKS	EXPORTATIONS	ENERGIE DISTRIBUÉE	ECART STATISTIQUE	SOMME DEMANDE FINALE	PRODUCTION TOTALE	PRODUCTION DÉRIVÉE
HOUILLE		92			9496			165					1136	10889	0	0	600	0	1128	165	1893	12782	
AGGLOMÉRÉS														0	0	0	3	0	134	0	137	137	82
LIGNITE													471	471	0	0	-2	0	41	+20	59	530	
BRIQUETTES														0	0	0	0	0	116	0	116	116	0
COKE					46		1443	2						1491	15	0	34	308	5539	-24	5857	7363	7171
GAZ COKERIES													142	142	816	55	0	0	787	-16	771	1784	1784
GAZ HF													473	473	86	0	0	0	884	0	884	1443	1443
GAZ USINES														0	19	0	0	0	796	+29	825	844	844
GAZ NATUREL								570					1935	2505	77	264	304	0	12603	-6	12907	15747	
GPL								13					191	204	47	0	90	493	3888	+22	4483	4734	4626
PÉTROLE BRUT											168495			168495	(64408)	0	821	0	0	-4184	-3363	165132	
P.P. NON GAZEUX								224					18084	18288	0	0	2839	50571	88920	-136	142104	160482	155637
ELECTRICITÉ														0	2012	3680	0	226	33153	0	33379	39071	22768
TOTAL		92			9542		1443	974			168495		22412	202986	3113	3999	4689	51588	147989	-4130	200136	410165	194335
IMPORTATIONS	12636	55	41	116	192	0	0	0	0	108	163123	4706	1495	182472									
PRODUCTION INDIGÈNE	146	0	489	0	0	0	0	0	15747	0	2009	139	14808	33338									
RESSOURCES	12782	55	530	116	192	0	0	0	15747	108	165132	4845	16303	215810									

Tableau A.7 Table de transformations énergétiques en 10<sup>3</sup> tec. Italie, 1970

	HOUILLE	AGGLOMÉRÉS	LIGNITE	BRIQUETTES	COKE	GAZ COKERIES	GAZ HF	GAZ USINES	GAZ NATUREL	GPL	PÉTROLE BRUT	P. P. NON GAZEUX	ÉLECTRICITÉ	SOMME TRANSFORMATIONS	CONSUMATION SECTEUR ENERG.	PERTES	VARIATION STOCKS	EXPORTATIONS	ENERGIE DISTRIBUÉE	ECART STATISTIQUE	SOMME DEMANDE FINALE	PRODUCTION TOTALE	PRODUCTION DÉRIVÉE	
HOUILLE		689			9473			0						2868	101	0	-66	549	4993	-12	4750	17879		
AGGLOMÉRÉS														0	28	0	-6	92	904	-1	989	1017	745	
LIGNITE														0	0	0	0	0	0	0	0	0		
BRIQUETTES														0	0	0	0	0	29	0	29	29	0	
COKE					0		2661	0						2661	3	0	128	713	5155	-9	5987	8651	7119	
GAZ COKERIES														210	702	4	0	0	620	228	848	1764	1764	
GAZ HF														645	181	0	0	0	1809	26	1835	2661	2661	
GAZ USINES														0	2	0	0	5	273	-211	67	69	69	
GAZ NATUREL								60						1302	28	284	+12	0	3302	-1	3313	4987		
GPL								8						168	0	0	0	203	719	+48	970	1146	812	
PÉTROLE BRUT											42706			42706	(1730)	0	-54	34	0	+57	37	42743		
P. P. NON GAZEUX								0						5438		0	+493	16654	25586	-117	42618	48054	39634	
ÉLECTRICITÉ														0	1064	550	0	313	8829	0	9142	10756	10214	
TOTAL		689			9473		2661	68			42706			66223	2112	838	-88	18563	52219	-111	70583	139758	63038	
IMPORTATIONS	7567	272	0	29	1532	0	0	0	4928	334	42743	8400	440	66245										
PRODUCTION INDIGÈNE	10312	0	0	0	0	0	0	0	59	0	0	0	102	10473										
RESSOURCES	17879	272	0	29	1532	0	0	0	4987	334	42743	8400	542	76718										

Tableau A.8 Table de transformations énergétiques en 10<sup>3</sup> tec. Belgique, 1970



	HOUILLE	AGGLOMÉRÉS	LIGNITE	BRIQUETTES	COKE	GAZ COKERIES	GAZ HF	GAZ USINES	GAZ NATUREL	GPL	PÉTROLE BRUT	P. P. NON GAZEUX	ÉLECTRICITÉ	SOMME TRANSFORMATIONS	CONSUMATION SECTEUR ENERG.	PERTES	VARIATION STOCKS	EXPORTATIONS	ENERGIE DISTRIBUÉE	Ecart STATISTIQUE	SOMME DEMANDE FINALE	PRODUCTION TOTALE	PRODUCTION DÉRIVÉE	
HOUILLE		1537			27602			4239					63076	96454	1940	0	-10663	3207	40711	-326	32929	131323		
AGGLOMÉRÉS														0	0	0	+6	16	1232	0	1254	1254	1201	
LIGNITE														0	0	0	0	0	0	0	0	0		
BRIQUETTES														0	0	0	0	0	0	0	0	0		
COKE					0		4374	19					275	4668	372	0	-1119	954	17811	-5	17641	22681	22681	
GAZ COKERIES													0	0	1852	1011	0	0	1525	0	1525	4388	4388	
GAZ HF													544	544	418	0	0	0	3416	0	3416	4378	4378	
GAZ USINES													0	0	102	2426	0	0	14083	34	14117	16645	16645	
GAZ NATUREL								9530					236	9826	185	0	0	0	4798	0	4798	14809		
GPL								1429					0	1429	0	0	+31	162	1066	207	1466	2895	2624	
PÉTROLE BRUT											145725			145725	(8620)	0	-396	1692	0	-758	538	146283		
P. P. NON GAZEUX								5199					20035	25634	0	0	+1367	32610	102028	230	136235	161869	133288	
ÉLECTRICITÉ														0	10232	7503	0	2	79416	0	79418	97153	85051	
TOTAL		1537			27602		4374	20476			145725		84566	284280	15101	10940	-10774	38643	266086	-618	293337	603656	270287	
IMPORTATIONS	79	53	0	0	0	0	0	0	1099	271	146074	28536	217	176328										
PRODUCTION INDIGÈNE	131244	0	0	0	0	0	0	0	13710	0	189	34	11885	157082										
RESSOURCES	131323	53	0	0	0	0	0	0	11809	271	146263	28570	12102	333309										

Tableau A.9 Table de transformations énergétiques en 10<sup>3</sup> tec.  
Royaume - Uni 1970



## A.2 LE DOUBLE COMPTAGE ENERGETIQUE

### A.2.1 Présentation

Comme on l'a vu ci-avant, un agent énergétique (énergie entrante) est transformé dans un aménagement énergétique pour produire d'autres agents énergétiques (énergies sortantes). Le cheminement des agents tout au long des processus de transformation peut être décrit avec exactitude si les pertes et l'autoconsommation sont connues. Une représentation graphique des flux d'énergie à l'aide d'un réseau est particulièrement adéquate pour l'étude du système énergétique (K.C. Hoffmann, 1974; B. Saugy, Y. Bovet, A. Roulier, 1977). Mais sa représentation sous forme de tableau dans la logique Entrées-Sorties est délicate pour quatre raisons :

- (i) On raisonne en termes de secteurs énergétiques, pouvant à la fois grouper différents agents énergétiques (produits pétroliers par exemple) et différents modes de transformation (usines électriques). Il faut être attentif à ne pas compter deux fois la même quantité d'énergie, présente sous forme d'agents énergétiques différents. Par exemple, la houille permet de générer dans une centrale de l'électricité qui elle-même peut être transformée en chaleur ou utilisée dans des raffineries.
- (ii) S'il y a plusieurs produits dérivés, il est difficile de savoir où compter les pertes d'énergie lors de la transformation : à la ligne de l'énergie entrante ou aux lignes des énergies sortantes (ou laquelle de celles-ci) ?
- (iii) S'il y a plusieurs énergies entrantes (énergie principale, à transformer, et énergie auxiliaire, comme l'électricité par exemple), il se peut qu'une part de l'énergie auxiliaire ait été produite grâce à l'énergie principale : c'est l'autoconsommation. Par exemple, une part de l'électricité générée dans une centrale est autoconsommée dans la centrale. De la même manière que ci-dessus, où compter cette autoconsommation ?

(iv) Les tableaux A.5 à A.10 comptabilisent en ligne deux fois l'énergie. En effet, à partir des ressources, l'énergie est transformée pour être par la suite distribuée aux industries et aux ménages. Ainsi pour satisfaire une demande d'énergie dérivée, il faut faire attention à ne pas compter à la fois l'énergie primaire à partir de laquelle a été produite l'énergie dérivée, et l'énergie dérivée elle-même qui est distribuée. C'est ce qui se passe dans la colonne "production totale" des tableaux A.5 à A.10, où l'on compte tous les emplois faits de chaque agent énergétique qui ne correspondent pas forcément aux ressources de ces mêmes agents. La figure A.11 illustre ces opérations.

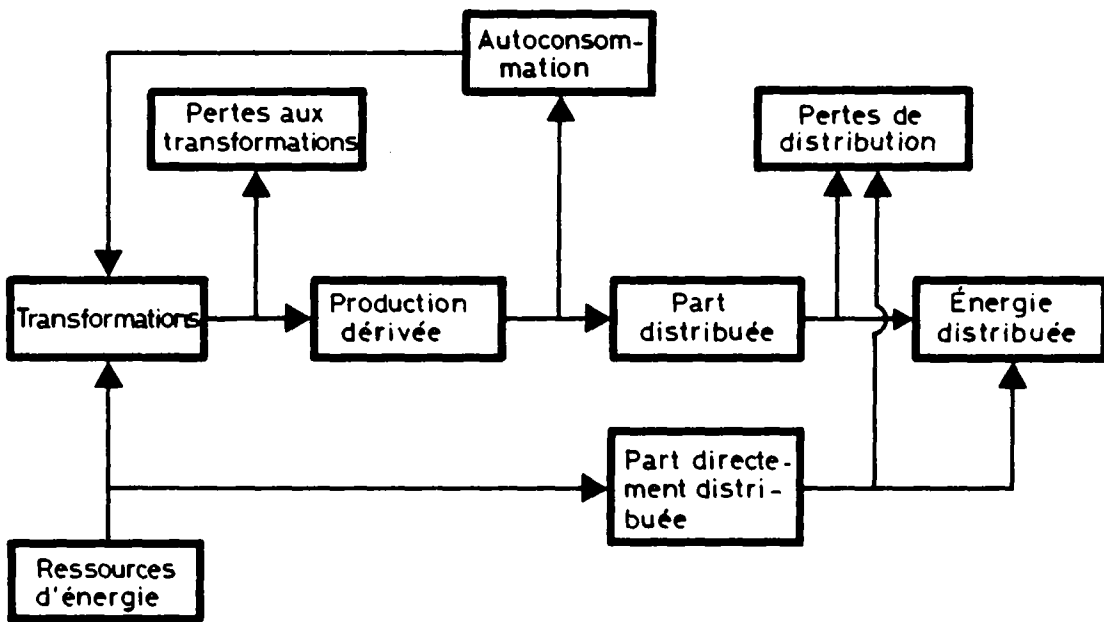


Fig. A.11 Des ressources d'énergie à l'énergie distribuée.

Les opérations effectuées dans le système énergétique se résument à des activités d'extraction, de transformation, de stockage et de distribution. Il n'y a guère que les première et deuxième qui soient explicitement définies, les deux autres activités intervenant à chaque échelon du système. Des pertes ont lieu principalement lors des transformations et de la distribution, diminuant d'autant l'énergie livrée aux industries et à la demande finale, qui vont l'utiliser pour leurs besoins. A chaque activité correspond donc

une dépense d'énergie. On peut alors percevoir le système énergétique non plus comme un système de production et de consommation de l'énergie, mais comme un système de dissipation de l'énergie. Tout se passe comme si, au lieu d'acheter de l'énergie, chaque consommateur achetait la possibilité de perdre de l'énergie. En raisonnant en termes de pertes d'énergie, les problèmes de double comptage se trouvent résolus : on compte les pertes là où elles ont lieu. De plus, le problème des coefficients d'équivalence de l'électricité sera aussi résolu (§A.2.2.3).

## A.2.2 La dissipation de l'énergie dans les secteurs énergétiques

On s'intéresse ici à transformer les tableaux A.5 à A.10 en termes de pertes d'énergie, c'est-à-dire à étudier les pertes d'énergie dans les secteurs énergétiques. La dissipation de l'énergie dans les secteurs industriels et dans les ménages sera étudiée au paragraphe A.3. Les tables de dissipation de l'énergie ne doivent comptabiliser que les pertes, indiquant le niveau auquel elles ont lieu. Ainsi, les échanges entre deux secteurs énergétiques doivent être exprimés en pertes. Celles-ci sont donc tout simplement les différences entre l'énergie entrante dans un secteur et la production dérivée qui résulte de la transformation. Par exemple, lors de la transformation de charbon en électricité, on indiquera les pertes d'énergie correspondantes (chaleur) à l'intersection de ces deux secteurs dans la table.

### A.2.2.1 Les pertes dans les secteurs énergétiques

Les remarques suivantes permettent leur détermination :

- (i) La colonne "consommation du secteur énergie" devrait être ventilée entre les différents aménagements énergétiques. Les données n'étant pas suffisamment explicites, on considèrera cette consommation comme autoconsommation, sauf pour le secteur "électricité" où des précisions sont possibles (§A.2.2.3). De toute façon cette hypothèse reflète assez bien la réalité, les combustibles liquides (resp. solides) n'étant guère délivrée aux secteurs charbons (resp. pétroles). L'autoconsommation est dans ce cas une perte énergétique interne

au secteur et intervient donc comme terme diagonal dans la matrice "énergie-énergie".

- (ii) La colonne "pertes" qui correspond aux pertes de distribution, est aussi ramenée sur la diagonale.
- (iii) S'il y a plusieurs agents qui conduisent à la production d'un même agent dérivé (par exemple charbon, pétrole, etc.. pour l'électricité), les pertes sont distribuées proportionnellement aux énergies entrantes (charbon, pétrole, etc...) et donc placées dans les cases correspondantes.
- (iv) L'autoconsommation de pétrole dans les raffineries est indiquée dans les tableaux de façon claire alors que ce n'était pas le cas dans les tables de transformations énergétiques.
- (v) Les pertes lors de la production de coke peuvent être ventilées entre les secteurs "coke" et "gaz d'usines" grâce au tableau A.12 qui indique les productions de coke de four et de coke de gaz.

	Coke de four	Coke de gaz
R. F. A.	39 914	2 565
FRANCE	14 151	10
ITALIE	7 046	125
BELGIQUE	7 119	0
ROYAUME - UNI	20 332	2 349
EUROPE DES SIX	70 227	2 700

Tableau A.12 Production de coke de four et de coke de gaz en t, 1970.

L'électricité consommée en tant qu'agent auxiliaire par les secteurs énergétiques sera déterminée au paragraphe A.2.2.3 après une analyse rapide du cycle du combustible nucléaire.

#### A.2.2.2 Le cycle du combustible nucléaire et ses difficultés d'intégration dans les tables énergétiques

Ainsi qu'on le verra au paragraphe A.3.1, les tables Entrées-Sorties de l'OSCE ont leur propre ventilation des secteurs énergétiques. En particulier, le secteur "minerais et produits de la transformation des matières fissiles et fertiles" sera considéré comme secteur énergétique (secteur "uranium"). Les matières fissiles et fertiles sont des entrées aux secteurs de l'électricité et de la chaleur. Les pertes de transformation (chaleur perdue) doivent donc être introduites dans les tables de dissipation de l'énergie. Mais leur quantification est délicate.

- (i) Une première difficulté surgit lors de la considération du cycle du combustible où les étapes sont différentes suivant les pays ou les usages auxquels le combustible est destiné (fins civiles ou militaires). La figure A.13 est une représentation schématique du cycle.

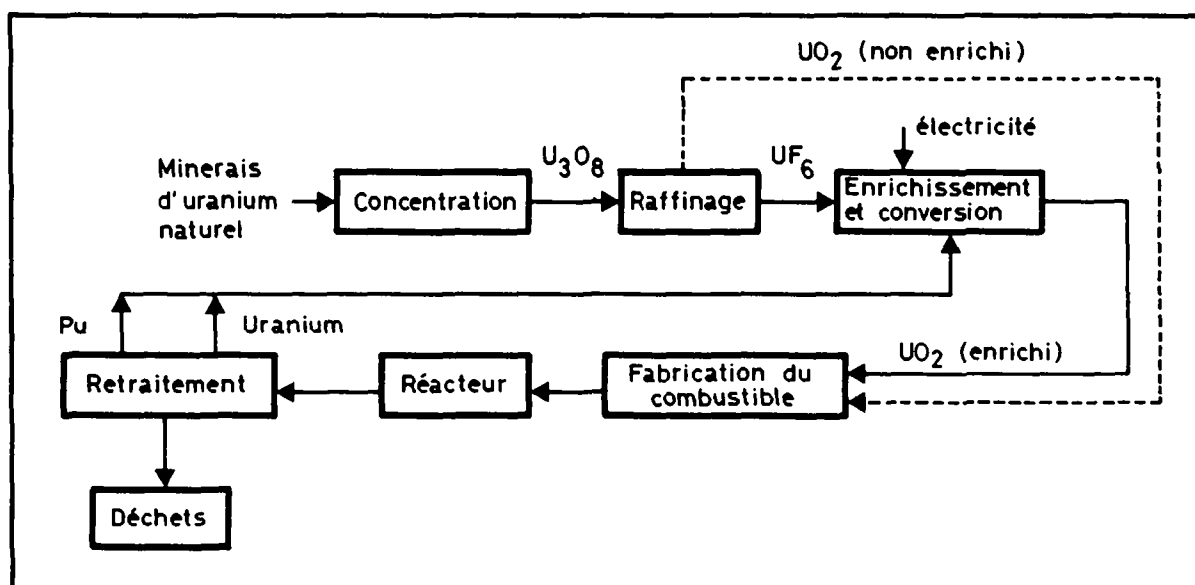


Fig. A.13 Cycle simplifié du combustible nucléaire avec ou sans enrichissement.

- (ii) En Europe, en 1970, seuls le Royaume-Uni et la France possédaient des usines d'enrichissement, à Capenhurst et Pierrelatte; l'électricité nécessaire pour leur fabrication est très importante : 2400 kWh par UTS pour la diffusion gazeuse (Revue générale nucléaire, 1978). Le tableau A.14 permet d'établir la consommation de ces usines en électricité pour un facteur d'utilisation de 80 % (hypothèse, besoins militaires exclusivement).

	UTS/an	Électricité consommée GWh/an
Capenhurst (GB)	400 000	768
Pierrelatte (F)	300 000	576

Tableau A.14 Électricité consommée par les usines d'enrichissement européennes.

- (iii) Les besoins en uranium sont différents selon le type de réacteur. Les réacteurs gaz-graphite (combustible non enrichi) sont en 1970 prépondérants en Grande-Bretagne et en France tandis que les réacteurs à eau légère (combustible enrichi) le sont en Italie, Allemagne et Belgique. Ceci explique les différences entre les quantités d'uranium enrichi exprimées en  $U_{235}$  du tableau A.15 dressé selon OSCE (1976<sup>a</sup>). Tous les pays d'Europe importent l'uranium enrichi pour leurs besoins civils des Etats-Unis.
- (iv) L'uranium non enrichi ( $UO_2$  ou  $U_3O_8$ ) a été acheminé et utilisé en Europe suivant les indications du tableau A.16. Seule la France produit une partie de ses besoins en uranium naturel.



	Importations	Exportations	Consommation et variations de stocks
R.F.A.	4 574,0	60,6	4 513,4
FRANCE	347,4	52,0	295,4
ITALIE	23,9	0	23,9
BELGIQUE	76,3	32,5	43,8
ROYAUME-UNI	0	0	0
EUROPE DES SIX	5 004,1	17,1	4 987,0

Tableau A.15 Mouvements d'uranium 235, en kg U<sub>235</sub>, 1970.

	Importations %	Production Indigène %	Total t uranium	Livraisons aux centrales	Solde
R.F.A.	100	-	6(?)	6	0(?)
FRANCE	25	75	1740	355	1385
ITALIE	100	-	33(?)	33	0(?)
BELGIQUE	-	-	0(?)	0	0(?)
ROYAUME-UNI	100	-	1335	1222	213
EUROPE DES SIX	27	73	1779(?)	394	1385(?)

Tableau A.16 Mouvements d'uranium naturel, en t uranium, 1970.

- (v) Le tableau A.17 exprime en GWh ces mouvements et la consommation dans les centrales, le solde représentant les variations de stocks. Les hypothèses suivantes ont été nécessaires :
- Rendement des réacteurs à eau légère : 0,33 (R.F.A., Belgique, Italie).
  - Rendement des réacteurs gaz-graphite : 0,30 (France, Royaume-Uni, Italie).

- Taux d'enrichissement moyen pour les réacteurs à eau légère : 3 %. Il faut donc approximativement 38,5 kg UO<sub>2</sub> pour 1 kg U<sub>235</sub>.
- 1 MWh électrique exige 3,04·10<sup>-5</sup> t U non enrichi ou 4,78·10<sup>-6</sup> t UO<sub>2</sub> enrichi à 3 % (taux de rejet 0,3 %, burn-up 30 000 MWd/t U) (A. Gardel, 1979, p.398).

	Uranium U		Uranium U <sub>235</sub>		Consomma- tion dans les centrales	Solde (variations) de stocks)
	Importations	Production	Importations	Exportations		
R. F. A.	597	0	111 639	1 479	18 273	92 484
FRANCE	47 697	143 093	9 327	1 397	19 037	179 683
ITALIE	3 444	0	613	0	10 083	- 6 026
BELGIQUE	0	0	1 864	794	173	897
ROYAUME - UNI	146 380	0	0	0	86 707	59 673
EUROPE DES SIX	51 738	143 093	122 986	3 670	48 681	265 466

Tableau A.17 Mouvements d'uranium naturel et d'U<sub>235</sub> . en GWh thermiques, 1970.

(vi) Il va de soi que ces équivalents-chaleur de l'uranium ne sont qu'approximatifs. Une étude plus poussée basée sur le parc exact de centrales, les charges de combustibles (initiales ou recharges), leurs mouvements exacts permettrait de préciser ces valeurs. Cependant, les données ne sont pas toujours disponibles et la qualité des chiffres ci-dessus est suffisante pour l'objectif assigné ici.

#### A.2.2.3 L'électricité : agent énergétique dérivé

Quatre modes de transformation sont employés à l'heure actuelle pour la génération de l'électricité : les centrales thermiques classiques, hydrauliques, géothermiques et nucléaires. Dans les premières, la quantité de chaleur apportée par les combustibles pour la production d'un kWh sont connues. Les pertes lors de la transformation sont définies par le rendement thermodynamique et les imperfections des installations (à l'autoconsommation près).

Puisque les pertes sont comptabilisées dans le cadre comptable développé précédemment, le principe de conservation de l'énergie (ou plutôt des pertes d'énergie pour un cadre orienté dans le sens de la dissipation de l'énergie), implique de prendre le kWh à son contenu calorifique (1 kWh = 860 kcal = 123 grammes d'équivalent charbon). Il n'y a donc pas lieu de "valoriser" l'électricité suivant l'usage qui peut en être fait, puisqu'il faut respecter le principe de conservation, rejoignant ici les propositions de P. Romain (1977), sur les bilans énergétiques. Par suite, les kWh d'origine géothermique et nucléaire doivent être de même pris à leur équivalent calorifique. La chaleur non utilisée produite dans un réacteur nucléaire et la chaleur non utilisée d'origine géothermique représentent des pertes que l'on peut déterminer grâce aux rendements des installations. Ces pertes interviendront de manière explicite dans nos tableaux. Pour l'énergie hydraulique, un rendement des turbines, des générateurs et des transformateurs doit être pris pour considérer l'imperfection des machines. Notons que cette manière de déterminer l'énergie primaire n'est pas aussi rigoureuse qu'il le faudrait (voir les travaux de A. Gardel, 1979, et le §1.2.2 (i)). Le tableau A.18 indique la nouvelle ventilation de l'énergie électrique, suivant sa provenance, ainsi que les pertes avec les hypothèses suivantes :

- Rendement des réacteurs à eau légère : 0,33
- Rendement des réacteurs gaz-graphite : 0,30
- Rendement des installations géothermiques : 0,07
- Rendement des installations hydrauliques : 0,80

Le tableau A.19 présente, sur la base du tableau A.18 et de statistiques détaillées concernant l'électricité, la répartition de la consommation en électricité des secteurs énergétiques. Dans le secteur "électricité" sont portées les consommations des centrales électriques. La consommation d'électricité lors de l'enrichissement de l'uranium (tableau A.14) entre dans le secteur "uranium". Le solde est ventilé entre les secteurs "houille", "agglomérés", "coke", "gaz d'usines" et "produits pétroliers".

	Consom. du secteur énergie	Pertes réseau	Demande finale	Importa- tions	Exporta- tions	Production	Pertes transfor- mation
R.F.A.	3 693	1 717	25 351	1 729	777	Th 26 886	49 055
						H 2 182	546
						N 741	1 504
FRANCE	1 609	1 217	15 154	543	605	Th 10 314	16 680
						H 7 026	1 757
						N 702	1 638
ITALIE	938	1 247	12 730	574	87	Th 8 628	13 784
						H 5 075	1 269
						G 335	4 451
						N 390	848
BELGIQUE	387	200	3 209	160	114	Th 3 713	6 918
						H 30	8
						N 7	14
ROYAUME - UNI	3 415	2 187	25 084	68	1	Th 26 727	57 839
						H 696	174
						N 3 196	7 458
EUROPE DES SIX	7 211	4 646	61 028	2 235	665	Th 54 673	95 660
						H 14 422	3 606
						G 335	4 451
						N 1 885	4 097

Tableau A.18 Répartition de l'électricité avec les pertes, suivant la valeur calorifique de l'électricité, en  $10^3$  tec, 1970.

	Houille	Agglomérés	Coke	Gaz d'usines	Produits pétroliers non gaz	Uranium	Électricité	Total
R. F. A.	427	37	93	675	273	0	2 188	3 693
FRANCE	78	200	79	0	363	71	818	1 609
ITALIE	7	0	21	0	181	0	729	938
BELGIQUE	57	61	19	0	58	0	192	387
ROYAUME - UNI	196	0	157	412	235	94	2 321	3 415
EUROPE DES SIX	650	298	229	675	1 018	71	4 270	7 211

Tableau A.19 Répartition du secteur " consommation du secteur énergie " pour l'électricité, en  $10^3$  tec, 1970.

#### A.2.2.4 Récapitulation

Les tableaux A.20 à A.25 présentent les tables de dissipation de l'énergie dans les secteurs énergétiques, à partir des commentaires et tableaux précédents, ainsi que des remarques du paragraphe A.1.3.

	HOUILLE	AGGLOMÉRÉS	LIGNITE	BRIQUETTES	COKE	GAZ COKERIES	GAZ HF	GAZ USINES	GAZ NATUREL	GPL	PÉTROLE BRUT	P.P. NON GAZEUX	URANIUM	ELECTRICITÉ	SOMME PERTES AUX TRANSFOR	VARIATION STOCKS	EXPORTATIONS	ENERGIE DISTRIBUÉE	SOMME DEMANDE FINALE	PERTES TOTALES
HOUILLE	2965	0			1945			477						22148	27535	-2096	15772	12277	25963	53486
AGGLOMÉRÉS		11													11	14	306	3694	4074	4025
LIGNITE			1694	0										14165	15859	50	4	851	905	16764
BRIQUETTES				20										173	193	-62	643	7081	7662	7855
COKE					350		0	0							350	727	10280	23680	34667	35017
GAZ COKERIES						4024								521	4545	3183	0	2090	5273	9818
GAZ HF							693							1494	2187	7	0	5033	5040	7227
GAZ USINES								306						0	306	-3058	174	6196	3312	3618
GAZ NATUREL									482					2806	3288	69	10	12911	12990	16276
GPL										427				243	670	-7	683	2765	3441	4111
PÉTROLE BRUT										22		11515			11537	859	192	196	1247	12784
P.P. NON GAZEUX														7505	7505	1894	17196	148683	167773	175276
URANIUM														1504	1504	11364	182	0	11546	13050
ÉLECTRICITÉ	427	0			93		0	0				273	0	4451	5244	0	777	25351	26128	31372
TOTAL	3392	11	1694	20	2388	4024	693	783	482	449	0	11788	0	55010	80734	12944	46199	250806	309981	390689
IMPORTATIONS	9720	300	536	1224	589	0	0	4	4122	418	143496	43961	13791	1729	219890					
PRODUCTION INDIGÈNE	112179	0	30718	0	0	0	0	0	14373	9	10775	13	0	2728	170795					
RESSOURCES	121899	300	31254	1224	589	0	0	4	18495	427	145271	43974	13791	4457	390689					

Tableau A.20 Dissipation de l'énergie dans les secteurs énergétiques, en 10<sup>3</sup> tec.  
R.F.A., 1970

	HOUILLE	AGGLOMÉRÉS	LIGNITE	BRIQUETTES	COKE	GAZ COKERIES	GAZ HF	GAZ USINES	GAZ NATUREL	GPL	PÉTROLE BRUT	P.P. NON GAZEUX	URANIUM	ÉLECTRICITÉ	SOMME PERTES AUX TRANSFOR.	VARIATION STOCKS	EXPORTATIONS	ÉNERGIE DISTRIBUÉE	SOMME DEMANDE FINALE	PERTES TOTALES
HOUILLE	680	0			888			?						7319	8899	-787	1143	12707	13063	21962
AGGLOMÉRÉS		14													14	-4	80	4410	4846	4500
LIGNITE			4											597	601	-75	15	345	285	886
BRIQUETTES				0											0	12	0	194	206	206
COKE					519		0								519	264	951	10242	11457	11976
GAZ COKERIES						1605								181	1786	330	0	1215	1505	3331
GAZ HF							166							1045	1211	16	0	3740	3756	4957
GAZ USINES								66							66	-469	15	1983	1529	1595
GAZ NATUREL								62	828					1224	2114	640	0	8147	8787	10901
GPL								19		85				54	158	227	897	3533	4657	4815
PÉTROLE BRUT										71		10223			10294	1720	0	0	1720	12014
P.P. NON GAZEUX								20						6260	6280	7114	20129	103380	130623	136903
URANIUM														1638	1638	22078	172	0	22230	23888
ÉLECTRICITÉ	78	0			79							363	71	3792	4383	0	605	15154	15759	20142
TOTAL	758	14	4	0	1496	1605	166	169	828	156	0	10586	71	22110	37963	31066	24007	165050	220123	258086
IMPORTATIONS	13722	199	0	206	3428	0	0	52	4129	338	14492	8777	7007	543	183323					
PRODUCTION INDIGÈNE	34472	0	1255	0	0	0	0	0	8470	422	3346	432	17583	8783	74763					
RESSOURCES	48194	199	1255	206	3428	0	0	52	12599	760	148268	9209	24590	9326	258086					

Tableau A.21 Dissipation de l'énergie dans les secteurs énergétiques, en 10<sup>3</sup> tec.  
France, 1970

	HOUILLE	AGGLOMÉRÉS	LIGNITE	BRIQUETTES	COKE	GAZ COKERIES	GAZ HF	GAZ USINES	GAZ NATUREL	GPL	PÉTROLE BRUT	P.P. NON GAZEUX	URANIUM	ELECTRICITÉ	SOMME PERTES AUX TRANSFOR.	VARIATION STOCKS	EXPORTATIONS	ENERGIE DISTRIBUÉE	SOMME FMALE	PERTES TOTALES
HOUILLE	0	10			666			5						699	1380	765	0	1128	1893	3273
AGGLOMÉRÉS		0													0	3	0	134	137	137
LIGNITE			0											290	290	18	0	41	59	349
BRIQUETTES				0											0	0	0	116	116	116
COKE					61		0	0							61	10	308	5539	5857	5918
GAZ COKERIES						871								87	958	16	0	787	771	1729
GAZ HF							86							291	377	0	0	884	884	1261
GAZ USINES								19							19	29	0	796	825	844
GAZ NATUREL								0	341					1190	1531	298	0	12 603	12 901	14 432
GPL								0		47				117	164	112	483	3 888	4 483	4 647
PÉTROLE BRUT										53		8179			8 232	-3363	0	0	-3363	4 869
P.P. NON GAZEUX									0					1110	1110	2 703	50 571	88 920	142 194	153 304
URANIUM														849	849	-740	0	0	-740	109
ÉLECTRICITÉ	7	0			21			0				181		7696	7 905	0	87	12 730	12 817	20 722
TOTAL	7	10	0	0	748	871	86	26	341	100	0	8 360	0	22 329	32 876	-181	51 449	127 566	178 834	211 710
IMPORTATIONS	12 636	55	41	116	192	0	0	0	0	108	163 123	4 706	499	574	182 050					
PRODUCTION INDIGÈNE	146	0	489	0	0	0	0	0	15 747	0	2 009	139	0	11 130	29 660					
RESSOURCES	12 782	55	530	116	192	0	0	0	15 747	108	165 132	4 845	499	11 704	211 710					

Tableau A.22 Dissipation de l'énergie dans les secteurs énergétiques, en 10<sup>3</sup> tec. Italie, 1970





	HOUILLE	AGGLOMÉRÉS	LIGNITE	BRIQUETTES	COKE	GAZ COKERIES	GAZ HF	GAZ USINES	GAZ NATUREL	GPL	PÉTROLE BRUT	P.P. NON GAZEUX	URANIUM	ELECTRICITÉ	SOMME PERTES AUX TRANSFOR.	VARIATION STOCKS	EXPORTATIONS	ENERGIE DISTRIBUÉE	SOMME DEMANDE FINALE	PERTES TOTALES
HOUILLE	1940	336			2882			1690						43 141	50 180	-10 989	3 207	40 711	32 929	83 118
AGGLOMÉRÉS		0													0	6	16	1 232	1 254	1 254
LIGNITE			0												0	0	0	0	0	0
BRIQUETTES				0											0	0	0	0	0	0
COKE					372									188	560	-1124	954	17 811	17 641	18 201
GAZ COKERIES					2863										2863	0	0	1525	1525	4 388
GAZ HF							418							372	790	0	0	3 416	3 416	4 206
GAZ USINES								2528							2528	34	0	14 083	14 117	16 645
GAZ NATUREL									185					161	346	0	0	4 798	4 798	5 144
GPL															0	238	162	1066	1466	1466
PÉTROLE BRUT										23		9779			9802	-1154	1692	0	538	10 340
P.P. NON GAZEUX														13 977	13 977	1597	32 610	102 028	136 238	150 212
URANIUM														7458	7458	7332	0	0	7 332	14 790
ÉLECTRICITÉ	196				157									4682	5364	0	1	25 084	25 085	30 449
TOTAL	2136	336	0	0	3411	2863	418	4418	185	23	0	10 014	94	69 979	93 877	-4060	38 642	211 754	246 328	340 215
IMPORTATIONS	79	53	0	0	0	0	0	0	1099	271	146 074	28 536	17 986	68	194 166					
PRODUCTION INDIGÈNE	131 244	0	0	0	0	0	0	0	13 710	0	189	34	0	870	146 047					
RESSOURCES	131 323	53	0	0	0	0	0	0	14 809	271	146 263	28 580	17 986	938	340 128					

Tableau A.24 Dissipation de l'énergie dans les secteurs énergétiques, en 10<sup>3</sup> tec.  
Royaume-Uni, 1970

	HOUILLE	AGLOMÉRÉS	LIGNITE	BRIQUETTES	COKE	GAZ COKERIES	GAZ HF	GAZ USINES	GAZ NATUREL	GPL	PÉTROLE BRUT	P.P. NON GAZEUX	URANIUM	ELECTRICITÉ	SOMME PERTES AUX TRANSFOR	VARIATION STOCKS	EXPORTATIONS	ENERGIE DISTRIBUÉE	SOMME DEMANDE FINALE	PERTES TOTALES
HOUILLE	3872	0			4215				519					33 534	42 140	-2 901	1 375	32 806	31 280	73 420
AGLOMÉRÉS		59													59	25	535	9320	9680	9739
LIGNITE			1698	0										14 868	16 566	-7	15	1237	1245	17 811
BRIQUETTES				20										171	191	-50	240	7496	7686	7877
COKE					933									4	937	1244	3282	47 940	52 466	53 403
GAZ COKERIES						7298								924	8222	3965	0	4870	8835	17 057
GAZ HF							1283							3 844	5127	-203	0	13 214	13 011	18 138
GAZ USINES								395							395	-3720	138	9268	5686	60 81
GAZ NATUREL								38	2615					9988	12 641	1018	12	52 846	53 676	66 317
GPL								34		560				523	1117	415	1862	11 734	14 011	15 128
PÉTROLE BRUT										169	37 140				37 309	-1029	246	196	-587	36 722
P.P. NON GAZEUX								19						31 804	31 823	14 273	164 823	397 476	576 572	608 338
URANIUM														4096	4096	32 619	451	0	33 070	37 166
ÉLECTRICITÉ	650	0			229			11			1018		71	16 973	18 952	0	665	61 028	61 693	80 645
TOTAL	4522	59	1698	20	5377	7298	1283	1016	2615	729	0	38 158	71	116 729	179 578	45 649	173 448	649 231	868 324	1047 888
IMPORTATIONS	31 169	0	573	1248	822	0	0	4	726	329	580 284	81 366	21 469	2235	720 205					
PRODUCTION INDIGÈNE	161 370	0	32 462	0	0	0	0	0	73 577	431	18 875	583	17 582	22 814	327 694					
RESSOURCES	192 539	0	33 035	1248	822	0	0	4	74 303	760	599 139	81 949	39 051	25 049	1047 888					

Tableau A.25 Dissipation de l'énergie dans les secteurs énergétiques, en 10<sup>3</sup> tec.  
Europe des six, 1970

### A.3 LA DISTRIBUTION DE L'ENERGIE DANS LES INDUSTRIES

#### A.3.1 Choix des secteurs industriels

L'énergie distribuée est délivrée aux différentes industries et aux consommateurs individuels pour satisfaire la demande. Cette énergie est distribuée dans le système de production de biens et de consommation; elle est ensuite transformée dans des appareils d'utilisation. C'est la ventilation de l'énergie distribuée entre les différents secteurs de demande qui sera étudiée ici.

La détermination des secteurs industriels dépend de plusieurs facteurs :

- les données : un compromis doit être trouvé entre l'idéal et le possible,
- l'objectif assigné, qui se conjugue plus ou moins bien avec les données disponibles,
- la correspondance avec d'autres études ou d'autres sources de données.

Dans notre cas, c'est d'abord la concordance des tables Entrées-Sorties et des tables de dissipation énergétique qui importe. Le choix des secteurs industriels doit être fait sur la base des statistiques énergétiques de l'OSCE, de concert avec les secteurs des tables Entrées-Sorties de l'OSCE. Celles-ci sont publiées pour l'année 1970 par l'OSCE (1978), dans la structure NACE-CLIO-R44, en 44 branches. Ces 44 branches sont décrites à l'annexe E. Le tableau A.26 indique les branches pour lesquelles existent des valeurs énergétiques (code BILEN) et les groupes NACE-CLIO correspondants.

Le tableau A.27 tente de passer directement du code NACE-CLIO-R44 au code BILEN et amène les commentaires suivants :

	CODE BILEN	LIBELLÉ DES BRANCHES EUROSTAT	CODE DES GROUPES NACE-CLIO
171 - INDUSTRIE	1710	Sidérurgie	221, 222, 223, 311.1, 312
	1711	Métaux non ferreux	224, 311.2
	1712	Chimie	25, 26
	1713	Produits minéraux non métalliques	24
	1714	Extraction (combustibles exclus)	21, 23
	1715	Denrées alimentaires, boisson, tabac	41, 42
	1716	Textiles, cuir, habillement	43, 44, 45
	1717	Papier et imprimerie	47
	1718	Fabrications métalliques	313, 314, 315, 316 32, 33 (machines) 34 (électrotechnique) 35 (moteurs route) 36 (autres moteurs)
	1719	Autres branches	37 (machines de bureau) 46, 49 (bois, jeux) 48 (caoutchouc, plastique) 50 (construction, G.C.)
172 - TRANSPORTS	1721	Transports ferroviaires	710, 721
	1722	Transports routiers	722, 723, 724, 725
	1723	Transports aériens	75
	1724	Navigation intérieure	73, 74
173 - AUTRES	Peu ventilé	Agriculture, pêche Artisanat, administration publique, services, commerce Foyers domestiques	01, 02, 03 solde externe

Tableau A.26 Correspondance des secteurs industriels, des "transports" et "autres" dans EUROSTAT (code BILEN) avec les groupes NACE - CLIO.

CODE NACE-CLIO R-44	BRANCHES ET SOUS-BRANCHES Libellé	CODE BILEN
010	Produits de l'agriculture, de la sylviculture et de la pêche	173
030	Houille, lignite, agglomérés et briquettes	} "énergie"
050	Produits de la cokéfaction	
070	Pétrole brut, gaz naturel, produits pétroliers	
090	Energie électrique, gaz, vapeur et eau	
091	Energie électrique, vapeur, eau chaude, air comprimé	
093	Gaz distribué	
095	Eau	
110	Minerais et produits de la transformation des matières fissiles et fertiles	} 1714, 1710, 1711
130	Minerais et métaux ferreux et non ferreux autres que fertiles et fissiles	
131	Minerais et métaux ferreux	
133	Minerais et métaux non ferreux	1714, 1711
150	Minéraux et produits de base de minéraux non métalliques	1713, 1714
170	Produits chimiques	1712
190	Produits en métaux à l'exclusion des machines et du matériel de transport	1710, 1718
210	Machines agricoles et industrielles	1718
230	Machines de bureau, machines pour le traitement de l'information, instruments de précision, d'optique et similaires	1718, 1719
250	Matériel et fournitures électriques	1718
270	Véhicules et moteurs automobiles	1718
290	Moyens de transport autres que véhicules automobiles	1718
310	Viandes, préparation et conserves de viande, autres produits de l'abattage	} 1715
330	Lait et produits laitiers	
350	Autres produits alimentaires	
370	Boissons	
390	Produits à base de tabacs	} 1716
410	Produits textiles, habillement	
430	Cuirs, articles en cuir et en peau, chaussures	
450	Bois et meubles en bois	
470	Papier, articles en papier, articles imprimés	
490	Produits en caoutchouc et en plastique	
510	Produits des autres industries manufacturières	
530	Bâtiments et ouvrages du génie civil	
550	Récupération et réparation	
570	Services de commerce	
590	Services de restauration et hébergement	} 173
610	Services de transport intérieur	
630	Services de transports maritimes et aériens	1721, 1722
631	Services de transports maritimes et par cabotage	1723, 1724
633	Services de transports aériens	1724
650	Services annexes des transports	1723
670	Services de communication	1721
690	Services des institutions de crédit et d'assurance	} 173
710	Services fournis aux entreprises	
730	Services de location de biens immobiliers	
750	Services d'enseignement et de recherche marchands	
770	Services de santé marchands	
790	Serv. récréatifs et culturels, serv. personnels, autres serv. marchands n.d.a.	
810	Services d'administration générale des administrations publiques	
830	Serv. d'enseignement et de recherche non marchands des adm. publiques et priv.	
890	Services de santé non marchands des administrations publiques et privées	
930	Services domestiques et autres services non marchands n.d.a.	

Tableau A.27 Correspondance des secteurs NACE - CLIO - R44 avec le code BILEN.

(i) Les secteurs BILEN se divisent en secteurs industriels, en secteurs "services de transport", et "autres" groupant les foyers domestiques, l'agriculture et la pêche, les services divers, commerces et administrations publiques. Une première décomposition s'impose pour séparer les foyers (résidentiel), externes au modèle Entrées-Sorties, des services (commercial) et de l'agriculture. Le tableau A.28 permet de clarifier cette question (sources : Comité national français de la CME (1976) pour la France; International Energy Agency (1977) pour la R.F.A., la Belgique et le Royaume-Uni. Les proportions sont supputées pour l'Italie et l'Europe des Six sur la base de OSCE (1976<sup>a</sup>)).

(ii) Les secteurs énergétiques décrits dans les tables Entrées-Sorties sont :

- 030 Houille, lignite, agglomérés et briquettes
- 050 Produits de la cokéfaction
- 070 Pétrole brut, gaz naturel, produits pétroliers
- 090 Energie électrique, gaz, vapeur et eau.

Ainsi qu'on l'a dit précédemment, le secteur :

- 110 Minerais et produits de la transformation des matières fissiles et fertiles

où sont répertoriés tous les combustibles nucléaires (OSCE, 1975) et les activités pour leur fabrication sera lui aussi considéré comme secteur énergétique (secteur "uranium").

Le secteur "bois" pourrait aussi être un secteur énergétique. Toutefois, la faible part de cet agent dans les économies européennes et le fait que les autres secteurs énergétiques n'ont pas besoin de cet agent, éliminent cette possibilité.

(iii) Les autres secteurs du tableau A.27 sont donc les secteurs industriels et les services. A chacun correspond le ou les codes BILEN du tableau A.26. Un certain chevauchement entre les deux codes existe, qui ne s'applanit qu'en agrégeant les secteurs, afin d'éviter de fixer des proportions par trop arbitraires des quantités d'énergie livrées. Le tableau A.29 dresse finalement la liste des secteurs retenus.

	R. F. A. 1974		BELGIQUE 1974		ROYAUME-UNI 1974		FRANCE 1970		ITALIE 1970		EUROPE DES SIX 1970	
	Résidentiel	Commercial	Résidentiel	Commercial	Résidentiel	Commercial	Résidentiel	Commercial	Résidentiel	Commercial	Résidentiel	Commercial
Houille	60	40	76	24	85	15	89	11	85	15	70	30
Agglomérés	60	40	77	23	100	-	100	-	100	-	80	20
Lignite	-	40	-	23	-	14	100	-	100	-	80	20
Briquettes	60	40	100	-	-	-	100	-	100	-	70	30
Coke	60	40	42	58	67	33	40	60	50	50	50	50
Gaz dérivés	35	65	-	-	78	22	80	20	88	12	75	25
Gaz naturel	63	37	74	26	81	19	75	27	95	5	73	27
GPL	98	2	97	3	100	-	85	14	90	10	84	16
Pétrole brut	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P. P. non gazeux	60	40	67	33	28	72	60	40	60	40	59	41
Électricité	57	43	61	39	68	32	49	51	60	40	53	47

Tableau A.28 Ventilation des agents énergétiques entre le résidentiel et le commercial, en %.



LIBELLÉ DES SECTEURS	CODE NACE - CLIO-R44	CODE BILEN
1. Minerais et métaux ferreux et non ferreux autres que fertiles et fissiles	130	1710 ( $\bar{\alpha}$ ), 1711, 1714 ( $\bar{\beta}$ )
2. Minéraux et produits à base de minéraux non métalliques	150	1713, 1714 ( $1 - \bar{\beta}$ )
3. Produits chimiques	170	1712
4. Construction	530	1719 ( $\bar{\gamma}$ )
5. Fabrications métalliques	190	1710 ( $1 - \bar{\alpha}$ ), 1718 ( $\bar{\delta}$ )
6. Construction de machines	210, 230, 270, 290	1718 ( $\bar{\epsilon}$ )
7. Fabrications électriques	250	1718 ( $1 - \bar{\delta} - \bar{\epsilon}$ )
8. Textiles, habillement, cuir	410, 430	1716
9. Papier, articles en papier et imprimés	470	1717
10. Produits alimentaires	010, 310 à 390	1715, 173
11. Autres industries manufacturières	450, 490, 510	1719 ( $1 - \bar{\gamma}$ )
12. Transport par route et rail	610, 650 (50 %)	1721, 1722
13. Transport par air et eau	630, 650 (50 %)	1723, 1724
14. Services	550 à 590, 670 à 930	173

Tableau A.29 Liste des secteurs industriels considérés et codes correspondants.

(iv) Les rapports  $\bar{\alpha}$ ,  $\bar{\beta}$ ,  $\bar{\gamma}$ ,  $\bar{\delta}$ ,  $\bar{\epsilon}$ , en pourcents doivent être déterminés pour chaque pays. Ils résultent des distinctions nécessaires à faire entre les secteurs pour lesquels les contenus énergétiques pourraient être par trop disparates. Ainsi, le secteur "construction" (Génie civil et Bâtiment) a été différencié du secteur "fabrications métalliques" (charpentes, chaudronnerie, chaudières, réservoirs, échangeurs, conduites, etc...) et les secteurs "constructions de machines" et "fabrications électriques" ont été dissociés. Quelques secteurs ne posent guère de problèmes du fait de la disponibilité des statistiques. Quelques désagrégations ont été impossibles à effectuer (véhicules, moteurs, ...) d'une part par manque de données énergétiques et/ou d'autre part par manque de données économiques (par exemple

les secteurs 131, 133 ou 631, 633 des tables Entrées-Sorties pour lesquels il n'y a pas de ventilation en colonne).

- (v) Le tableau A.30 dresse les valeurs des rapports pour la R.F.A. et la France, à partir des travaux de H.J. Wagner (1978) et E. Coste et D. Oury (1978). Les différences observées, surtout dans l'industrie sidérurgique proviennent pour une bonne part des procédés employés, des quantités de minerais traitées et des ressources en ferrailles (OCDE, 1977). A partir de ces données, un ordre de grandeur des rapports a été estimé pour les autres pays dans leur ensemble, en l'absence de données spécifiques pour les combustibles liquides, solides et gazeux. L'électricité consommée par les secteurs industriels peut en effet être trouvée dans les statistiques de l'ONU (1977). La part de la construction (BILEN 1719) a été évaluée à 5 % (montage, assemblage, démolition ou réparation sur le site). De plus, le secteur "agriculture" (BILEN 173) est additionné au secteur "produits alimentaires" quand les données par agent existent (produits pétroliers).

	$\bar{\alpha}$			$\bar{\beta}$			$\bar{\gamma}$			$\bar{\delta}$			$\bar{\epsilon}$		
	C.S.	P.G.	E.	C.S.	P.G.	E.	C.S.	P.G.	E.	C.S.	P.G.	E.	C.S.	P.G.	E.
R. F. A.	3	6	14	1	7	13	5			10	23	17	67	57	57
FRANCE	3	17	13	6	1	11	5			11	22	18	83	60	65
AUTRES PAYS	3	10	13	5	5	12	5			11	22	18	75	60	60

Tableau A.30 Estimations en pourcents des rapports  $\bar{\alpha}$ ,  $\bar{\beta}$ ,  $\bar{\gamma}$ ,  $\bar{\delta}$ ,  $\bar{\epsilon}$  pour la R.F.A. et la France, et hypothèses pour les autres pays (voir tableau A.29).

(C.S. = combustibles solides, P.G. = pétrole et gaz, E. = électricité)

A.3.2 Les tables de dissipation de l'énergie dans les secteurs industriels et les ménages

Les tableaux A.31 à A.36 présentent les flux de dissipation d'énergie par agent énergétique et ventilés entre les différents secteurs industriels et la consommation privée des ménages. On peut faire quelques remarques :

(i) Les pétroles utilisés à des fins non énergétiques, outre la part qui est attribuée au secteur "chimie" sont ventilés à raison de :

- 30 % pour les foyers domestiques
- 20 % pour les services
- 20 % pour la construction
- 10 % pour les fabrications métalliques
- 10 % pour la construction de machines
- 5 % pour l'électronique
- 5 % pour les textiles,

tandis que les gaz utilisés à des fins non énergétiques sont attribués uniquement à la chimie (gaz de cokeries et GPL).

(ii) Les gaz de cokeries et hauts fourneaux sont supposés se diviser entre les secteurs No 1 "minerais et métaux ferreux" et No 5 "fabrications métalliques" suivant les proportions définies ci-dessus. Le solde (gaz d'usines) est délivré à tous les secteurs et à la demande finale.

(iii) La consommation en carburants liquides est scindée à raison de 40 % pour les services de transport (No 12 et 13) et 60 % pour les consommateurs privés. Les autres agents énergétiques seront comptés à 100 % dans les secteurs No 12 et 13.

	MINÉRAIS ET MÉTAUX FER ET NON FERREUX	MINÉRAUX ET PRODUITS NON MÉTALLIQUES	PRODUITS CHIMIQUES	CONSTRUCTION	FABRICATIONS MÉTALLIQUES	CONSTRUCTION DE MACHINES	FABRICATIONS ÉLECTRIQUES	TEXTILES, CUIR	PAPIER, IMPRIMÉS	ALIMENTS, BOISSON, TABAC	AUTRES INDUSTRIES MANUFACTURIÈRES	TRANSPORT ROUTE ET RAIL	TRANSPORT AIR ET EAU	SERVICES	CONSOMMATION PRIVÉE	ÉNERGIE DISTRIBUÉE
HOUILLE	289	756	1385	15	510	395	136	418	464	765	276	1574	15	2112	3167	12277
AGGLOMÉRÉS	0	0	0	0	20	0	0	0	0	0	0	4	0	1468	2202	3694
LIGNITE	22	22	340	2	5	31	10	71	123	82	45	4	0	47	47	851
BRIQUETTES	11	94	222	1	113	27	9	43	30	14	26	35	0	2582	3874	7081
COKE	775	1295	798	5	12530	235	80	32	13	98	95	104	2	3047	4571	23680
GAZ COKERIES	122	0	49	0	1919	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2090
GAZ HF	302	0	0	0	4731	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5033
GAZ USINES	148	528	260	21	469	346	121	37	22	66	406	0	0	1117	2655	6196
GAZ NATUREL	486	1544	3125	6	3405	978	343	156	189	172	108	0	0	852	1547	12911
GPL	63	176	1409	16	100	34	12	16	0	13	305	17	0	251	353	2765
PETROLE BRUT	0	0	196	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	196
P.P. NON GAZEUX	1056	8613	11959	2725	7488	4097	1632	2623	2454	5738	2038	13054	1603	24647	58956	148683
URANIUM	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ÉLECTRICITÉ	1363	1161	4531	33	2508	1290	589	592	927	551	618	974	0	4921	5293	25351
TOTAL	4637	14 189	24 274	2 824	33 798	7 433	2 932	3 988	4 222	7 499	3 917	15 766	1 620	41 044	82 665	230 808

Tableau A.31 Dissipation de l'énergie dans les secteurs industriels en 10<sup>3</sup> tec.  
R.F.A., 1970

	MINÉRAIS ET MÉTAUX FER, ET NON FERREUX	MINÉRAUX ET PRODUITS NON MÉTALLIQUES	PRODUITS CHIMIQUES	CONSTRUCTION	FABRICATIONS MÉTALLIQUES	CONSTRUCTION DE MACHINES	FABRICATIONS ÉLECTRIQUES	TEXTILES, CUIR	PAPIER, IMPRIMÉS	ALIMENTS, BOISSON, TABAC	AUTRES INDUSTRIES MANUFACTURIÈRES	TRANSPORT ROUTE ET RAIL	TRANSPORT AIR ET EAU	SERVICES	CONSOMMATION PRIVÉE	ÉNERGIE DISTRIBUÉE
HOUILLE	311	980	799	71	1718	218	18	515	392	437	272	321	0	735	5947	12707
AGGLOMÉRÉS	0	0	0	0	31	0	0	0	0	0	0	65	0	0	4314	4410
LIGNITE	160	19	33	1	0	1	1	22	1	38	15	0	0	0	54	345
BRIQUETTES	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	191	194
COKE	624	413	453	3	7315	371	28	5	0	96	53	36	0	507	338	10242
GAZ COKERIES	133	0	436	0	646	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1215
GAZ HF	636	0	0	0	3104	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3740
GAZ USINES	49	78	7	1	100	35	10	4	3	14	11	0	0	332	1339	1983
GAZ NATUREL	174	1013	2355	3	674	223	68	27	273	100	34	27	0	852	2324	8147
GPL	2	66	323	4	44	112	33	1	0	4	82	0	0	392	2470	3533
PETROLE BRUT	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
P.P. NON GAZEUX	1209	8882	12105	1191	4679	2801	953	2187	2229	7386	1188	9742	1012	12701	35115	103380
URANIUM	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ÉLECTRICITÉ	1549	809	2336	24	1171	669	175	446	659	459	452	714	0	2819	2602	15154
TOTAL	4827	12260	18817	1241	19752	4460	1286	3207	3557	8534	2107	10908	1012	18338	54694	165060

Tableau A.32 Dissipation de l'énergie dans les secteurs industriels en 10<sup>3</sup> tec.  
France, 1970

	MINÉRAIS ET MÉTAUX FER ET NON FERREUX	MINÉRAUX ET PRODUITS NON MÉTALLIQUES	PRODUITS CHIMIQUES	CONSTRUCTION	FABRICATIONS MÉTALLIQUES	CONSTRUCTION DE MACHINES	FABRICATIONS ÉLECTRIQUES	TEXTILES, CUIR	PAPIER, IMPRIMÉS	ALIMENTS, BOISSON, TABAC	AUTRES INDUSTRIES MANUFACTURIÈRES	TRANSPORT ROUTE ET RAIL	TRANSPORT AIR ET EAU	SERVICES	CONSOMMATION PRIVÉE	ÉNERGIE DISTRIBUÉE
HOUILLE	33	167	125	0	32	10	2	4	0	6	1	259	0	73	416	1128
AGGLOMÉRÉS	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	134	134
LIGNITE	1	4	0	0	8	0	0	0	0	0	1	0	0	0	27	41
BRIQUETTES	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	116	116	
COKE	126	209	209	0	3563	234	44	3	0	49	1	0	0	551	550	5539
GAZ COKERIES	56	0	228	0	503	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	787
GAZ HF	88	0	0	0	796	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	884
GAZ USINES	0	5	11	0	6	16	5	0	0	0	0	0	0	87	666	796
GAZ NATUREL	344	2383	3659	5	1610	460	138	350	276	424	104	113	0	149	2588	12603
GPL	14	80	1258	0	66	118	35	9	8	19	9	676	0	160	1436	3888
PETROLE BRUT	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
P.P. NON GAZEUX	612	8872	17435	920	3195	1917	663	2011	1945	4523	819	7662	975	9766	27605	88920
URANIUM	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ÉLECTRICITÉ	713	963	2133	25	1450	634	233	717	540	403	469	447	0	1620	2363	12730
TOTAL	1987	12683	25058	950	11229	3389	1120	3094	2769	5424	1404	9157	975	12406	35921	127566

Tableau A.33 Dissipation de l'énergie dans les secteurs industriels en 10<sup>3</sup> tec.  
Italie , 1970

	MINÉRAIS ET MÉTAUX FER ET NON FERREUX	MINÉRAUX ET PRODUITS NON MÉTALLIQUES	PRODUITS CHIMIQUES	CONSTRUCTION	FABRICATIONS MÉTALLIQUES	CONSTRUCTION DE MACHINES	FABRICATIONS ÉLECTRIQUES	TEXTILES, CUIR	PAPIER, IMPRIMÉS	ALIMENTS, BOISSON, TABAC	AUTRES INDUSTRIES MANUFACTURIÈRES	TRANSPORT ROUTE ET RAIL	TRANSPORT AIR ET EAU	SERVICES	CONSOMMATION PRIVÉE	ÉNERGIE DISTRIBUÉE
HOUILLE	36	458	3	2	172	17	3	4	20	46	45	29	0	998	3160	4993
AGGLOMÉRÉS	0	0	0	0	19	0	0	0	0	0	0	1	0	203	681	904
LIGNITE	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
BRIQUETTES	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	29	29
COKE	226	139	129	12	4229	37	7	0	0	18	223	12	2	70	51	5155
GAZ COKERIES	59	0	33	0	528	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	620
GAZ HF	181	0	0	0	1628	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1809
GAZ USINES	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	69	204	273
GAZ NATUREL	194	411	1074	4	575	58	17	10	4	8	76	0	0	184	687	3302
GPL	13	29	109	2	10	13	4	3	1	7	34	42	0	12	440	719
PETROLE BRUT	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
P.P. NON GAZEUX	324	2171	3562	313	1021	544	188	399	358	1320	1208	1922	389	2816	9051	25586
URANIUM	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ÉLECTRICITÉ	197	213	611	3	492	129	47	143	129	124	59	91	0	365	606	3209
TOTAL	1230	3421	5521	336	8674	798	266	559	512	1523	1645	2097	391	4717	14909	46599

Tableau A.34 Dissipation de l'énergie dans les secteurs industriels en 10<sup>3</sup> tec.  
Belgique, 1970

	MINERAIS ET METAUX FER ET NON FERREUX	MINERAUX ET PRODUITS NON METALLIQUES	PRODUITS CHIMIQUES	CONSTRUCTION	FABRICATIONS METALLIQUES	CONSTRUCTION DE MACHINES	FABRICATIONS ELECTRIQUES	TEXTILES, CUIR	PAPIER, IMPRIMÉS	ALIMENTS, BOISSON, TABAC	AUTRES INDUSTRIES	TRANSPORT ROUTE ET RAIL	TRANSPORT AIR ET EAU	SERVICES	CONSUMATION PRIVEE	ENERGIE DISTRIBUEE
HOUILLE	18	4104	2650	89	830	1626	304	1914	552	2650	1695	118	127	3604	20420	40711
AGGLOMERÉS	0	0	0	0	102	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1130	1232
LIGNITE	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
BRICQUETTES	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
COKE	284	230	158	4	9252	446	83	73	57	138	70	52	0	2298	4666	17811
GAZ COKERIES	153	0	0	0	1372	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1525
GAZ HF	342	0	0	0	3074	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3416
GAZ USINES	160	165	155	6	562	673	202	73	53	175	107	0	0	2129	9623	14083
GAZ NATUREL	38	261	736	5	494	414	124	50	17	102	101	0	0	386	2070	4798
GPL	85	357	219	6	88	36	11	5	11	23	109	0	0	0	116	1066
PETROLE BRUT	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
P.P. NON GAZEUX	1452	4355	13348	2726	5899	4084	2042	3856	2177	7168	3629	11687	2258	11097	26250	102028
URANIUM	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ÉLECTRICITÉ	583	749	2226	45	1846	1307	479	707	715	667	861	336	0	5077	9487	25085
TOTAL	3115	10 221	19 502	2 881	23 519	8 586	3 245	6 678	3 582	10 923	6 572	12 193	2 385	24 591	75 762	211 755

Tableau A.35 Dissipation de l'énergie dans les secteurs industriels en 10<sup>3</sup> tec.  
Royaume - Uni, 1970



	MINÉRAIS ET MÉTAUX FER ET NON FERREUX	MINÉRAUX ET PRODUITS NON MÉTALLIQUES	PRODUITS CHIMIQUES	CONSTRUCTION	FABRICATIONS MÉTALLIQUES	CONSTRUCTION DE MACHINES	FABRICATIONS ÉLECTRIQUES	TEXTILES, CUIR	PAPIER, IMPRIMÉS	ALIMENTS, BOISSON, TABAC	AUTRES INDUSTRIES MANUFACTURIÈRES	TRANSPORT ROUTE ET RAIL	TRANSPORT AIR ET EAU	SERVICES	CONSOMMATION PRIVÉE	ÉNERGIE DISTRIBUÉE
HOUILLE	702	2556	2343	29	2537	696	130	943	876	1258	559	2186	15	5393	12583	52806
AGGLOMÉRÉS	0	0	0	0	70	0	0	0	0	0	0	70	0	3672	5508	9320
LIGNITE	220	45	373	1	14	36	7	93	124	120	25	4	0	35	140	1237
BRIQUETTES	11	94	222	1	113	27	9	43	30	14	26	38	0	2060	4808	7496
COKE	1856	2046	1725	20	30644	889	166	40	13	277	376	152	4	4866	4866	47940
GAZ COKERIES	413	0	745	0	3712	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4870
GAZ HF	1321	0	0	0	11893	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	13214
GAZ USINES	158	647	405	36	163	415	125	42	25	80	683	0	0	1607	4882	9268
GAZ NATUREL	1437	5981	14349	19	6804	1937	582	654	998	1474	363	139	0	4820	13089	52646
GPL	98	353	3445	23	225	287	86	31	11	53	433	831	0	929	4929	11734
PÉTROLE BRUT	0	0	196	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	196
P.P. NON GAZEUX	3454	29106	49777	5586	18392	9857	3626	7625	7476	20640	5699	34776	4920	56251	140291	397476
URANIUM	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ÉLECTRICITÉ	4037	3263	10516	89	6363	2880	1056	1988	2440	1754	1678	2343	0	10654	11967	61028
TOTAL	13707	44091	84096	5804	80930	17024	5787	11459	11993	25670	9842	40539	4939	90287	203063	649231

Tableau A.36 Dissipation de l'énergie dans les secteurs industriels en 10<sup>3</sup> tec.  
Europe des Six, 1970

#### A.4 LES TABLES DE DISSIPATION DE L'ENERGIE

Ces tables sont présentées aux tableaux A.38 à A.43. Elles indiquent comment et où les "ressources" d'énergie deviennent des pertes. Ces pertes ont d'abord lieu dans le système de transformation de l'énergie et le solde d'énergie est distribué aux industries et à la demande finale. Les tables de dissipation de l'énergie ont été agrégées au point de vue des agents énergétiques, afin d'être en conformité sur ce point avec les secteurs énergétiques des tables Entrées-Sorties. Cette agrégation est faite sur la base de la publication de l'OSCE (1975) qui définit les secteurs énergétiques des tables Entrées-Sorties. Elle est résumée au tableau A.37.

SECTEURS EUROSTAT	SECTEURS NACE - CLIO - R44
Houille Agglomérés Lignite Briquettes	Combustibles solides ainsi que leurs agglomérés
Coke Gaz de cokeries Gaz de hauts fourneaux	Produits des cokeries
Gaz naturel GPL Pétrole brut Produits pétroliers non gazeux	Produits de l'extraction du pétrole et du gaz naturel et produits pétroliers
Gaz d'usines Électricité	Énergie électrique, gaz, vapeur, eau chaude et eau distribuée
Uranium	Combustibles nucléaires

Tableau A.37 Correspondance des secteurs énergétiques entre les statistiques EUROSTAT et le code NACE - CLIO - R44



	49854	55 227	14 127	776	0	78	0	698	HOUILLE
	3428	0	3428	3267	0	79	0	898	COKE
	170836	12 670	158 166	11 570	0	363	11 207	0	PETROLES BRUT ET RAFFINES GAZ NATUREL
	9378	8 783	595	22 279	1 638	3 858	7 639	1 226	ELECTRICITE, GAZ DERIVES
	24 590	17 583	7 007	71	0	71	0	0	URANIUM
	258 086	74 763	183 323	37 963	1 638	44 49	18 846	35 16	SOMME INTERMEDIAIRE
RESSOURCES									
PRODUCTION INDIGENE									
IMPORTATIONS									
TOTAL									
URANIUM									
ELECTRICITE GAZ DERIVES									
PETROLES GAZ NATUREL									
COKE									
HOUILLE									
MINEAIS ET METAUX FERREUX ET NON FERREUX	4847	0	1598	1385	1393	471			
MINEAUX ET PRODUITS NON METALLIQUES	12 260	0	887	9961	413	999			
PRODUITS CHIMIQUES	18 847	0	2 343	14 783	889	832			
CONSTRUCTION	1 241	0	25	1 198	3	15			
FABRICATIONS METALLIQUES	19 752	0	1 541	5 397	11 065	1 749			
CONSTRUCTION DE MACHINES	4 460	0	704	3 136	371	249			
FABRICATIONS ELECTRIQUES	1 286	0	185	1 054	28	19			
TEXTILES, CUR	3 207	0	450	2 215	5	537			
PAPIER, IMPRIMES	3 557	0	662	2 502	0	393			
ALIMENTS, BOISSON, TABAC	8 534	0	473	7 490	96	475			
AUTRES INDUSTRIES MANUFACTURIERES	2 107	0	463	1 304	53	287			
TRANSPORT ROUTE ET RAIL	10 908	0	714	9 769	36	389			
TRANSPORT AIR ET EAU	1 012	0	0	1 012	0	0			
SERVICES	18 338	0	3 151	13 945	507	735			
SOMME INDUSTRIES	110 356	0	13 196	75 151	14 859	7 150			
CONSUMMATION PRIVEE	54 694	0	3 941	39 909	338	10 506			
STOCKS	31 066	22 078	- 469	9701	610	- 854			
EXPORTS	24 007	172	620	21 026	951	1 238			
SOMME DEMANDE FINALE	109 767	22 250	4 092	70 636	18 99	10 890			
TOTAL	258 086	23 888	21 737	164 633	20 274	27 554			

Tableau A.39 Table de dissipation de l'énergie en 10<sup>3</sup> tec.  
France, 1970











## ANNEXE B

### PRÉPARATION DES DONNÉES ÉCONOMIQUES ET ÉNERGÉTIQUES POUR LA SUISSE, 1970

Cette annexe a pour but de proposer des données cohérentes pour estimer les contenus énergétiques en Suisse, en 1970. L'annexe est alors divisée en trois parties :

- préparation des données nécessaires au calcul de tables Entrées-Sorties suisses par la méthodologie "rAs", sur la base des tables Entrées-Sorties des pays des Communautés européennes et du compte de production de la Suisse,
- préparation des données énergétiques nécessaires au calcul des contenus énergétiques en Suisse, suivant 21 secteurs d'activité différents,
- préparation des données nécessaires à la vérification de l'énergie importée de manière indirecte en Suisse, sur la base de la provenance des importations suisses (voir § 4.3).

Il est bien entendu que les chiffres et tableaux présentés ci-après ne sauraient remplacer une collecte complète et sérieuse de données. Il a fallu en effet émettre un certain nombre d'hypothèses à partir des statistiques existantes qui ne sont elles-mêmes pas à l'abri d'erreurs. Néanmoins, ces tableaux ont été construits de manière à ce qu'ils soient cohérents entre eux. Il va de soi que toute nouvelle donnée peut aisément être introduite, pour autant quelle soit compatible avec les autres, sans changer en rien le traitement ultérieur.

## B.1 FORMATION DES VECTEURS DE CONSOMMATION INTERMEDIAIRE ET D'ENTREES INTERMEDIAIRES

### B.1.1 Choix des secteurs suisses

Ces deux vecteurs sont nécessaires pour pouvoir appliquer la méthode de cadrage "rAs". On les déduit des vecteurs de production totale, de demande finale et de valeur ajoutée qu'il faut donc auparavant connaître.

Le Bureau fédéral des statistiques (1977), a publié le compte de production de l'économie suisse pour 1970, désagrégé en 21 secteurs industriels, auxquels il faut ajouter les administrations, les organisations privées sans but lucratif et les services domestiques. Afin de pouvoir exploiter ces données sous la forme des statistiques des Communautés européennes (voir Annexe A), on procédera à une double agrégation portant sur les deux statistiques, de sorte qu'il y ait correspondance entre la nomenclature employée par le compte de production suisse et la NACE-CLIO-R44. Par contre, le compte de production de l'économie suisse ne propose pas une ventilation suffisante des secteurs énergétiques qu'il est impératif d'avoir pour le calcul des contenus énergétiques. On retiendra alors cinq secteurs énergétiques, identiques à ceux de l'Annexe A (houille, coke, produits pétroliers, électricité et gaz, uranium). Finalement, le tableau B.1 indique la correspondance entre les secteurs suisses et la nomenclature NACE-CLIO-R44, reflétant un compromis entre les statistiques disponibles et le traitement ultérieur (méthode "rAs").

### B.1.2 Formation des vecteurs suisses

Un certain nombre d'opérations ont dû être effectuées pour former tous les vecteurs nécessaires suivant la classification des secteurs choisis. Elles font appel à des statistiques disponibles d'origine diverse et à quelques hypothèses. Les résultats se trouvent résumés aux tableaux B.4 et B.5.

Secteurs suisses considérés	Correspondance NACE-CLIO-R44
1. Houille	03
2. Coke	05
3. Produits pétroliers	07
4. Électricité, gaz	09
5. Uranium	11
6. Agriculture	01
7. Produits alimentaires	31, 33, 35, 37, 39
8. Textiles	41
9. Bois, liège	45
10. Papier	47
11. Cuir, plastiques	43, 49
12. Chimie	17
13. Pierre, terre, mines	15
14. Métallurgie	13, 19
15. Machines, véhicules	21, 27, 29
16. Machines électriques	25
17. Horlogerie, bijouterie, autres	23, 51
18. Bâtiment	53
19. Commerces	55, 57
20. Banques	69
21. Transports	61, 63, 65, 67
22. Services divers	59, 71 à 93

Tableau B.1 Secteurs retenus pour la Suisse et correspondance avec la nomenclature NACE - CLIO - R44.  
(voir annexe A, tableau A.27)

- (i) Les valeurs correspondant aux secteurs énergétiques proviennent des tableaux B.12 et B.13 (§ B.2). Elles sont calculées à partir des quantités d'énergie distribuée et des prix de l'énergie.
- (ii) Une ventilation des secteurs "industrie chimique et traitement du pétrole" et "électricité, gaz et eau" que l'on trouve tels quels dans le compte de production suisse a été opérée. En outre, le secteur "électricité" a été traité grâce aux données de la balance suisse des revenus en 1970 (Commission des recherches économiques, 1970) et grâce au rapport no 2 préparé pour la Commission fédérale pour une conception globale de l'énergie (Eidg. Kommission für die G.E.K., 1976).
- (iii) Il faut noter que le secteur "mines" a été englobé avec le secteur "pierre, terre" (qui correspond suivant les positions du tarif douanier aux ouvrages en pierre, céramiques, verres, etc...) pour former le secteur "pierre, terre, mines". Cela n'a pas grande influence sur les valeurs, le secteur "mines" étant en Suisse limité. D'autre part, il a semblé intéressant de dissocier dans le secteur "machines et véhicules" définis dans le compte de production, la part due aux machines électriques qui est un élément important pour les études énergétiques (alternateurs, transformateurs, etc...). Ce secteur existe à part entière dans la nomenclature NACE-CLIO-R44. La ventilation a été faite suivant la structure des exportations suisses.
- (iv) Les statistiques disponibles permettent de scinder la formation de capital fixe en deux parts :
- une part "construction" qui comprend les bâtiments, logements, génie civil, etc...(Bureau fédéral de statistiques, 1967). Cette part sera attribuée aux secteurs "bâtiment" et au secteur "commerces",
  - une part "matériel". Les investissements correspondants ont été alloués suivant l'étude de G. Antille et al. (1971).

- (v) Cette dernière étude comporte en outre de nombreuses données qui concernent la structure des vecteurs de consommation des ménages, de consommation publique, de formation de capital fixe et de variation de stocks. Nous avons repris une bonne part des informations contenues dans ce travail.
- (vi) Afin de ventiler les importations et les exportations suisses en 1970, deux statistiques sont à disposition :
- pour l'énergie et les biens, la statistique du commerce extérieur, publiée par la Direction générale des douanes (1971),
  - pour les services, la balance des revenus élaborée par la Commission de recherches économiques (1971).

Les positions du tarif douanier ne correspondent pas toujours exactement aux secteurs retenus pour cette étude. Le tableau B.2 indique quelles sont les opérations auxquelles il a fallu procéder. D'autre part, une partie du secteur "horlogerie, etc.." (no 17) a été attribuée au secteur "commerces" (no 19); le solde de ce secteur, ainsi que les valeurs des importations et exportations des secteurs "transports" (no 21) et "services divers" (no 22) ont été déterminés grâce à la balance des revenus (tableau B.3).

- (vii) Les statistiques disponibles ne permettent pas de connaître la distribution de ces importations parmi les secteurs économiques. Comme expliqué au § 4.2.2, celle-ci sera estimée grâce à une application de la méthode "rAs" portant sur les matrices intérieures des pays des Communautés européennes.
- (viii) En conclusion, les tableaux B.4 et B.5 résument toutes les remarques précédentes en proposant les vecteurs nécessaires pour la Suisse, en 1970.

Secteurs suisses retenus	Positions du tarif douanier , 1970 (code NIMEXE )
1. Houille	} 27
2. Coke	
3. Produits pétroliers	
4. Électricité , gaz	
5. Uranium	2850 à 52
6. Agriculture	1, 6 , 12 , 13 , 14 , 23
7. Produits alimentaire	2 à 5 , 7 à 11 , 15 à 22 , 24
8. Textiles	50 à 63 , 65 , 66
9. Bois , liège	44 , 45 , 94 , 95
10. Papier	47 à 49
11. Cuir , plastiques	40 à 43 , 46 , 64
12. Chimie	28 sauf 2850 à 52 , 29 à 39
13. Pierre , terre , mines	25 , 68 , 70
14. Métallurgie	26 , 72 à 83
15. Machines , véhicules	84 , 86 à 89 , 93
16. Machines électriques	85
17. Horlogerie , bijouterie , autres	71 , 90 à 92 , 96 à 98
18. Bâtiment	-
19. Commerces	99

Tableau B.2 Correspondance entre les secteurs retenus et les secteurs des statistiques du commerce extérieur, pour l'énergie et les biens.

	Importations	Exportations
19. Commerces	0	230
20. Banques	10	340
21. Transports	232	1 370
22. Services divers	1 668	6 340
<b>Total</b>	<b>1 910</b>	<b>8 280</b>

Tableau B.3 Importations et exportations de services en Suisse, en 10<sup>6</sup> fr, 1970.

	Ventes intermé- diaires	Valeur ajoutée	Importa- tions	Production totale
1. Houille	20	33	60	113
2. Coke	14	53	76	143
3. Produits pétroliers	1 951	873	1 377	4 201
4. Électricité, gaz	581	1 950	120	2 651
5. Uranium	0	0	7	7
6. Agriculture	2 681	4 045	439	7 165
7. Produits alimentaires	8 314	4 330	3 486	16 130
8. Textiles	1 904	2 860	2 411	7 175
9. Bois, liège	1 624	1 975	761	4 360
10. Papier	1 736	2 305	1 004	5 045
11. Cuir, plastiques	216	665	604	1 485
12. Chimie	601	2 961	3 144	6 706
13. Pierre, terre, mines	949	1 450	580	2 979
14. Métallurgie	3 922	5 550	3 788	13 260
15. Machines, véhicules	2 991	6 930	5 859	15 780
16. Machines électriques	666	1 770	1 594	4 030
17. Horlogerie, bijouterie, autres	1 759	2 100	2 156	6 015
18. Bâtiment	5 890	8 160	0	14 050
19. Commerce	6 908	14 765	527	22 200
20. Banques	1 165	4 215	10	5 390
21. Transports	5 433	5 975	232	11 640
22. Services divers	11 285	17 700	3 015	32 000
<b>Total</b>	<b>91 860</b>	<b>90 665</b>	<b>31 250</b>	<b>182 525</b>

Tableau B.4 Ventilation des ventes intermédiaires, de la valeur ajoutée, des importations et de la production totale pour la Suisse, en 10<sup>6</sup> fr, 1970.

	Consom- mation intermédi	Consommation		Formation de capital fixe	Variation de stocks	Exporta- tions	Demande finale
		des ménages	publique				
1. Houille	21	88	0	0	0	4	92
2. Coke	29	111	0	0	0	3	114
3. Produits pétroliers	1 920	2 118	48	0	86	29	2 281
4. Électricité, gaz	1 396	702	203	0	0	350	1 255
5. Uranium	7	0	0	0	0	0	0
6. Agriculture	3 164	3 923	37	0	0	41	4 001
7. Produits alimentaires	2 117	12 507	95	0	0	1 411	14 013
8. Textiles	2 033	3 083	87	36	0	1 936	5 142
9. Bois, liège	3 260	679	35	243	0	143	1 100
10. Papier	3 442	1 017	161	5	0	420	1 603
11. Cuir, plastiques	363	750	29	0	0	343	1 122
12. Chimie	1 277	474	140	0	0	4 815	5 429
13. Pierre, terre, mines	2 280	413	46	84	0	156	699
14. Métallurgie	7 185	1 495	286	1 221	1 720	1 353	6 075
15. Machines, véhicules	1 209	1 871	358	4 925	1 961	5 456	14 571
16. Machines électriques	285	479	91	1 258	523	1 394	3 745
17. Horlogerie, bijouterie, autres	301	518	48	512	0	4 636	5 714
18. Bâtiment	1 802	70	510	11 668	0	0	12 248
19. Commerce	11 298	5 658	73	4 941	0	230	10 902
20. Banques	3 838	1 150	62	0	0	340	1 552
21. Transports	7 933	2 121	154	62	0	1 370	3 707
22. Services divers	5 450	14 098	7 172	0	0	5 280	26 550
<b>Total</b>	<b>60 610</b>	<b>53 325</b>	<b>9 635</b>	<b>24 955</b>	<b>4 290</b>	<b>29 710</b>	<b>121 915</b>

Tableau B.5 Ventilation de la consommation intermédiaire et de la demande finale pour la Suisse, en 10<sup>6</sup> fr, 1970.



## B.2 LA CONSOMMATION D'ENERGIE DISTRIBUEE EN SUISSE, 1970

La connaissance de la structure énergétique d'un pays est importante pour estimer les points faibles de l'approvisionnement, de la transformation ou de la consommation d'énergie. Généralement, les fournitures d'énergie sont assez bien connues du fait des organes de contrôle qui existent à l'importation et à la production des agents. Il n'en est pas toujours de même à la consommation. L'insuffisance des moyens ne permet pas en Suisse de préciser quelles quantités d'énergie les grands groupes de consommateurs achètent pour satisfaire leurs besoins et leur production<sup>1/</sup>. C'est sur la base d'études antérieures que seront supputées les demandes d'énergie en 1970, par secteur industriel ou groupe de consommateurs.

### B.2.1 La consommation d'énergie par groupe de consommateurs

#### (i) Energie distribuée

Les statistiques publiées par l'Office fédéral de l'économie énergétique (1976), sont récapitulées au tableau B.6.

Agents Groupes	Combustibles liquides	Carburants liquides	Électricité	Gaz	Charbon	Bois	Total
Usages domestiques agriculture, artisa- nat, services	210 116	6 662	45 241	5 872	18 517	10 111	296 519
Industrie	106 397	—	36 734	1 486	5 296	—	150 543
Transport	—	131 398	7 222	—	—	—	138 620
Total	316 513	138 060	89 197	7 358	24 443	10 111	585 682

Tableau B.6 Énergie distribuée en Suisse, en TJ, 1970.

<sup>1/</sup> au moment où nous écrivons ces lignes, un rapport de l'Union suisse des consommateurs d'énergie de l'industrie et des autres branches économiques (1980) vient d'être publié. Il fait la synthèse de la consommation d'énergie pour quelques branches économiques et quelques industries pour les années 1978 et 1979. Les saisies de données au niveau énergétique semblent donc prendre de l'ampleur. Il en faudrait autant pour les données économiques.

(ii) Ventilation du secteur "usages domestiques, agriculture, artisanat, services"

- Pour l'électricité, ce secteur peut être approximativement ventilé par sous-groupe (Association suisse des électriciens, 1971) :

Ménages	Exploitations agricoles	Éclairage public	Exploitations artisanales	Total
21 157	1 440	929	21 715	45 241

Tableau B.7 Énergie électrique distribuée dans les ménages, l'artisanat et l'agriculture, en TJ, 1970.

- La part des produits pétroliers utilisée à des fins de transport peut être estimée à partir du rapport de la Conception Globale Suisse des Transports (1977) dans lequel les consommations spécifiques des véhicules routiers et des trains sont données pour les trafics voyageurs et marchandises, publics et privés, pour 1974. En gardant les mêmes proportions, les trafics privés (ménages) peuvent être séparés des transports commerciaux (tableau B.8).

	Transports routiers ménages	Transports routiers commerciaux	Total route	Transports air et eau	Total
1970	84 830	34 550	119 380	19 240	138 620
1974	95 500	38 900	134 400	21 661	156 061

Tableau B.8 Carburants liquides et électricité utilisés pour les transports à des fins privées ou commerciales, en TJ, 1970.

Les transports par air et eau sont supposés être entièrement faits par des entreprises commerciales, dont la consommation d'énergie est alors de 53 790 TJ en 1970.

- Il n'existe pas d'autres statistiques permettant cette ventilation pour les autres agents énergétiques. C'est donc à partir de proportions entre agents et entre personnes employées qu'elle s'effectuera par la suite.

(iii) Consommation dans le primaire et le secondaire (agriculture et industrie)

Les secteurs choisis, dans un premier temps, sont ceux de la comptabilité nationale suisse, correspondant au compte de production cité plus haut. La répartition de l'électricité entre consommateurs industriels est donnée par l'Office fédéral de l'économie énergétique (1974). Pour les autres agents énergétiques, les références GEK (1976) et (1977), Verein Industrieller Brennstoffverbraucher (1976), et IEA (1978), comportent de précieux renseignements, quoiqu'incomplets et pas toujours compatibles entre eux. Les résultats figurent au tableau B.9. Le secteur "bois, liège" ne comprend bien sûr pas le bois en tant que combustible mais comme matériau. Le secteur "électricité" contient l'éclairage public. Les pertes dues aux transformations ne sont pas indiquées et seront analysées au § B.2.2. Finalement, les produits pétroliers à des fins non énergétiques ne sont pas considérés dans ce tableau. La consommation en produits pétroliers du secteur "chimie" en particulier est donc fortement sous-estimée.

(iv) Consommation dans le secteur tertiaire (services)

Le secteur tertiaire comprend les commerces, services, transports à des fins commerciales, etc... La consommation en électricité et en produits pétroliers de ces branches est basée sur l'étude GEK (1977), p. 390. On a fait l'hypothèse que ni charbon, ni gaz, ni bois ne sont demandés par le tertiaire.

	Charbon	Gaz	Produits pétroliers	Électricité	Bois	Total	Employés 1975
1. Agriculture	0	0	4 416	1 440	—	5 856	168 046
2. Mines	0	0	334	0	0	334	5 952
3. Alimentation	17	138	7 954	2 156	0	10 265	108 854
4. Textiles	35	9	7 894	3 060	0	10 998	89 660
5. Bois, liège	0	0	7 176	439	0	7 615	64 319
6. Papier	898	2	11 901	3 845	0	16 646	69 424
7. Cuir, caoutchouc	0	0	956	490	0	1 446	22 079
8. Chimie	1 728	866	18 540	6 890	0	28 024	69 697
9. Pierre, terre	570	206	17 317	3 254	0	21 347	26 216
10. Métal	52	27	17 286	11 632	0	28 997	175 983
11. Machines	2 626	238	9 352	3 917	0	16 133	254 215
12. Horlogerie, autres	0	0	2 253	432	0	2 685	61 058
13. Bâtiment	0	0	5 768	619	0	6 387	225 503
14. Électricité	0	0	0	929	0	929	28 450
15. Commerces	0	0	14 962	6 066	0	21 028	349 135
16. Banques	0	0	3 539	1 739	0	5 278	105 106
17. Transports	0	0	46 568	7 222	0	53 790	171 081
18. Hôtels	0	0	5 863	2 608	0	8 471	158 500
19. Hygiène	0	0	5 863	2 608	0	8 471	116 678
20. Divers	0	0	22 139	8 694	0	30 833	414 681
21. Location	0	0	0	0	0	0	8 939
<b>Total primaire, secondaire et tertiaire</b>	<b>5 926</b>	<b>1 486</b>	<b>210 081</b>	<b>68 040</b>	<b>0</b>	<b>285 533</b>	
<b>Ménages : transports</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>84 830</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>84 830</b>	
<b>autres</b>	<b>18 517</b>	<b>5 872</b>	<b>159 662</b>	<b>21 157</b>	<b>10 111</b>	<b>215 319</b>	
<b>Total ménages</b>	<b>18 517</b>	<b>5 872</b>	<b>244 492</b>	<b>21 157</b>	<b>10 111</b>	<b>300 149</b>	
<b>Total</b>	<b>24 443</b>	<b>7 358</b>	<b>454 573</b>	<b>89 197</b>	<b>10 111</b>	<b>585 682</b>	

Tableau B.9 Ventilation de l'énergie distribuée en Suisse, en TJ, 1970 et nombre d'employés suivant les secteurs du compte de production, 1975.

(v) Récapitulation

Le tableau B.9 indique les destinations finales des agents énergétiques. Les quantités utilisées par les ménages sont déduites par différence entre la consommation totale et la somme de la consommation du primaire, du secondaire et du tertiaire.

Le tableau B.10 indique les proportions d'énergie distribuée suivant les groupes de consommateurs.

	Énergie distribuée (TJ)	en % du total
Agriculture	6 190	1,1
Industrie (y.c. électricité)	151 472	25,9
Services dont transport	127 871 (53 790)	21,8 (9,2)
Ménages dont transport	300 149 (84 830)	51,2 (14,5)
Total	585 682	100,0

Tableau B.10 Répartition de l'énergie distribuée en TJ et en % du total, 1970.

Les plus gros consommateurs industriels sont l'industrie métallurgique et la chimie (tableau B.11).

	Énergie distribuée TJ	en % du total
Industrie métallurgique	28 997	19,3
Chimie	28 024	18,6
Pierre , terre , mines	21 347	14,2
Papier	16 646	11,0
Machines	16 133	10,7
Textiles	10 998	7,3
Alimentation	10 265	6,8
Bois , liège	7 615	5,1
Bâtiment	6 387	4,2
Horlogerie , autres	2 685	1,8
Cuir , caoutchouc	1 446	1,0
<b>Total</b>	<b>150 543</b>	<b>100,0</b>

Tableau B.11 Classement de la consommation d'énergie par secteur industriel , en TJ et en % du total, 1970.

(vi) Contrôle

Il est bon de contrôler si les hypothèses qui ont conduit à déterminer la consommation des ménages – c'est-à-dire en les séparant du primaire et du tertiaire – sont justifiées. Une approche possible est de vérifier que les ménages ont bien pu acheter, en 1970, une quantité globale d'énergie de 300 149 TJ. Pour cela, il faut considérer les prix de l'énergie, différents pour chaque agent, afin de trouver la valeur globale de l'énergie achetée. L'indice des prix de l'énergie ainsi que les prix pour les ménages est donné par la GEK (1976), et

la commission pour les tarifs d'énergie électrique (1975) pour l'électricité.

Le tableau B.12 les indique pour 1970.

	Indice des prix de l'énergie (ménages) (base 100 = 1950)		Prix de l'énergie fr/GJ	
	1970	1974	1970	1974
Huiles de chauffage	76	163	4,14	8,87
Essence	97	150	17,17	26,55
Gaz	129	157	16,09	19,58
Charbon	204	283	9,16	12,71
Bois	204	283	2,90	4,02
Électricité	112	132	28,76	33,89

Tableau B.12 Prix de l'énergie, 1970 et 1974.

Les achats d'énergie par les ménages se montent donc à  $3019 \cdot 10^6$  Fr (tableau B.13).

	Quantité d'énergie TJ	en %	Valeur Mfr	en %
Huiles de chauffage	159 662	53,2	661	21,9
Essence	84 830	28,3	1 457	48,3
Gaz	5 872	2,0	94	3,1
Charbon	18 517	6,2	170	5,6
Bois	10 111	3,4	29	1,0
Électricité	21 157	6,9	608	20,1
Total	300 149	100,0	3 019	100,0

Tableau B.13 Achats d'énergie par les consommateurs, 1970.

Les dépenses des ménages en biens et services en 1970 se chiffrent à 53 325 MFr (Bureau fédéral de statistique, 1978) dont :

- 2515 MFr pour le poste "chauffage et éclairage"
- 5850 MFr pour le poste "transports et communications".

La part des dépenses attribuée à l'énergie est donc de 5,7 % du total. L'essence représente 25 % des dépenses de transport et les autres agents 62 % du chauffage et de l'éclairage. Ces chiffres rejoignent ceux de la GEK (1976). Il faut, de plus, noter que l'énergie ne grève pas plus le budget des consommateurs en 1974 qu'en 1970. Il y a eu substitution du pétrole par l'électricité, dont les prix n'ont que très peu varié dans l'intervalle, proportionnellement aux prix du pétrole (9,8 % d'électricité en volume représentant 18,2 % en valeur pour 1974, contre 6,9 % en volume représentant 20,1 % en valeur pour 1970). Toutefois, il doit être clair que ces chiffres sont des moyennes, valables pour l'ensemble des consommateurs.

#### B.2.2 La table de dissipation de l'énergie en Suisse, 1970

Les secteurs du tableau B.9 ne correspondent pas avec ceux du tableau B.4. Aussi, outre une agrégation nécessaire entre quelques secteurs (services notamment), l'étude des transformations énergétiques doit être entreprise pour construire la table de dissipation de l'énergie dans les divers secteurs suisses. A partir des statistiques de l'UCS et un développement comparable à celui qui est exposé dans l'Annexe A, le tableau B.14 récapitule où ont lieu les pertes énergétiques, pour quatre secteurs d'agents énergétiques : charbon, coke, produits pétroliers, électricité et gaz. Les remarques suivantes peuvent être faites :

- la consommation de produits pétroliers dans les secteurs définis au § A.3.2 a été augmentée pour tenir compte des produits énergétiques utilisés à des fins non énergétiques;
- on n'a pas considéré de consommation d'énergie (électricité auxiliaire) dans le secteur "uranium";



	Charbon	Coke	Produits pétroliers	Électricité gaz	Total
1. Houilles	0	0	0	0	0
2. Coke	1 172	335	0	0	1 507
3. Produits pétroliers	0	0	10 580	16	10 596
4. Électricité , gaz	0	1 283	8 006	15 620	24 909
5. Uranium	0	0	0	0	0
<b>Pertes dans les secteurs énergétiques</b>	<b>1 172</b>	<b>1 618</b>	<b>18 586</b>	<b>15 636</b>	<b>37 012</b>
6. Agriculture	0	0	4 416	1 440	5 856
7. Alimentation	10	145	7 954	2 156	10 265
8. Textiles	20	24	8 633	3 060	11 737
9. Bois , liège	0	0	7 176	439	7 615
10. Papier	512	388	11 901	3 845	16 646
11. Cuir , plastiques	0	0	956	490	1 446
12. Chimie	984	1 610	37 022	6 890	46 506
13. Pierre , terre , mines	325	451	17 651	3 254	21 681
14. Métallurgie	30	49	19 134	11 632	30 845
15. Machines , véhicules	1 192	1 090	9 297	3 120	14 699
16. Machines électriques	304	278	3 012	797	4 391
17. Horlogerie , autres	0	0	2 253	432	2 685
18. Bâtiment	0	0	9 464	619	10 083
19 Commerce	0	0	14 962	6 066	21 028
20 Banques	0	0	3 539	1 739	5 278
21 Transports	0	0	48 416	7 222	55 638
22 Services divers	0	0	35 713	13 910	49 623
<b>Pertes à la consommation intermédiaire</b>	<b>3 376</b>	<b>4 036</b>	<b>241 499</b>	<b>6 711</b>	<b>316 022</b>
Demande des ménages	10 547	7 970	250 038	27 029	295 584
Variations de stocks	-7 008	+ 117	+33 270	+ 359	+26 738
Exportations	1 025	850	11 208	34 628	47 711
<b>Total</b>	<b>4 564</b>	<b>8 937</b>	<b>294 516</b>	<b>62 016</b>	<b>370 033</b>
<b>Somme des pertes</b>	<b>9 112</b>	<b>14 591</b>	<b>554 601</b>	<b>144 763</b>	<b>723 067</b>

Tableau B.14 Dissipation de l'énergie en Suisse , en TJ , 1970 .

- les variations de stocks ont été estimées à partir des données énergétiques existantes et de données en valeur (en particulier rapport de l'Union Pétrolière, 1970);
  
- finalement, la consommation globale d'énergie brute est de 723 067 TJ, supérieure aux 690 825 TJ donnés par les statistiques de l'UCS. Cette différence est due aux produits utilisés à des fins non énergétiques et au rendement de 0,8 considéré pour les centrales hydro-électriques. Les pertes de transformation dans les secteurs énergétiques sont alors estimées à 37 012 TJ.

### B.3 LA STRUCTURE DES IMPORTATIONS SUISSES, 1970

La structure des importations a déjà été étudiée au § B.1 mais dans le cadre des secteurs retenus pour la Suisse. Ce paragraphe reprend plus en détail la structure des importations pour deux raisons :

- suivant la situation économique et la structure de son appareil de production, chaque pays donne à ses exportations un poids différent. Ainsi, il n'est pas identique d'exporter des machines ou de l'énergie vers des pays tiers puisque l'incidence de la composition des exportations influe sur chaque secteur économique par le biais des consommations intermédiaires. De la même manière, la composition des importations aura une incidence sur l'économie du pays;
- il s'ensuit, puisque chaque bien a un certain contenu énergétique, que, outre l'aspect économique, il y a un aspect énergétique : un pays, tel que la Suisse, peut importer beaucoup d'énergie contenue dans les biens et exporter des produits à plus faible contenu. Cela se manifeste par une balance énergétique excédentaire.

Ces aspects nous semblent très importants. Aussi, connaissant les contenus énergétiques des produits importés par la Suisse, il est possible de déterminer l'énergie indirecte importée totale. Les importations suisses doivent donc être ventilées par pays exportateur et par secteur d'activité, pour chacun desquels les contenus énergétiques sont connus. Nous nous limiterons ici aux pays des Communautés européennes qui fournissent une large part des importations suisses et dont nous avons calculé les contenus énergétiques pour un certain nombre de secteurs. Il faut alors ventiler les importations suisses suivant les secteurs d'activité retenus à l'annexe A (tableau A.29).

La comparaison des résultats obtenus d'une part par le calcul matriciel, à l'aide des tables Entrées-Sorties, et d'autre part par les contenus énergétiques des pays commerçant avec la Suisse, permettent ainsi d'estimer l'énergie totale indirecte importée en Suisse.

B.3.1 Provenance des importations suisses, 1970

A partir des statistiques des douanes, les importations de biens et d'énergie en Suisse peuvent être ventilées par pays exportateur. Le tableau B.15 indique les principaux pays et communautés avec lesquels la Suisse a des échanges importants. Les importations proviennent donc à plus de 90 % des pays industrialisés, à 81 % de l'Europe et à 58 % de l'Europe des Six. Ce sont les importations en provenance de la R.F.A. qui sont prépondérantes. Par la suite, les exportations vers la Suisse des pays suivants seront ventilées par secteur : R.F.A., France, Italie, Belgique et Luxembourg, Royaume-Uni ainsi que pour le monde. Ces six pays fournissent 63 % des importations suisses.

	en Mfr	en %
R.F.A.	8 349	30
FRANCE	3 362	12
ITALIE	2 623	9
BELGIQUE-LUX.	987	4
PAYS-BAS	964	3
EUROPE DES SIX	16 285	58
ROYAUME-UNI	2 167	8
AUTRICHE	1 251	4
E.F.T.A.	5 084	18
EUROPE	22 474	81
AFRIQUE	813	3
ASIE	1 322	5
AMÉRIQUE (dont USA)	3 206 (2372)	11 (9)
AUSTRALIE	58	0
TOTAL MONDE	27 873	100

Tableau B.15 Répartition par pays des importations de biens et d'énergie de la Suisse, en Mfr et en % du total, 1970.

### B.3.2 Les importations de biens

Les secteurs d'activité sont dressés au tableau B.29. On rappelle qu'ils sont basés sur la base de la nomenclature NACE-CLIO-R44 des Communautés européennes (1976<sup>b</sup>)(Annexe C).

Les importations de biens et d'énergie par pays sont indiquées par les douanes suivant la nomenclature NIMEXE (employée dans le tableau B.2). Celle-ci est aussi employée par les Communautés européennes ce qui facilite les correspondances. Le passage de la NIMEXE à la NACE-CLIO-R44 se trouve dans la nomenclature commune des produits industriels NIPRO (Communautés européennes, 1975) et la correspondance avec les secteurs industriels du tableau A.27 se trouve au tableau B.16.

NUMÉRO DES SECTEURS	Code NIMEXE (2 ou 4 digits)
1	26, 7301-02-04 à 16-18-25 à 27-61 à 76, 7401 à 07-10, 7501 à 05, 7601 à 03-12, 7701-02-04, 7801 à 07, 7901 à 04, 8001 à 05, 81,
2	25, 68 à 70, 8526,
3	1505-06-08 à 11, 2208, 28 à 38, 4002, 5101 à 02, 5601 à 03,
5	7317-19 à 24-28 à 40, 7408-09-11 à 19, 7506, 7607 à 11-13 à 16, 7703, 7806, 7905-06, 8006, 8201, 8203-04-07 à 15, 8301 à 06-08 à 15, 8401-02, 8608, 9301-02-04 à 07, 9401,
6	8202-05-06, 8403-04-05-06 à 65, 8601 à 07-09 à 10, 87, 8801 à 03-05, 8901 à 03-05, 9001 à 10-12 à 16-18-19-21 à 27-29, 91, 9303, 9402-03,
7	8307, 8501 à 25-27-28, 9011-17-20-28, 9211 à 13,
8	41 à 43 sauf 4301, 50 à 67, sauf 5101-02, 5601 à 03, 8804,
9	47 à 49, 7604 à 06, 8004,
10	01 à 24, 4001, 4301 sauf 1505-06-08 à 11, 2208,
11	39, 40, 44 à 46, 71, 72 sauf 4001-02, 9201 à 10, 9404, 95, 96, 97, 98,
14	7303, 8904, 99

Tableau B.16 Correspondance entre les secteurs industriels (voir tableau A.29) et le code NIMEXE à 4 digits pour les importations par pays de la Suisse, 1970.

Trois remarques sont à faire :

- Le secteur 4 "construction, génie civil" a été éliminé puisque c'est plutôt une activité.
- Le secteur 14 "services" bien que n'étant pas industriel comprend les "objets d'art et d'antiquité" (code 99), correspondant au commercial.
- Les codes NIMEXE sont à deux digits ou quatre s'ils sont à cheval sur plusieurs secteurs. Le code à six digits n'a pas été retenu pour des raisons de simplification de calculs. Cependant les divergences sont très faibles, les sous-classes à six digits étant généralement comprises dans les secteurs correspondants des classes à quatre digits.

Pour les importations totales de la Suisse (Monde), c'est la nomenclature NIMEXE à deux digits qui a été retenue pour des raisons de simplification (avec quatre digits, il aurait fallu une ventilation pour chaque pays exportateur suivant les principes ci-dessus). Des proportions sur les activités prépondérantes permettent de séparer ces activités entre les secteurs retenus (tableau B.17).

NUMÉRO DES SECTEURS	Code NIMEXE ( 2 digits)
1	26.73(81%),74(94%),75(96%),76(68%),77,78(97%),79,80,81
2	25, 68 à 70
3	28 à 38
5	73(19%),74(6%),75(4%),76(32%),78(3%),82(58%),83,93
6	82(42%),84,86,87,88,89,90(56%),91,94
7	85,90(44%)
8	41 à 43, 50 à 67
9	47 à 49
10	01 à 24
11	39,40,44 à 46,71,72,92,95 à 98
14	99

Tableau B.17 Correspondance entre les secteurs industriels (voir tableau A.29), et le code NIMEXE à 2 digits pour les importations totales de la Suisse , 1970.

### B.3.3 Les importations de services

La balance des revenus de 1970 indique les mouvements d'affaires (biens et services) avec l'étranger. Les dépenses en biens et services sont dressées au tableau B.18 :

1. Commerce extérieur	
1.1. Commerce spécial	27 870
1.2. Autres postes	550
2. Énergie électrique	120
3. Tourisme	1 840
4. Assurances privées	10
5. Opérations et commerce en transit	—
6. Transport de marchandises	60
7. Postes et télécommunications	220
8. Revenu du travail des frontaliers étrangers	1 030
9. Autres services	760
10. Revenus de capitaux	400
Total	32 860 <sup>1)</sup>

Tableau B.18 Dépenses en biens et services de la Suisse suivant les postes, en 10<sup>6</sup> fr., 1970.

---

1/ il y a une différence avec la valeur indiquée au tableau B.4, les statistiques du compte de production, des douanes et la balance des revenus ne donnant par les mêmes résultats. Toutefois, cet écart est faible (5 %). D'autre part, la différence avec le total du tableau B.20 provient de secteurs énergétiques non considérés dans la suite.



Ces valeurs restent à agréger suivant les secteurs "transport par route et rail" (no 12), "transport par air et eau" (no 13), "services" (no 14).

La procédure d'agrégation est la suivante :

- Le poste 1.2 est ventilé à raison de 20 % pour le secteur 12 et 80 % pour le secteur 14.
- Le poste 2 est considéré comme secteur énergétique.
- Le poste 3 (dépenses et tourisme) est diminué des dépenses à l'étranger des résidents (1530 MFr) et ventilé à raison de 20 % pour le secteur 12 et 80 % pour le secteur 14.
- Le poste 6 est ventilé à raison de 90 % pour le secteur 12 et 10 % pour le secteur 13.

B.3.4 Récapitulation

La provenance des importations de services n'est pas connue. Aussi ce sont dans les mêmes proportions de provenance des importations de biens que cette répartition sera effectuée. Le tableau B.19 résume les importations de biens et services en Suisse, pour l'année 1970, pour quelques pays exportateurs et le monde.

NUMÉRO DES SECTEURS	R. F. A.	FRANCE	ITALIE	BELGIQUE + LUXEMBOURG	ROYAUME UNI	MONDE
1	847	399	153	340	263	2 860
2	209	82	88	41	38	579
3	873	387	158	89	358	2 412
4	0	0	0	0	0	0
5	461	78	111	14	67	903
6	2 756	680	650	128	581	6 748
7	957	117	105	70	145	1 883
8	611	349	368	85	336	3 102
9	273	110	47	19	43	1 005
10	208	598	495	43	82	3 905
11	772	306	213	107	219	2 840
12	68	27	20	9	18	226
13	2	1	1	0	0	6
14	524	236	155	67	159	1 801
TOTAL	8 561	3 370	2 564	1 012	2 309	28 270

Tableau B.19 Importations suisses de biens et services (sans l'énergie),  
en 10<sup>6</sup> fr, 1970.  
(définition des secteurs au tableau A.29)

## ANNEXE C

### NOMENCLATURE ET CORRESPONDANCE DES GROUPES NACE-CLIO ET NACE-CLIO-R44

Cette annexe, tirée de OSCE (1976<sup>b</sup>) montre la correspondance entre les groupes NACE-CLIO et les branches NACE-CLIO-R44, ces dernières étant utilisées pour les analyses Entrées - Sorties de cette étude.

NACE-CLIO (R 44) Branches	NACE-CLIO Groupes	Libellé
		<b>Biens</b>
01		<i>Produits de l'agriculture, de la sylviculture et de la pêche</i>
	011	Produits végétaux de l'agriculture et de la cueillette forestière
	012	Vin
	013	Huile d'olive non raffinée
	014	Produits animaux de l'agriculture et de la chasse
	019	Produits agricoles exclusivement importés
	020	Produits de la sylviculture
	030	Produits de la pêche
03		<i>Houille, lignite, agglomérés et briquettes</i>
	111	Houille et agglomérés de houille
	112	Lignite et briquettes de lignite
05	120	<i>Produits de la cokéfaction</i>
07		<i>Pétrole brut, gaz naturel, produits pétroliers</i>
	130	Pétrole brut, gaz naturel, schistes bitumineux
	140	Produits pétroliers raffinés
09		<i>Énergie électrique, gaz, vapeur et eau</i>
	161	Énergie électrique
	162	Gaz distribué
	163	Vapeur, eau chaude, air comprimé
	170	Eau (captage, épuration, distribution)
11		<i>Minerais et produits de la transformation des matières fissiles et fertiles</i>
	151	Minerais contenant des matières fissiles et fertiles
	152	Produits de la transformation des matières fissiles et fertiles
13		<i>Minerais et métaux ferreux et non ferreux autres que fertiles et fissiles</i>
	211	Minerais de fer
	212	Minerais de métaux non ferreux (autres que fertiles et fissiles)

NACE-CLIO (R 44) Branches	NACE-CLIO Groupes	Libellé	
15	221	Fonte, acier brut, laminés à chaud, tôles laminées à froid, tôles revêtues (produits CECA)	
	222	Tubes d'acier	
	223	Tréfilés, étirés, laminés de feuillards, profilés à froid de l'acier	
	224	Métaux non ferreux	
			<i>Minéraux et produits à base de minéraux non métalliques</i>
	231	Matériaux de construction et terres à feu	
	232	Sels de potasse et de phosphates naturels	
	233	Sel gemme, sel marin	
	239	Autres minéraux, tourbe	
	241	Matériaux de construction en terre cuite	
17	242	Ciment, chaux, plâtre	
	243	Matériaux de construction et de travaux publics en béton, ciment ou plâtre	
	244	Articles en amiante (à l'exclusion des articles en amiante-ciment)	
	245	Pierres et produits minéraux non métalliques	
	246	Meules et autres produits abrasifs appliqués	
	247	Verre (plat, creux, technique, fibres de verre)	
	248	Produits céramiques	
			<i>Produits chimiques</i>
	252	Produits de la pétrochimie et de la carbochimie	
	253	Autres produits chimiques de base	
255	Enduits, peinture, vernis et encres d'imprimerie		
256	Autres produits chimiques principalement destinés à l'industrie et à l'agriculture		
257	Produits pharmaceutiques		
258	Savons, détergents synthétiques, autres produits d'hygiène corporelle, parfums		
259	Autres produits chimiques principalement destinés à la consommation domestique et à l'administration		
260	Fibres artificielles et synthétiques		
19		<i>Produits en métaux à l'exclusion des machines et du matériel de transport</i>	
	311	Produits en fonte	
	312	Produits en métaux, forgés, estampés, emboutis, découpés, repoussés	
	313	Produits de seconde transformation des métaux	
	314	Produits de la construction métallique	
	315	Produits de la chaudronnerie	
	316	Outils et articles finis en métaux, à l'exclusion du matériel électrique	
21		<i>Machines agricoles et industrielles</i>	
	321	Machines et tracteurs agricoles	
	322	Machines-outils pour le travail des métaux, outillages et outils pour machines	
	323	Machines textiles et leurs accessoires, machines à coudre	
	324	Machines et appareils pour les industries alimentaires et chimiques, machines de conditionnement et d'emballage, machines pour le travail du caoutchouc et des matières plastiques	
	325	Matériel de mines, machines et matériel pour la métallurgie, la préparation de matériaux de construction, le bâtiment, le génie civil, le lavage, la manutention	
	326	Engrenages et autres organes de transmission, roulements	
	327	Machines pour le travail : du bois, du papier, du cuir, de la chaussure, matériel de blanchisserie et de nettoyage à sec	
	328	Autres machines et matériel mécanique	
	23		<i>Machines de bureau, machines pour le traitement de l'information, instruments de précision, d'optique et similaires</i>
330		Machines de bureau, machines pour le traitement de l'information	
371		Instruments de précision, appareils de mesure et de contrôle	
372		Matériel médico-chirurgical, appareils orthopédiques	
373		Instruments d'optique, matériel photographique	
374		Montres, horloges	
25		<i>Matériel et fournitures électriques</i>	
	341	Fils et câbles électriques	
	342	Matériel électrique d'équipement	
	343	Matériel électrique d'utilisation, piles et accumulateurs	
	344	Matériel de télécommunication, compteurs, appareils de mesure, matériel électromédical	
	345	Appareils électroniques, de radio, de télévision, électro-acoustiques, disques et bandes magnétiques enregistrés	
	346	Appareils électrodomestiques	
	347	Lampes, matériel d'éclairage	

NACE-CLIO (R 44) Branches	NACE-CLIO Groupes	Libellé
27	351 352 353	<i>Véhicules et moteurs automobiles</i> Véhicules automobiles et moteurs automobiles Carrosseries, remorques et bennes Équipement, accessoires et pièces détachées pour automobiles
29	361 362 363 364 365	<i>Moyens de transport autres que véhicules automobiles</i> Bateaux, paquebots, bâtiments de guerre, remorqueurs, engins flottants, matériaux résultant du dépeçage de bateaux Locomotives, autorails, automotrices, tramways, wagons et autre matériel ferroviaire tracté Cycles, motocycles, fauteuils d'invalides Avions, hélicoptères, hovercraft, missiles, véhicules spatiaux et autres engins aéronautiques Voitures d'enfants et de malades, véhicules à traction animale
31	412	<i>Viandes, préparation et conserves de viande, autres produits de l'abattage</i>
33	413	<i>Lait et produits laitiers</i>
35	411 414 415 416 417 418 419 420 421 422 423	<i>Autres produits alimentaires</i> Corps gras végétaux et animaux Conserves et jus de fruits et légumes Conserves de poissons et autres produits de la mer, pour l'alimentation humaine Farines, gruaux, semoules, flocons de céréales Pâtes alimentaires Produits amylacés Pains, biscottes, biscuits, produits de la pâtisserie Sucre Produits à base de cacao, sucreries, glaces de consommation Produits pour l'alimentation des animaux Autres produits alimentaires
37	424 425 426 427 428	<i>Boissons</i> Alcool éthylique de fermentation de produits végétaux et produits à base de cet alcool Champagne, vins mousseux, apéritifs à base de vin Cidre, poiré, hydromel Malt, bières, levure de brasserie Eaux minérales, boissons non alcooliques n.d.a.
39	429	<i>Produits à base de tabacs</i>
41	431* 432* 436 438 439 453* 455 456	<i>Produits textiles, habillement</i> Fibres textiles préparées, produits de filature, filterie, pelotonnage Tissus, velours Produits de la bonneterie Tapis, tissus enduits, toiles cirées, linoleums Autres produits textiles Articles d'habillement et accessoires d'habillement Linge de maison, articles de literie, d'ameublement, tentes, bâches, voiles, drapeaux, sacs Articles en fourrure
43	441 442 451*	<i>Cuir, articles en cuir et en peau, chaussures</i> Cuir, peaux, pelleteries tannées et autrement préparées Articles en cuir et en peau Chaussures, pantoufles, en cuir ou partiellement en cuir
45	461 462 463 464 465 466 467	<i>Bois et meubles en bois</i> Bois sciés, rabotés, séchés, étuvés Bois plaqués, contreplaqués, panneaux de fibres et de particules, bois améliorés, bois traités Charpentes en bois, constructions en bois, ouvrages de menuiserie de bâtiments, parquets Emballages en bois Articles en bois (autres que meubles), farine et laine de bois Articles en liège, rotin, vannerie (autres que meubles), brosses, balais, pinceaux Meubles en bois, en rotin, matelas
47	471 472 473 474	<i>Papier, articles en papier, articles imprimés</i> Pâtes, papier, carton Articles en pâtes, papiers, cartons Produits de l'imprimerie Produits de l'édition

NACE-CLIO (R 44) Branches	NACE-CLIO Groupes	Libellé
49	481 482 483	<i>Produits en caoutchouc et en plastique</i> Articles en caoutchouc Pneumatiques rechapés Articles en matières plastiques
51	491 492 493 494 495	<i>Produits des autres industries manufacturières</i> Bijoux précieux et de fantaisie, produits d'orfèvrerie, lapidairerie, diamants taillés, monnaies, médailles Instruments de musique Produits du tirage de films cinématographiques et photographiques Jeux, jouets, articles de sport Porte-plumes, stylos, tampons, cachets, autres produits n.d.a.
53	505 506 507 509	<i>Bâtiments et ouvrages de génie civil</i> Logements Bâtiments non résidentiels Ouvrages de génie civil Travaux de démolition d'immeubles
<i>Services marchands</i>		
55	620 671 672*	<i>Récupération et réparation</i> Ferrailles, vieux métaux, vieux papiers, chiffons, autres produits de récupération et de démolition Réparation de véhicules à moteurs et bicyclettes Réparation de chaussures, articles en cuir, appareils électroménagers, montres, bijouterie, etc.
57	610 630 640	<i>Services de commerce</i> Services du commerce de gros Services des intermédiaires du commerce Services du commerce de détail
59	660	<i>Services de restauration et hébergement</i>
61	710 721 722 723 724 725 730	<i>Services de transport intérieur</i> Services de transport par chemin de fer et services annexes Services de transport par chemin de fer métropolitain, tramway, autobus réguliers Services de transports routiers de voyageurs Services de transports routiers de marchandises Services de transport par oléoduc et gazoduc Services de transports terrestres n.d.a. (chemins de fer à crémaillère, téléphérique, télésiège) Services de navigation intérieure
63	741 742 750	<i>Services de transports maritimes et aériens</i> Services de transports maritimes Services de transports par cabotage Services de transports aériens
65	761 762 763 764 771 772 773	<i>Services annexes des transports</i> Services annexes aux transports terrestres autres que par chemin de fer Services annexes à la navigation intérieure Services annexes aux transports maritimes et par cabotage Services annexes aux transports aériens Services des agences de voyage Services des intermédiaires de transport Services de dépôts et entrepôts
67	790	<i>Services de communication</i>
69	811 812 813 820	<i>Services des institutions de crédit et d'assurance</i> Services des autorités bancaires centrales Services des autres institutions monétaires Services des autres institutions de crédit Services d'assurance
71	830 840	<i>Services fournis aux entreprises</i> Services des auxiliaires financiers, d'assurances, d'affaires immobilières; services des conseils juridiques, comptables, fiscaux, techniques, en organisation; services de publicité; services de traitement électronique de l'information Services de location de biens mobiliers, sans personnel permanent

NACE-CLIO (R 44) Branches	NACE-CLIO Groupes	Libellé
73	850	<i>Services de location de biens immobiliers</i>
75	93 C 94 C	<i>Services d'enseignement et de recherche marchands</i> <i>Services d'enseignement marchands</i> <i>Services de recherche et développement marchands</i>
77	95 C	<i>Services de santé marchands</i>
79	92 C 96 C 97 C 981 982 983 984	<i>Services récréatifs et culturels, services personnels, autres services marchands n.d.a.</i> <i>Services marchands de voirie, de désinfection, de nettoyage</i> <i>Services marchands d'hébergement social, d'associations professionnelles, d'organisations économiques, et de syndicats patronaux</i> <i>Services marchands récréatifs et culturels</i> <i>Services de blanchisserie, de teinturerie et similaires</i> <i>Services de coiffure et d'instituts de beauté</i> <i>Services des studios de photographie</i> <i>Autres services personnels n.d.a. (services de pompes funèbres, de crémation, d'agences matrimoniales, d'astrologie, etc.)</i>
		<b>Services non marchands</b>
81	91 92 A 96 A 97 A	<i>Services d'administration générale des administrations publiques</i> <i>Services d'administration générale de défense nationale, de sécurité sociale obligatoire des administrations publiques</i> <i>Services non marchands de voirie, de désinfection et services d'administration des cimetières des administrations publiques</i> <i>Services non marchands d'œuvres sociales, d'hébergement social, de syndicats d'initiative, de syndicats patronaux, d'associations professionnelles et d'organisations économiques des administrations publiques</i> <i>Services non marchands récréatifs et culturels (spectacles, installations et organismes sportifs, bibliothèques, archives, musées, jardins zoologiques et botaniques), des administrations publiques</i>
85	93 A, B 94 A, B	<i>Services d'enseignement et de recherche non marchands des administrations publiques et privées</i> <i>Services d'enseignement non marchands des administrations publiques et privées</i> <i>Services de recherche et développement non marchands des administrations publiques et privées</i>
89	95 A, B	<i>Services de santé non marchands des administrations publiques et privées</i>
93	96 B 97 B 99	<i>Services domestiques et autres services non marchands n.d.a.</i> <i>Services non marchands d'œuvres sociales, d'hébergement social, de syndicats d'initiative, de syndicats d'ouvriers et d'employés, d'organisations religieuses et associations philosophiques, partis politiques, groupements de consommateurs, associations civiques, etc., des administrations privées</i> <i>Services non marchands récréatifs et culturels, (spectacles, installations et organismes sportifs, bibliothèques, archives, musées) des administrations privées</i> <i>Services domestiques</i>

Le tableau Entrées-Sorties comprend, en ligne, les sous-branches suivantes:

NACE-CLIO (R 44) Sous-branches	NACE-CLIO Groupes	Libellé
09.1	161, 163	Énergie électrique, vapeur, eau chaude, air comprimé
09.3	162	Gaz distribué
09.5	170	Eau
13.1	211, 221, 222, 223	Minerais et métaux ferreux
13.3	212, 224	Minerais et métaux non ferreux
63.1	741, 742	Services de transports maritimes et par cabotage
63.3	750	Services de transports aériens





## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- C. Abraham, A. Thomas (1970) : Microéconomie. Dunod, Paris.
- J.E. Ahern (1980) : The Exergy Method of Energy Systems Analysis. Wiley, New-York.
- P. Ailleret (1979) : Unité d'énergie et bilans énergétiques. Revue de l'Energie, No 312, 67-76.
- G. Antille, E. Baranzini, J. Burle de Figueiredo (1971) : Expériences en vue de la construction d'un tableau Input-Output pour la Suisse. Rapport présenté à l'Assemblée annuelle de la Société suisse de statistique et d'économie politique. Institut Battelle, Université de Genève, Genève.
- P.L. Auer (1981) : A Model of Substitution in a Competitive Market. Energy, 6, 561-570.
- Association Suisse des Electriciens (1971) : Consommation d'énergie électrique en Suisse dans les ménages, l'artisanat et l'agriculture. Bulletin ASE-UCS, 24, 299-300.
- E.R. Berndt (1978) : Aggregate Energy, Efficiency, and Productivity Measurement. Annual Review of Energy, 3, 225-273.
- E.R. Berndt, D.O. Wood (1974) : Technology, Prices, and the Derived Demand for Energy. Discussion Paper 74-09. Dpt of Economics, Univ. of British Columbia.
- L. von Bertalanffy (1960) : Principles and Theory of Growth. Dans : W.W. Nowinski, ed : Fundamental Aspects of Normal and Malignant Growth. Elsevier, Amsterdam.
- L. von Bertalanffy (1973) : Théorie générale des systèmes. Dunod, Paris.
- D. Bonnard (1982) : Eléments du concept d'un modèle d'utilisation de l'énergie. Dans : 3ème Séminaire sur la modélisation énergétique. EPFL, publication No 199.
- L. Borel (1974) : Economie énergétique et exergie. Institut de Thermodynamique. Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne.
- L. Borel (1979) : Théorie générale de l'exergie et applications pratiques. Articles parus dans : Entropie No 85, 3-14; No 86, 312; No 87, 4-16.
- I. Boustead, G.F. Hancock (1979) : Handbook of Industrial Energy Analysis. Ellis Horwood, Chichester.
- J. Brenet (1980) : Introduction à l'électrochimie de l'équilibre et du non-équilibre. Masson, Paris.
- G. Bruhat (1968) : Thermodynamique. 6ème édition. Masson, Paris.
- C.W. Bullard, R.A. Herendeen (1975<sup>a</sup>) : Energy Impact of Consumption Decisions. Proceedings of the IEEE, 63, 484-493.
- C.W. Bullard, R.A. Herendeen (1975<sup>b</sup>) : The Energy Cost of Goods and Services. Energy Policy, 3, 268-278.

- C.W. Bullard, P.S. Penner, O.A. Pilati (1978) : Net Energy Analysis : Handbook for Combining Process and Input-Output Analysis. Resources and Energy, 1, 267-313.
- Bureau fédéral de statistique (1967) : Cadre, définitions et bases statistiques des comptes nationaux de la Suisse, Berne.
- Bureau fédéral de statistique (1978) : Annuaire statistique de la Suisse. Birkhäuser, Bâle.
- H. Caswell, H.E. Koenig, J.A. Resh, O.E. Ross (1972) : An Introduction to Systems Science for Ecologists. Dans : B.C. Patten, ed : Systems Analysis and Simulation Ecology. Academic Press, New-York, Vol. 2, 3-78.
- CEE (1966) : Der wirtschaftliche Einfluss des Energiepreises. Reihe Wirtschaft und Finanzen, 4, Brüssel.
- P. Chambadal (1974) : La thermodynamique. Collection de la Direction des Etudes et Recherches d'Electricité de France. Eyrolles, Paris.
- P.F. Chapman (1974) : Energy Costs : a Review of Methods. Energy Policy, 2, 91-103.
- P.F. Chapman, G. Leach et M. Slessor (1974) : The Energy Cost of Fuels. Energy Policy, 2, 231-243.
- J.P. Charpentier et J.M. Beaujean (1977) : Toward a Better Understanding of Energy Consumption, III. Energy, 2, 273-282.
- P. Chartier, M. Gross, K.S. Spiegler (1975) : Applications de la thermodynamique du non-équilibre. Hermann, Paris.
- F.B. Christiansen, T.M. Fenchel (1977) : Theories of Populations in Biological Communities. Ecological Studies, 20. Springer-Verlag, Berlin.
- Comité national français de la Conférence mondiale de l'énergie (1976) : Synthèse des bilans énergétiques français, 1958-1975. La Cootypographie, Asnières.
- Commission de recherches économiques (1971) : La balance suisse des revenus en 1970. 109ème rapport. Supplément de "La vie économique", Juillet, Berne.
- Commission pour les tarifs d'énergie électrique de l'UCS (1971) : Situation actuelle et tendances de développement des tarifs dans les entreprises suisses d'électricité. Bulletin ASE-UCS, 11, 571-582.
- Conception Globale Suisse des Transports (1977) : Rapport final. Berne.
- E. Coste, D. Oury (1978) : Analyse énergétique. Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris. Paris.
- J. Darmstadter, J. Dunkerley, J. Alterman (1977) : How Industrial Societies Use Energy : A Comparative Analysis. Resources for the Future. John Hopkins University Press, Baltimore.
- J. Darmstadter, J. Dunkerley, J. Alterman (1978) : International Variations in Energy Use : Findings from a Comparative Study. Annual Review of Energy, 3, 201-224.

- K. Denbigh (1965) : The Thermodynamics of the Steady State. 3ème édition. Wiley, New-York.
- K. Denbigh (1971) : The Principles of Chemical Equilibrium. 3ème édition. Cambridge University Press, London.
- R.V. Denton (1975) : The Energy Cost of Goods and Services in the Federal Republic of Germany. Energy Policy, 3, 279-284.
- Direction générale des Douanes (1971) : Statistique annuelle du commerce extérieur de la Suisse 1970. Berne.
- R. Dorfman, P.A. Samuelson, R.M. Solow (1958) : Linear Programming and Economic Analysis. Mc Graw-Hill, New-York.
- Eidg. Kommission für die Gesamtenergiekonzeption (1976) : Die Kosten der Energieversorgung in der Schweiz. Ausgearbeitet durch Motor Columbus A.G., Baden. Studie Nr. 2. Berne.
- Eidg. Kommission für die Gesamtenergiekonzeption (1977) : Stabilisierungsvarianten. Ausgearbeitet durch Arbeitsgruppe EWU, Zurich. Studie Nr. 11a. Berne.
- J.M. English (1974) : Economic Theory - New Perspectives. Dans : J.J. van Dixhoorn, F.J. Evans, ed. : Physical Structure in Systems Theory. Academic Press, London, 279-296.
- R.B. Evans, G.L. Crellin, M. Tribus (1966) : Thermoeconomics Considerations of Sea Water Demineralization. Dans : K.S. Spiegler ed. : Principles of Desalination. Academic Press, New-York, 21-76.
- R.B. Evans (1969) : A Proof that Essergy is the Only Consistent Measure of Potential Work (for Chemical Systems). Thayer School of Engineering, Dartmouth College. Hanover, New Hampshire.
- Federal Energy Administration (1976) : Net Energy from Nuclear Power. National Energy Information Center. FEA/B-76/702. Washington D.C.
- R. Ferrando et F. Schaller (1976) : L'énergie en alimentation dans son aspect global. Revue économique et sociale, 34, 93-107.
- J.C. Fisher, R.H. Pry (1971) : A simple Substitution Model of Technological Change. Technological Forecasting and Social Change, 3, 75-88.
- O.I. Franksen (1972) : A Physical Analogy of the Walrasian System. Dans : J.M. English : Economics of Engineering and Social Systems. J. Wiley, New-York, 94-150.
- O.I. Franksen (1974) : Basic Concepts in Engineering and Economics. Dans : J.J. van Dixhoorn, F.J. Evans, ed. : Physical Structure in Systems Theory. Academic Press, London, 247-278.
- J.R. Frisch, J. Lacoste (1978) : Bilans énergétiques et équivalences électricité - combustibles. A propos des bilans de l'OCDE. Revue de l'Energie, No 300, 5-12.
- B. Fritsch, R. Codoni, B. Saugy (1980) : The Use of Input-Output Techniques in an Energy Oriented Model. Dans : G. Bruckmann, ed. : Input-Output Approaches in Global Modeling. IIASA, Laxenburg, Austria.

- R.A. Gaggioli (1977) : Proper Evaluation and Pricing of Energy. Dans : R.A. Fazzolare and C.B. Smith, ed. : Energy Use Management, Proceedings of the International Conference, Vol. II. Pergamon Press, New-York, 31-43.
- A. Gardel (1979) : Energie, économie et prospective. Pergamon Press, London.
- N. Georgescu-Roegen (1971) : The Entropy Law and the Economic Process. Harvard University Press, Cambridge, Mass.
- N. Georgescu-Roegen (1976) : The Entropy Law and the Economic Problem. Dans : Energy and Economic Myths. Pergamon Press, New-York, 53-60.
- N. Georgescu-Roegen (1978) : De la science économique à la bioéconomie. Revue d'économie politique, 88.
- J.W. Gibbs (1876) : On the Equilibrium of Heterogeneous Substances. Dans : the Scientific Papers of J.W. Gibbs, Vol. 1. Réédition, 1959. Dover, New-York, Thermodynamics, 55-353.
- J.M. Giovannoni (1977) : Quelques aspects de la thermodynamique des processus irréversibles. Bulletin technique de la Suisse romande, 23, 301-305.
- J. Girod (1977) : La demande d'énergie. Méthodes et techniques de modélisation. Collection : Energie et Société. Editions du C.N.R.S., Paris.
- P. Glandsorff, I. Prigogine (1971) : Structure, stabilité et fluctuations. Masson, Paris.
- W. Häfele (1977) : La demande d'énergie. AIEA Bulletin, 19, 21-37.
- C.A. Hall, J.W. Day, H.T. Odum (1977) : A Circuit Language for Energy and Matter. Dans : C.A. Hall et J.W. Day, ed.: Ecosystem Modeling in Theory and Practise. Wiley, New-York, 37-48,
- J.M. Henderson, R.E. Quandt (1967) : Microéconomie. Dunod, Paris.
- R.A. Herendeen (1974) : Use of Input-Output Analysis to Determine the Energy Cost of Goods and Services. Dans : M.S. Macrakis, ed.: Energy : Demand, Conservation and Institutional Problems. MIT Press, Cambridge, Mass., 141-158.
- R.A. Herendeen (1978) : Input-Output Techniques and Energy Cost of Commodities. Energy Policy, 6, 162-165.
- H. Hirata, T. Fukao (1978) : A Macromodel of Mass and Energy Flow in Production Processes. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, SMC 8, 432-436.
- K.C. Hoffman (1974) : A Unified Framework for Energy System Planning. Energy Modelling, Special Issue of Energy Policy. IPC Science and Technology Press, Guildford, Surrey, 150-162.
- K.C. Hoffman, D.W. Jorgenson (1977) : Economic and Technological Models for Evaluation of Energy Policy. The Bell Journal of Economics, 8, 444-466.
- M. Holzman (1953) : Problems of Classification and Aggregation. Dans : W. Leontief, ed. : Studies in the Structure of the American Economy. Oxford University Press, New-York, Ch. 9, 326-359.

- E.A. Hudson, D.W. Jorgenson (1976) : Tax Policy and Energy Conservation. Dans : D.W. Jorgenson, ed. : Econometric Studies of U.S. Energy Policy. North-Holland, Amsterdam, 7-94.
- International Energy Agency (1977) : An Initial Multi-National Study of Future Energy Systems and Impacts of Some Evolving Technologies. International Energy Systems Analysis Programme. Jülich, Brookhaven.
- J.H. Keenan, E.P. Gyftopoulos, G.N. Hatsopoulos (1974) : The Fuel Shortage and Thermodynamics - The Entropy Crisis. Dans : M.S. Macrakis, ed. : Energy, Demand, Conservation, and Institutional Problems. MIT Press, Cambridge, Mass., 456-466.
- H.E. Koenig, R.L. Tummala (1972) : Principles of Ecosystems Design and Management. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, SMC 2, 449-459.
- H.E. Koenig, T.C. Edens (1977) : Energy, Ecology and Economics. Dans : F.H. Branin, K. Huseyin : Problem Analysis in Science and Engineering. Academic Press, New-York, 283-340.
- W. Leontief (1951) : The Structure of American Economy, 1929-1939. Oxford University Press, New-York, 2nd edition.
- W. Leontief and others (1953) : Studies in the Structure of the American Economy. Oxford University Press, New-York.
- W. Leontief (1970) : The Dynamic Inverse. Dans : A.P. Carter et A. Bródy : Contributions to Input-Output Analysis. North-Holland, Amsterdam, 17-46.
- H.A. Linstone, D. Sahal (ed) (1976) : Technological Substitution : Forecasting Techniques and Applications. Elsevier, New-York.
- H.A. Linstone (1976) : Implications and Challenges. Voir référence ci-dessus, 273-276.
- A.J. Lotka (1922) : Contribution to the Energetics of Evolution. Natural Selection as a Physical Principle. Proceedings of the National Academy of Science, 8, 147-154.
- A.J. Lotka (1932) : The Growth of Mixed Populations : Two Species Competing for a Common Food Supply. Dans : F.M. Scudo et J.R. Ziegler, ed. : The Golden Age of Theoretical Ecology : 1923-1940. Lecture Notes in Biomathematics, 22. Springer-Verlag, Berlin.
- Y. Mainguy (1967) : L'économie de l'énergie. Dunod, Paris.
- A.S. Manne (1976) : ETA : a Model for Energy Technology Assessment. The Bell Journal of Economics, 7, 379-406.
- C. Marchetti (1975) : Primary Energy Substitution Model. On the Interaction Between Energy and Society. Chemical Economy & Engineering Review, 7, 9-19.

- C. Marchetti (1978) : Energy Systems - The Broader Context. RM-78-18. IIASA, Laxenburg, Austria.
- P. Massé (1968) : Le choix des investissements. Critères et méthodes. Dunod, Paris.
- K. Miyazawa (1976) : Input-Output Analysis and the Structure of Income Distribution. Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems, No 116. Springer-Verlag, Berlin.
- T. de Montbrial (1974) : Thermodynamique et Economie. Communication au Colloque Sadi Carnot du C.N.R.S. Ecole Polytechnique, 13 juin 1974.
- W.D. Nordhaus (1975) : The demand for Energy : An International Perspective. Dans : W.D. Nordhaus, ed. : Proceedings of the Workshop on Energy Demand. IIASA, Laxenburg, 511-587.
- OCDE (1977) : L'industrie sidérurgique en 1975. Paris.
- OCDE (1979) : L'industrie pétrochimique : perspectives jusqu'en 1985. L'observateur de l'OCDE, 97, mars, 8-9.
- H.T. Odum, R.C. Pinkerton (1955) : Time's Speed Regulator : the Optimum Efficiency for Maximum Power Output in Physical and Biological Systems. American Scientist, 43, 331-343.
- H.T. Odum (1967) : Biological Circuits and the Marine Systems of Texas. Dans : T.A. Olson et F.J. Burgess, ed. : Pollution and Marine Ecology. Interscience Publishers, New-York, 99-157.
- H.T. Odum (1971) : Environment, Power and Society. Wiley Interscience, New-York.
- H.T. Odum (1972) : An Energy Circuit Language for Ecological and Social Systems : Its Physical Basis. Dans : B.C. Patten, ed. : Systems Analysis and Simulation in Ecology. Academic Press, New-York, Vol. 2, 139-211.
- E.P. Odum (1976) : Ecologie. Doin, Paris.
- Office fédéral de l'économie énergétique (1974) : La consommation d'énergie électrique pour les usages industriels en Suisse. Bulletin ASE-UCS, 21, 1576-1581.
- Office fédéral de l'économie énergétique (1976) : Apports et consommation d'énergie en Suisse de 1970 à 1975. Bulletin ASE-UCS, 123, 1262-1284.
- L. Onsager (1931) : Reciprocal Relations in Irreversible Processes. Physical Review, 37, 405-426 et 38, 2265-2279.
- ONU (1968) : A System of National Accounts. Statistical Office.
- ONU (1977) : Yearbook of Industrial Statistics. Vol. 1, General Industrial Statistics. 1975 Edition. New-York.

- OSCE (1975) : Nomenclature commune des produits industriels NIPRO. Luxembourg.
- OSCE (1976<sup>a</sup>) : Statistiques de l'énergie. Annuaire 1970 - 1975. Luxembourg.
- OSCE (1976<sup>b</sup>) : Méthodologie des tableaux Entrées-Sorties communautaires, 1970 - 1975. Série spéciale. Luxembourg.
- OSCE (1978<sup>a</sup>) : Tableaux Entrées-Sorties, 1970. Nos 2 à 9. Luxembourg.
- OSCE (1978<sup>b</sup>) : Bilans en énergie utile, 1975. Luxembourg.
- R.H. Pantell (1976) : Techniques of Environmental Systems Analysis. Wiley, New-York.
- J. Percebois (1979) : Le concept d'intensité énergétique est-il significatif ? Revue d'économie politique, 89, 509-527.
- F. Perroux (1975) : Unités actives et mathématiques nouvelles. Révision de la théorie de l'équilibre économique. Dunod, Paris.
- V. Peterka (1977) : Macrodynamics of Technological Change : Market Penetration by New Technologies. PR-77-22. IIASA, Laxenburg.
- H.J. Pick (1977) : Materials, Resources and Production : an Engineer's View. Dans : W. Leontief, ed. : Structure, System and Economic Policy. Cambridge University Press, Cambridge, 143-164.
- D. et M. Pimentel (1979) : Food, Energy and Society. Resource and Environmental Science Series. Edward Arnold, London.
- I. Prigogine (1968) : Introduction à la thermodynamique des processus irréversibles. Dunod, Paris.
- I. Prigogine (1974) : Entropie et dynamique. Entropie, 57, 5-11.
- Projet d'Ecole Energie (1981) : Rapport. Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne.
- J.L.R. Proops (1977) : Input-Output Analysis and Energy Intensities : a Comparison of Some Methodologies. Appl. Math. Modelling, 1, 181-186.
- P. Romain (1977<sup>a</sup>) : Equivalence entre électricité et combustibles : éléments pour une discussion critique. Revue de l'Energie, No 294.
- P. Romain (1977<sup>b</sup>) : Réflexions critiques sur les bilans énergétiques. Collection : Energie et Société. Editions du C.N.R.S., Paris.
- Revue Générale Nucléaire (1978) : Le nouveau procédé d'enrichissement de l'uranium, No 2, 126-127.
- F. Roberts (1978) : The Aims, Methods and Uses of Energy Accounting. Applied Energy, 4, 199-217.
- J. de Rosnay (1975) : Le macroscopie. Le Seuil, Paris.

- P.A. Samuelson (1971) : Les fondements de l'analyse économique. Gauthier-Villars, Paris.
- P.A. Samuelson (1972) : L'économie. 2 volumes. Armand Colin, Paris.
- B. Saugy, Y. Bovet, A. Roulier (1977) : Energy Strategies : a Technical Assessment. Présenté au : Workshop on Energy Strategies : Conception and Embedding, 17-19 mai 1977. IIASA, Laxenburg, Austria.
- B. Saugy (1979) : Evaluation de stratégies énergétiques dans le contexte économique. Ingénieurs et Architectes Suisses, No 1, 14-19.
- P. Souchay (1961) : Chimie générale (Thermodynamique chimique). Masson, Paris.
- L. Stoleru (1975) : L'équilibre et la croissance économique. Principes de la macroéconomie. Dunod, Paris, 3ème édition.
- R. Stone, J.A.C. Brown (1962) : A Long-Term Model for the British Economy. Dans : R.C. Geary, ed. : Europe's Future in Figures. North Holland, Amsterdam.
- J. Szargut (1980) : International Progress in Second Law Analysis. Energy, 5, 709-718.
- J. Thoma (1974) : Models, Bond Graphs and Entropy. Dans : J.J. van Dixhoorn, F.J. Evans, ed. : Physical Structure in Systems Theory. Academic Press, London, 17-33.
- J. Thoma (1977) : Energy, Entropy, and Information. RM-77-32, IIASA, Laxenburg, Austria.
- J.M. Toinet (1978) : Grey Energy : The Generation of Consumption in an Input-Output Approach. 6th IIASA Global Modeling Conference. Laxenburg, Austria.
- J.M. Toinet (1979) : A Comparison of Energy Costs in a Number of European Countries. Rapport IENER. Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne.
- M. Tribus, E.C. Mc Irvine (1971) : Energy and Information. Scientific American, 179-188.
- R.L. Tummala, L.J. Connor (1973) : Mass-Energy Based Economic Models. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, SMC 3, 548-555.
- J. Ullmo (1970) : Le profit. Dunod, Paris.
- Union Pétrolière (1970) : Rapport annuel.
- Union Suisse des Consommateurs d'Énergie de l'Industrie et des Autres Branches Économiques (1980) : Consommation d'énergie dans les industries suisses.
- Verein Industrieller Brennstoffverbraucher und Schweizerischer Energie-Konsumenten-Verband (1976) : Energieverbrauch in Schweizerischen Industriebetrieben.
- V. Volterra (1931) : Leçons sur la théorie mathématique de la lutte pour la vie. Gauthier-Villars, Paris.



- H.J. Wagner (1978) : Der Energieaufwand zum Bau und Betrieb ausgewählter Energieversorgungstechnologien. Angewandte Systemanalyse. Rapport Nr. 10 - KFA, STE, Jülich.
- M. Webb, D. Pearce (1975) : The Economics of Energy Analysis. Energy Policy, 3, 318-331.
- D.J. Wright (1974) : Goods and Services : an Input-Output Analysis. Energy Policy, 2, 307-315.



## CURRICULUM VITAE

Nom : Jean-Michel TOINET  
Date de naissance : 20.11.1953, Karlsruhe (RFA)  
Nationalité : Française  
Etat civil : Marié  
Permis de travail : C (établissement)  
Adresse : 64, avenue d'Ouchy, 1006 Lausanne  
Téléphones : Privé : 021/27'60'14 - Professionnel 021/47'24'83

### 1. DIPLOMES

- . Baccalauréat scientifique, mention. Brest, 1971.
- . Ingénieur civil, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL), janvier 1977, Prix Grenier.

### 2. STAGES

- . Marine marchande : Officier-pilotin - 1ère classe (1971)
- . Génie civil : Réservoir Marne (2 mois - 1972)
- . Génie civil : Centrale nucléaire de Bugey (2 mois 1975)
- . Physique : Assistant-étudiant (1975 - 1976)

### 3. ACTIVITES PROFESSIONNELLES

Dès avril 1977 : Institut d'Economie et Aménagements Energétiques (IENER) EPFL.

- . Assistant en économie de l'énergie et aménagements de production d'énergie :
  - 2ème et 3ème cycles.
  - Recherches pour l'enseignement : comparaisons consommation d'énergie - PIB, flux d'énergie, étude hydraulique de bassins versants.

. Chercheur en économie de l'énergie :

- Collaborateur au "projet d'Ecole Energie" (modélisation du système énergétique de la Suisse).
- Délégué suisse à l'Agence Internationale de l'Energie en 1978 - 1979 (Jülich, RFA; direction : Office Fédéral de l'Energie, Berne).
- Collaborateur au projet "ZENCAP-SYSTEM" (Inst. für Wirtschaftsforschung, Zürich, Eidg. Inst. für Reaktorforschung, Würenlingen).
- Collaborateur au projet "Electrification du Rwanda".
- Activités : caractérisation de technologies, modélisation des interactions énergie-économie, méthodes Input-Output, contenu énergétique des biens, programmation, banques de données.

. Publications et rapports

- Grey Energy : the Generation of Consumption in an Input-Output Approach. 6 th Global Modeling Conference. IIASA. Laxenburg, 1978.
- La Suisse et l'Agence Internationale de l'Energie. Ingénieurs et Architectes suisses, 1979.
- Technology Characterizations. In "Energy Technology Data Handbook" (ed. : C. Manthey). Jülich and IEA Systems Analysis Project, 1980.
- A comparison of Energy Costs in European Countries. Deuxième séminaire sur la modélisation énergétique, EPF Lausanne, 1980.
- Le contenu énergétique des biens et services en Suisse. Dans le rapport "Projet d'Ecole Energie", EPF Lausanne, 1981.
- Analyse du système énergétique du Rwanda. J.M. Toinet, C. Choulat, K. Niroumand, G. Sarlos. Rapport IENER - EPFL, 1982.

Membre de la Société Suisse des Ingénieurs et Architectes.